



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

III МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
ПО СОВРЕМЕННЫМ ПРОБЛЕМАМ МАТЕРИАЛОВ  
И КОНСТРУКЦИЙ

**Сборник статей**

Ответственный редактор  
*Л. А. Бохова*  
доктор технических наук, профессор

Улан-Удэ  
Издательство Бурятского госуниверситета  
2019

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION  
EAST SIBERIA STATE UNIVERSITY  
OF TECHNOLOGY AND MANAGEMENT  
RUSSIAN FOUNDATION FOR BASIC RESEARCH

III INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS  
ON CONTEMPORARY PROBLEMS OF MATERIALS  
AND CONSTRUCTIONS

**Collection of articles**

Executive editor

***L. A. Bokhoeva***

Doctor of technical sciences, professor

Ulan-Ude  
Buryat State University Publishing Department  
2019

УДК 621.01  
ББК 34.41  
М 433

*Текст печатается в авторской редакции*

**М 433** **III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций** : сборник статей / отв. ред. Л. А. Бохоева. — Улан-Удэ : Изд-во Бурятского госуниверситета, 2019. — 408 с.  
ISBN 978-5-9793-1400-6

В сборнике статей представлены научные доклады участников III Международной конференции молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций, проведенной в Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления (оз. Байкал, 24-28 августа 2019 г.). Рассмотрены современные проблемы и достижения в области материаловедения и механики, определены новые «точки роста» и прорывные технологии развития по направлениям: функциональные и конструкционные материалы; механика композиционных материалов и конструкций; компьютерное моделирование материалов и конструкций.

Предназначен для преподавателей, научных сотрудников, инженеров, докторантов, аспирантов, магистрантов, студентов учебных заведений, а также всех, кто проявляет интерес к рассматриваемой проблематике с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

**III International Conference of Young Scientists on Contemporary Problems of Materials and Constructions**: collection of articles / resp. ed. L. A. Bokhoeva. — Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department, 2019. — 408 с.  
ISBN 978-5-9793-1400-6

The collection of articles presents the scientific reports of the participants of the III International Conference of Young Scientists on Contemporary Problems of Materials and Constructions held at the East Siberia State University of Technology and Management (Lake Baikal, August 24-28 2019). Current problems and achievements in the field of materials science and mechanics are reviewed, new “growth points” and breakthrough development technologies are identified in the areas of: functional and structural materials; mechanics of composite materials and constructions; computer modeling of materials and constructions.

The collection of articles is intended for lecturers, researchers, engineers, doctoral students, graduate students, undergraduates, students of educational institutions, as well as all who are interested in the subject in question for the purpose of use in scientific work and educational activities.

**УДК 621.01**  
**ББК 34.41**

ISBN 978-5-9793-1400-6

© ВСГУТУ, 2019

# ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

---

УДК 54-11

## СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ПОРОШКИ И КЕРАМИКА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОКСИДОВ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА – ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

© **Е. В. Гордиенко**, научный сотрудник, **В. В. Дубов**, лаборант-исследователь,  
**П. В. Карпюк**, старший научный сотрудник, **Г. А. Досовицкий**, научный сотрудник  
НИИ «Курчатовский институт», 123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.  
E-mail: Gordi1244@gmail.com

*Данная статья посвящена подбору промывных жидкостей для промывки свежесозданного осадка в процессе получения шихты для сцинтилляционной керамики. В качестве метода получения был выбран способ совместного соосаждения нитратов металлов в гидрокарбонат аммония. В ходе работы со сложнооксидными структурами семейства гранаты, было выявлено не систематическое невоспроизводимое вымывание основных компонентов на стадии промывания осадка. Для решения этой технологической задачи было решено провести серию экспериментов по промывке получаемых осадков органическими жидкостями. Помимо удаления из осадка нежелательных примесей солей аммония, необходимо так же контролировать люминесцентные и транслюцентные свойства. Для контроля этих показателей со всех получаемых образцов керамики были получены фотолюминесцентные спектры и амплитудные спектры. Также проведен масс-спектральный анализ промывных жидкостей с целью контроля вымывания основных компонентов.*

**Ключевые слова:** сцинтилляция, люминесценция, гранат, совместное осаждение.

## SCINTILLATION POWDERS AND MULTI-COMPONENT CERAMIC OXIDES WITH GARNET STRUCTURE – THE IMPACT OF CHANGING COMPOSITION ON LUMINESCENT PROPERTIES

**E. V. Gordienko**, research fellow, **V. V. Dubov**, laboratory assistant-researcher,  
**P. V. Karpyuk**, senior researcher, **G. A. Dosovitskii**, research fellow  
NRC “Kurchatov Institute”, 123182, Russia, Moscow, 1 Akademika Kurchatova Sq.  
E-mail: Gordi1244@gmail.com

*This article is devoted to the selection of washing liquids for washing the freshly precipitated sediment during the preparation of the charge for scintillation ceramics. As a method of production, a method of co-precipitating metal nitrates in ammonium bicarbonate was chosen. In the course of working with complex oxide structures of the garnet family, non-reproducible leaching of the main components at the stage of washing the precipitate was revealed. To solve this technological problem, it was decided to conduct a series of experiments on washing the obtained sediments with organic liquids. In addition to removing undesirable ammonium salts from the sediment, it is also necessary to control the luminescent and translucent properties. To control these indicators, photoluminescence spectra and amplitude spectra were obtained from*

*all the obtained ceramic samples. A mass spectral analysis of the washing liquids was also carried out in order to control the leaching of the main components.*

**Keywords:** *scintillation, luminescence, garnet, co-deposition.*

## **Введение**

Сцинтилляторы – материалы, используемые для регистрации ионизирующих излучений в таких областях, как медицинская диагностика, системы для досмотра, физические исследования [1]. Одной из наиболее перспективных групп сцинтилляционных материалов являются сложные оксиды со структурой граната  $(\text{Gd,Y})_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , для которых были продемонстрированы высокие сцинтилляционные свойства – световыход свыше 50 тыс.фот./МэВ и время затухания основной компоненты сцинтилляции в пределах 100 нс; характеристики были достигнуты как в монокристаллических, так и в керамических материалах [2]. Недавно было показано, что это семейство материалов может быть использовано для регистрации нейтронов в широком энергетическом диапазоне [3, 4]. Для оксидов со структурой граната на основе Ga и Gd характерна область гомогенности несколько атомных процентов [4]. По-видимому, это является причиной зависимости люминесцентных свойств порошков составов, близких к  $\text{Gd}_3(\text{Al,Ga})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  от вариаций соотношения Gd / (Al,Ga) d пределах нескольких процентов, что было продемонстрировано в работе [5]. Поэтому при получении материалов на основе упомянутых оксидов важен контроль стехиометрического соотношения компонентов выбранного состава.

Сцинтилляционная керамика на основе оксидов со структурой граната может быть получена различными методами. Получение порошков методом совместного осаждения – один из потенциально применимых для этой задачи процессов. В процессе осаждения из азотнокислых растворов образуется побочный продукт – нитрат аммония, который негативно влияет на микроструктуру получаемого порошка и люминесцентные свойства получаемой из него керамики. Поэтому обычной стадией синтеза является промывка осадка. Из-за особенностей химической природы входящих в состав обсуждаемого материала металлов, при их совместном осаждении и последующей промывке может наблюдаться переход Ga [6] и/или Gd в маточный или промывные растворы: галлий легко переходит в растворимые соли, а гадолиний гидролизует и так же вымывается [7].

В данной работе исследовано влияние отмывки высушенного осадка органическими растворителями на состав и микроструктуру порошков и плотность и люминесцентные свойства получаемой из них керамики.

## **Экспериментальная часть**

Осадок, содержащий компоненты в соотношении, задаваемым формулой  $\text{Gd}_{1,485}\text{Y}_{1,485}\text{Ce}_{0,03}\text{Al}_{2,5}\text{Ga}_{2,5}\text{O}_{12}$  получали методом обратного осаждения. Для этого был приготовлен раствор нитратов металлов (общая концентрация 1,5 моль/л, pH  $\approx$  1) и раствор гидрокарбоната аммония (концентрация 15 масс.%, pH  $\approx$  9). Раствор нитратов приливали к раствору гидрокарбоната аммония при интенсивном перемешивании (гидрокарбонат аммония был взят с избытком 30%), реакция пульпы после осаждения слабо щелочная (pH  $\approx$  7). Затем осадок отфильтровывали, просушивали в шкафу с принудительной вентиляцией при 100 °С до постоянной массы. После чего методом декантации промывали в одном из выбранных растворителей: вода, ацетон, этанол, изопропиловый спирт, пиридин. Далее сус-

пензию фильтровали, фильтрат анализировали методом масс-спектрометрии для определения элементов, перешедших в раствор. После этого проводили термообработку осадка при температуре 850 °С. Микроструктуру получаемых порошков исследовали методом сканирующей электронной микроскопии.

Далее из полученного порошка методом одноосного прессования получали компакты, которые спекали на воздухе при температуре 1600 °С. Плотность компактов определяли геометрически, а плотность керамики – методом гидростатического взвешивания. Измеряли спектры фотолюминесценции полученных образцов керамики (на приборе Люмэксб Флюорат-02-Панорама) и световых выходов сцинтилляций, который определяли из амплитудных спектров, зарегистрированных при возбуждении  $\alpha$  -частицами (5,5 МэВ). Подробнее методика измерения сцинтилляционных характеристик описана в [8].

### Результаты и обсуждение

В Таблице 1 приведены данные о переходе Ga и Gd в растворы при промывке. Можно видеть, что максимальное вымывание компонентов происходит при промывке высушенного осадка водой – приведенные концентрации соответствуют вымыванию около 0,003 формульных единиц Ga и менее 0,001 формульных единиц Gd.

Таблица 1 – Данные масс-спектрального анализа промывочных вод

№ пробы	1	2	3	4	5	6
Жидкость	Маточный раствор	Этанол	Вода	Изопропанол	Пиридин	Ацетон
C(Ga), ppm	4,4	<0,5	169	0,2	<0,5	<0,5
C(Gd), ppm	1,2	1,23	86	1,49	31,7	43

Микроструктура порошков, полученных из осадков, промытых различными растворителями, визуально не различается, и характеризуется размерами первичных частиц 50-100 нм (рисунок 1).

Плотности спрессованных компактов составили от 1,74 до 1,89 г/см<sup>3</sup>, что соответствует 29-31% от теоретической плотности (таблица 2). Плотность спеченной керамики составила 94-97% от теоретической плотности, за исключением образца, полученного из осадка, промытого ацетоном; его плотность составила около 88% от теоретической.

Спектры фотолюминесценции всех образцов имеют характерную форму для люминесценции  $\text{Ce}^{3+}$  в матрице граната (рисунок 2). Высокая интенсивность фотолюминесценции, зарегистрированная для образца, полученного из осадка, промытого ацетоном, может быть объяснена тем, что образец продемонстрировал низкую плотность, а значит – высокую пористость и большую поверхность, с которой происходит испускание света.

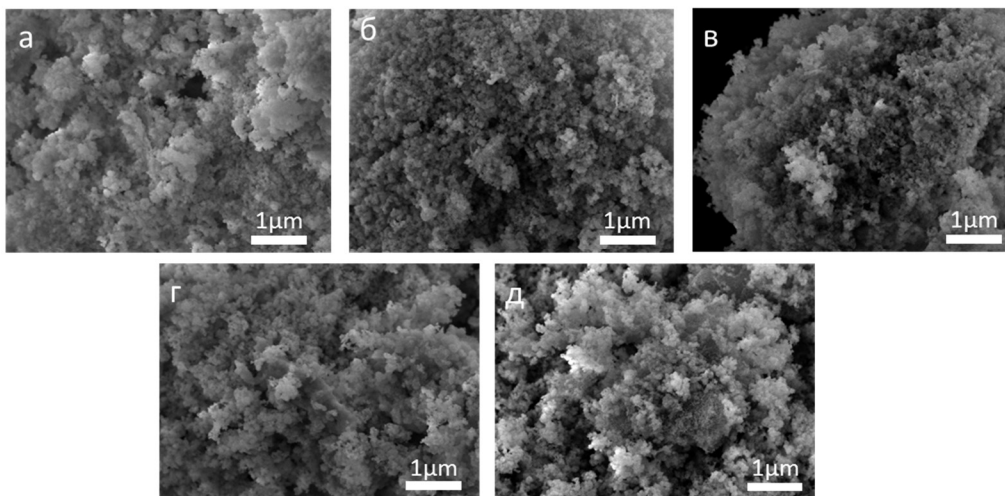


Рисунок 1 – Снимки сканирующей электронной микроскопии для порошков после термообработки при 850 °С: а) промыт водой, б) промыт изопропиловым спиртом, в) промыт этанолом, г) промыт ацетоном, д) промыт пиридином

Таблица 2 – Плотность компактов после термообработки 850 °С и 1600 °С

№ образца	Промывочный раствор	Расчётная плотность компакта 850 °С ( $\rho$ , г/см <sup>3</sup> )	Плотность керамики после 1600 °С ( $\rho$ , г/см <sup>3</sup> )
1	Вода	1,74	5,84
2	Изопропанол	1,89	5,79
3	Этанол	1,82	5,85
4	Ацетон	1,88	5,34
5	Пиридин	1,82	5,69

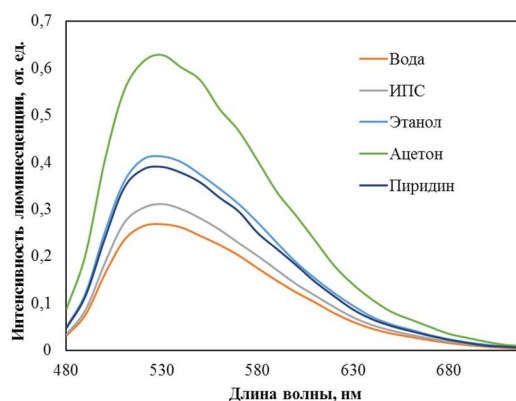


Рисунок 2 – Спектры фотолюминесценции для полученных образцов

Все образцы показали значения световыхода сцинтилляций от 31 до 38 тыс. фот./МэВ (таблица 3). Можно видеть, что для образцов, полученных из осадков, промытых пиридином и этанолом, получены несколько более высокие значения как фотолюминесценции, так и сцинтилляции. Однако, не прослеживается соответствия этих данных количеству вымываемых элементов, микроструктуре и



плотности керамики. Это позволяет предположить наличие других факторов, которые влияют на эффективность сцинтилляции и фотолюминесценции.

Таблица 3 – Световыход сцинтилляционной керамики

Промывная жидкость	Световыход, фотонов/МэВ
Вода	33500
Изопропанол	31600
Этанол	39500
Ацетон	38200
Пиридин	38200

### Выводы

Методом совместного осаждения были получены порошки сложного оксида со структурой граната состава  $Gd_{1,485}Y_{1,485}Ce_{0,03}Al_{2,5}Ga_{2,5}O_{12}$ . Промывка осадка осуществлялась в высушенном виде, в качестве промывных жидкостей использован ряд органических растворителей. Все полученные порошки обладали сходной микроструктурой. На основе порошков получены образцы сцинтилляционной керамики. Не установлено зависимости сцинтилляционных и люминесцентных характеристик от вида и количества элементов, переходящих в промывной раствор.

Авторы выражают благодарность Д. Е. Кузнецовой и Е. С. Ващенко за помощь в проведении исследований методами СЭМ и МС. Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации, договор № 14.W03.31.0004 от 20.02.2017.

### Литература

1. *Lecoq P.* Inorganic Scintillators for Detector Systems : second ed. / P. Lecoq, A. Gektin, M. Korzhik. – Springer, Cham., 2017.
2. *Kamada, K. et al.* // J. Cryst. Growth. – 2012. – № 352(1). – С. 88-90.
3. Compact and effective detector of the fast neutrons on a base of Ce doped  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$  scintillation crystal / M. Korzhik [и др.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2019. – № 66(1). – С. 536-540.
4. Neutron detection by Gd-loaded garnet ceramic scintillators / G. Dosovitskiy [и др.] // Radiation measurements. – 2019. – P. 106133.
5.  $Sm_2O_3$   $Ga_2O_3$  and  $Gd_2O_3$   $Ga_2O_3$  phase diagrams / J. Nicolas [и др.] // Journal of Solid State Chemistry. – 1984. – Т. 52. – № 2. – С. 101-113.
6. *Kanai T.* Characteristics of a nonstoichiometric  $Gd_{3+\delta}(Al,Ga)_5\delta O_{12}:Ce$  garnet scintillator / T. Kanai, M. Satoh, I. Miura. – J. Am. Ceram. Soc. – 2008. – № 91(2). – С. 456-462.
7. *Малютина Т. М.* Аналитический контроль в металлургии цветных и редких металлов : 2-е издание / Т. М. Малютина, О.В. Конькова. – 1988. – С. 234-235.
8. Synthesis of crystalline Ce-activated garnet phosphor powders and technique to characterize their scintillation light yield / E. Gordienko [и др.] // Optical Materials. – 2018. – № 78. – С. 312–318.

### References

1. *Lecoq P., Gektin A., Korzhik M.* Inorganic Scintillators for Detector Systems: second ed. – Springer, Cham., 2017.
2. *Kamada K. et al.* // J. Cryst. Growth. – 2012. – No. 352(1). – P. 88-90.

3. Korzhik M., Brinkmann K.-T., Dosovitskiy G., Dormenev V., Fedorov A., Kozlov D., Mechinsky V., Zaunick H.-G. // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2019. – No. 66(1). – P. 536-540.
4. Dosovitskiy G., Karpyuk P., Gordienko E., Kuznetsova D., Vashchenkova E., Volkov P., Retivov V., Dormenev V., Brinkmann K.-T., Zaunick H.-G., Mechinsky V., Fedorov A., Slusar I., Dosovitskiy A., Korzhik M. // Radiation measurements. – 2019. – P. 106133.
5. Nicolas J. et al. // Journal of Solid State Chemistry. – 1984. – V. 52. – No. 2. – P. 101-113.
6. Kanai T., Satoh M., Miura I. // J. Am. Ceram. Soc. – 2008. – No. 91(2). – P. 456-462.
7. Malyutina T.M., Konkova O.V. Analiticheskiy kontrol v metallurgii tsvetnykh i redkikh metallov: 2<sup>nd</sup> edition. – 1988. – P. 234-235.
8. Gordienko E., Fedorov A., Radiuk E., Mechinsky V., Dosovitskiy G., Vashchenkova E., Kuznetsova D., Retivov V., Dosovitskiy A., Korzhik M., Sandu R. // Optical Materials. – 2018. – No. 78. – P. 312–318.

УДК 546.05, 666.9-128

### 3D-АЭРОЗОЛЬНАЯ ПЕЧАТЬ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ СЛОЕВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

© А. А. Иванов<sup>1а</sup>, А. С. Чермошенцева<sup>2б</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40.

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5/1.  
E-mail: <sup>а</sup>alexchemtsu@rambler.ru, <sup>б</sup>asch-13@ya.ru

*Разработан способ синтеза полиалюмосиликатов (ПАС), макромолекулы которых имеют дендримерную морфологию. С использованием программного пакета GAUSSIAN V3LYP/6-31G(d) проведена квантово-химическая оценка термодинамически возможных механизмов создания популяций короткоцепных алюмосиликатов (ядер дендримерных макромолекул) с последующей генерацией доменов из дендримерных ансамблей, способных включать в свои междоменные пространства до 80 масс. % дисперсных частиц наполнителей. Проведен количественный расчет параметров, определяющих состав макромолекул ПАС и размер дендримерных ансамблей. На основе ПАС и высокодисперсных порошков наполнителей создан новый низкотемпературный керамический композиционный материал для 3D-аэрозольной печати. Исследованы процессы 3D-аэрозольной печати ПАС наполненных высокодисперсными порошками наполнителей. Выбран оптимальный способ генерации аэрозоля, не влияющий на надмолекулярную структуру ПАС. Посредством 3D-аэрозольной печати получены керамические диэлектрические слои с высокими потребительскими свойствами.*

**Ключевые слова:** полиалюмосиликат, дендример, 3D-аэрозольная печать, низкотемпературная керамика, печатная плата.

### 3D AEROSOL PRINTING AS A WAY OF OBTAINING LOW-TEMPERATURE CERAMIC LAYERS OF PRINT BOARDS

А. А. Ivanov<sup>1а</sup>, А. С. Chermoshentseva<sup>2б</sup>

<sup>1</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave., 40.

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University  
105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya str., 5/1.  
E-mail: <sup>а</sup>alexchemtsu@rambler.ru, <sup>б</sup>asch-13@ya.ru

*A method for the synthesis of polyaluminosilicates (PAS) has been developed, the macromolecules of which have dendrimeric morphology. Using the GAUSSIAN B3LYP / 6-31G (d) software package, a quantum chemical evaluation of the thermodynamically possible mechanisms for creating populations of short-chain aluminosilicates (nuclei of dendrimeric macromolecules) was performed, followed by the generation of domains from dendrimeric ensembles capable of including up to 80 masses into their interdomain spaces. % dispersed particles of fillers. A quantitative calculation of the parameters determining the composition of PAS macromolecules and the size of dendrimeric ensembles was carried out. A new low-temperature ceramic composite material for 3D aerosol printing has been created on the basis of PAS and highly dispersed filler powders. The processes of 3D-aerosol printing PAS filled with highly dispersed powders of fillers are investigated. The optimal method of aerosol generation was chosen that does not affect the supramolecular structure of PAS. By means of 3D aerosol printing, ceramic dielectric layers with high consumer properties were obtained.*

**Keywords:** *polyaluminosilicate, dendrimer, 3D aerosol printing, low-temperature ceramics, printed circuit board.*

Успешная разработка изделий микроэлектроники и устройств космических аппаратов с длительным сроком активной эксплуатации на базе многофункциональных конструкционных материалов осуществима при условии создания полимерных композиционных материалов нового поколения. При эксплуатации таких изделий главная проблема заключается в отведении тепла. Актуальность создания материалов, обладающих высокой теплопроводностью, устойчивостью к агрессивным средам, высоким температурам и их значительным перепадам, различным излучениям, глубокому вакууму и высоким давлениям, с ростом активности человека становится всё более злободневной.

Во многих отраслях промышленности в настоящее время, наряду с проблемой создания новых композиционных материалов стоит важная задача их нанесения на поверхность различных изделий и устройств. Так, использование 3D-печати является современным методом формирования различных покрытий и топологий в изделиях и устройствах, в т. ч. в микроэлектронике.

В настоящее время, получение однородных с высокой степенью чистоты наноструктурированных керамических покрытий заданной микроструктуры, которые обладают высокой теплопроводностью одновременно с рациональной стехиометрией, не всегда возможно. Именно поэтому развитие технологии микропечати сводится к технологиям получения расходных материалов с необходимыми функциональными и конструкционными свойствами, а также тщательному физико-химическому и морфологическому анализу полученных полимерных матриц и их компонентов. Роль управляемого химического синтеза веществ для керамических материалов, из которых можно сформировать многослойные покрытия, является определяющей в решении проблемы, ибо на стадии синтеза закладываются наноразмерные, фазовые, структурные и другие особенности, определяющие физические, механические, химические и эксплуатационные свойства готовых покрытий, предназначенных для изделий микроэлектроники и устройств космических аппаратов с длительным сроком активной эксплуатации в жестких условиях. Эта проблема во многом сводится к синтезу и химической модификации разнообразных функционализированных наночастиц с заданными химическим и фазовым составом и морфологией, а также к изучению поведения таких частиц в исходной матрице и при удалении растворителя из ограниченного объема микрокапли.

В последнее время во всем мире многие высокотехнологичные компании переходят на технологии прототипирования и коммерческого изготовления современных устройств микроэлектроники и космических аппаратов с использованием компьютерного дизайна и микропечати. Так, получение определенного диэлектрического слоя или топологии с заданными теплофизическими и физико-химическими свойствами на определенном участке устройства или изделия, невозможно классическими методами с использованием повсеместно применяемых материалов, т.к. повсеместно используемые в настоящее время неметаллические материалы в значительной мере достигли своего функционального предела.

В рамках фундаментальной науки и различных технологий активно развивается новая область физической химии высокомолекулярных соединений, связанная с синтезом и исследованием структуры и свойств трёхмерных сверхразветвлённых полимеров и олигомеров, т. н. дендримеров (фракталов) [1-3]. Материалы с такой морфологией макромолекул, привлекают внимание тем, что в процессе синтеза трёхмерных макромолекулярных ансамблей количество ответвлений увеличивается в геометрической прогрессии с каждым актом роста цепей. В результате этого изменяются размеры и форма макромолекул, что сопровождается глубоким и существенным изменением физических и физико-химических свойств, таких как вязкость, растворимость, влагопоглощение, плотность и др.

Так, специальные синтетические подходы позволяют получать регулярные дендримерные ансамбли (ДА), макромолекулы которых обладают достаточно определённой молекулярной массой. Кроме того, следует отметить, что многие физико-химические и физические свойства дендримерных материалов, температура стеклования, например, главным образом зависят от химической природы концевых групп, расположенных на поверхности таких шарообразных макромолекул-фракталов.

Одним из современных и доступных методов создания функциональных и конструкционных материалов с необходимыми свойствами в настоящее время является золь-гель технология, позволяющая на стадии синтеза управлять химической природой материала, тем самым задавая необходимые свойства готовым композитам. Золь-гель технология – важнейший способ получения нанодисперсных материалов разнообразного целевого назначения. При этом, актуальным направлением развития золь-гель синтеза является модифицирование кремний-содержащих соединений как неорганическими, так и органическими веществами. Особенностью используемых золь-гель методов является то, что реакция гидролитической поликонденсации щелочных силикатов протекает в присутствии неорганических веществ (соли, кислоты), а также низко- и высокомолекулярных органических модификаторов, которые придают заданные физико-химические и технически ценные свойства формируемых материалов. При этом, как правило, неорганические вещества и модификаторы являются темплатными агентами, способствующими формированию силикатных и гибридных нанокompозитов со специфической структурой [2].

Наряду с основной задачей создания новых керамических композиционных материалов с заданными функциональными и конструкционными свойствами, используемых в качестве расходного материала для 3D-печати различных покрытий и топологий в изделиях и устройствах микроэлектроники, стоит важная задача нанесения созданного материала на различные по своей химической природе основания, наряду с изучением процессов происходящих в процессе нане-

сения созданного материала. Такая технологическая задача как нанесение слоев и топологий, порождает актуальные проблемы физической химии поверхности (например, адгезионные и прочностные), а процесс нанесения материала на поверхность изделия или устройства порождает фундаментальные исследования в области физико-химических процессов.

В настоящее время существует множество методов аддитивной печати композиционных материалов, которые относятся к принтерным технологиям. Развитие принтерных технологий в той или иной степени базируется на достижениях в области нанотехнологий и наноматериалов. Соответственно направление создания функциональных элементов с применением принтеров относится к нанoeлектронике. Указанное направление находится в стадии достаточно динамичного развития, поэтому исследования и разработки в данной области нанотехнологий – актуальная задача.

**Получение композиционного материала.** Для синтеза дендримерных ПАС с целью получения наполненных материалов специального назначения были выбраны кремниевые кислоты и нитрат алюминия в качестве исходных реагентов для формирования дендримерных ансамблей ПАС. Формирование проводили в три стадии: I стадия – растворение кремниевых кислот при  $\text{pH} > 7$ ; II стадия – гидролиз нитрата алюминия; III стадия – неглубокая поликонденсация с образованием гель-прекурсора из олигокремниевых кислот и  $\text{O}_3\text{N-Al}(\text{OH})_2$ .

В зависимости от количества исходных компонентов, используемых для синтеза, а также контроль температуры реакции поликонденсации удалось получить ПАС с различным строением полимерной цепи (рисунок 1), имеющих различную вязкость (характеризуется молекулярной массой) и способных вмещать в свои междоменные пространства различное количество дисперсного наполнителя.

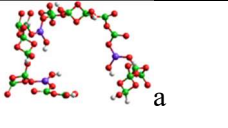
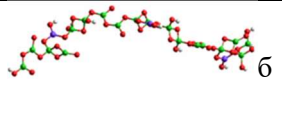
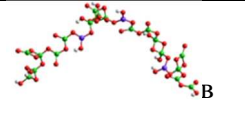
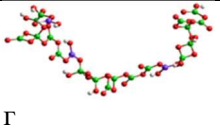
			
Вязкость – 1560 сПз	Вязкость – 2134 сПз	Вязкость – 1873 сПз	Вязкость – 1947 сПз

Рисунок 1 – Визуализированные с помощью компьютерной программы GAUSSIAN модели конформеров олигомерных ПАС, способные играть роль ядер дендримерных ансамблей и участвовать в кронообразовании. Вязкость измерена на вискозиметре Brookfield DV2TRV

Простое сравнение изображений, визуализированных (рассчитанных квантово-химическим методом) моделей (рисунок 1) и микрофотографии дендримерного ансамбля ПАС, полученного с помощью ПЭМ (рисунок 2), позволяет сделать вывод о тождественности морфологической картины ПАС, полученной с помощью ПЭМ, с представлением об участии олигомерных отрезков в кронообразовании. Другими словами, формирование макромолекул ПАС начинается с образования ядра дендримера, на которое наращиваются по пространственно доступным ОН-группам другие дугообразные олигомерные отрезки, в результате чего образуются "макромолекулы-одуванчики", т.е. дендримеры, которые хорошо видны на ПЭМ снимках (рисунок 2).

Для получения образцов наполненных ПАС стадию III прерывают, чтобы образовались соразмерные и адекватные кроны дендримеров для введения в них наночастиц дисперсных наполнителей методом механохимического смешения с последующей ультразвуковой обработкой. Введение высокодисперсного порошка наполнителя осуществляли на высокоскоростной шаровой мельнице Emax фирмы Retsch. Так получают наполненные ПАС, содержащие разное количество наполнителей.

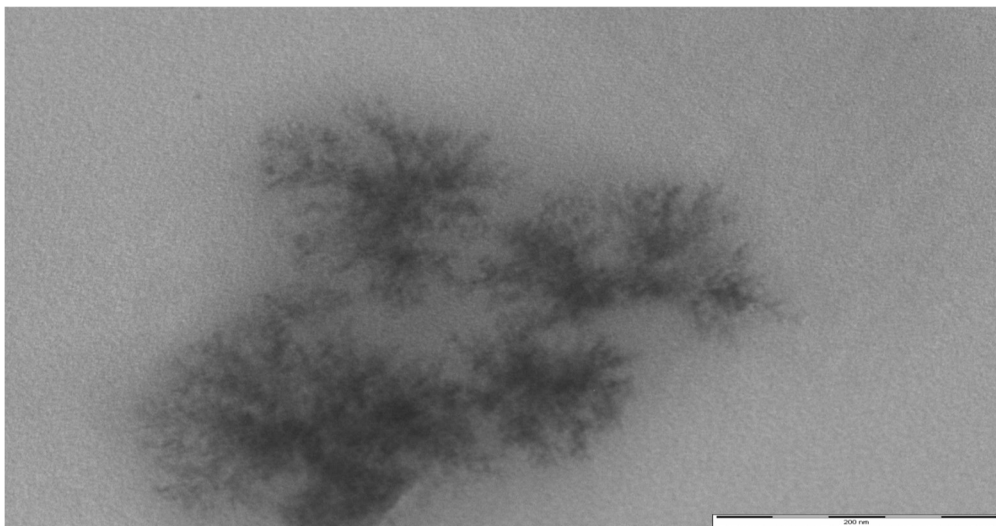


Рисунок 2 – ПЭМ снимок дендримеров макромолекулярных ансамблей ПАС и оксида алюминия (в правом верхнем углу). Микрофотография  $Al_2O_3$ , наночастицы которого размещаются в кронах дендримерных ансамблей

**Печать керамических слоев на алюминиевом основании посредством 3D аэрозольной печати.** Получение аэрозоли из дисперсных жидкостей является одной из важнейших задач, решаемых при разработке некоторых технологических процессов, а именно при 3D аэрозольной печати.

Процесс распыления может осуществляться различными методами, наиболее распространенными из которых являются гидравлический, механический, пневматический, электростатический.

Наиболее предпочтительным для нас методом по результатам исследований оказался пневматический метод, который позволяет работать с высоковязкими материалами, при этом не разрушая надмолекулярную структуру полимерного связующего.

Для получения пневматическим методом 3D аэрозольной печати керамических слоев (рисунок 3) и топологий на алюминиевых основаниях использовали синтезированный полиалюмосиликат наполненный высокодисперсным наполнителем и 3D принтер фирмы Neotech AMT марки Aerosol Jet 15EX.

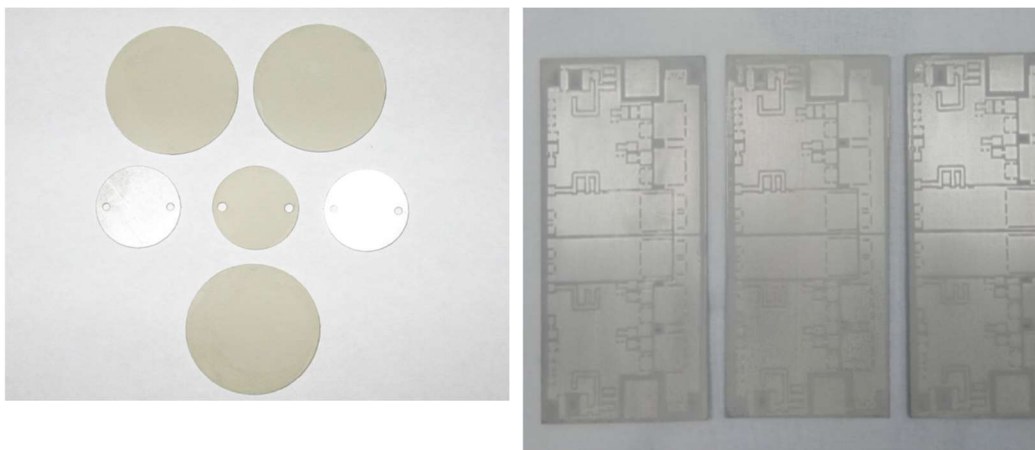


Рисунок 3 – Фотографии образцов металлических оснований с нанесенным посредством 3D-аэрозольной печати диэлектрических слоев

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-11018\18.

#### *Литература*

1. Семчиков Ю. Д. Дендримеры — новый класс полимеров / Ю. Д. Семчиков // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 12. – С. 45-51.
2. Шабанова Н.А. Химия и технология нанодисперсных систем / Н.А. Шабанова. – Москва: Академкнига, 2006. – 309 с.
3. Королев Г. В. Синтез, свойства и практическое применение гиперразветвленных полимеров / Г. В. Королев, М. Л. Бубнова // Высокомолекулярные соединения. – 2007. – Серия С. – Т. 49. – № 7. – С. 1357-1388.

#### *References*

1. Semchikov Yu. D. // Soros Educational Journal. – 1998. – No. 12. – P. 45-51.
2. Shabanova N.A. Khimiya i tekhnologiya nanodispersnykh system. – Moscow: Akademkniga, 2006. – 309 p.
3. Korolev G.V., Bubnova M.L. // Polymer Science. – 2007. – Series C. – V. 49. – No. 7. – P. 1357-1388.

УДК 541.6

### **ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ**

© А. Е. Аверина, М. И. Дасковский, С. Ю. Скрипачев, Е. В. Николаев  
 ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов –  
 государственный научный центр Российской Федерации» (ФГУП «ВИАМ»)  
 105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д.17  
 E-mail: viam@yandex.ru

*Показана возможность использования методов квантовой химии для подбора состава эпоксидного связующего полимерного композиционного материала. Предлагаемый в работе подход основан на конструировании молекулы в программе HyperChem и выпол-*

нении расчёта энергии системы с последующей оценкой вклада пространственной структуры в устойчивость полимера к внешним воздействиям. В работе использовали 4 отвердителя с различным химическим составом, структурой и свойствами: 1,4-бутилендиамин, м-фенилендиамин, янтарный ангидрид и фталевый ангидрид. Показано, что для расчёта структуры и устойчивости отверждённых эпоксидных связующих может быть использован полумпирический метод AM1. На основании проведённого анализа сделан вывод, что смола с отверждением фенилендиамином наиболее подвержена разрушению, а смола с отверждением фталевым ангидридом является наиболее устойчивой.

**Ключевые слова:** квантово-химические вычисления, эпоксидное связующее, полимерный композиционный материал.

#### APPLICATION OF QUANTUM-CHEMICAL CALCULATIONS TO ASSESS THE ENVIRONMENTAL RESISTANCE OF AN EPOXY MATRIX OF A POLYMER COMPOSITE MATERIAL

A. E. Averina, M. I. Daskovskiy, S. Y. Skripachov, E. V. Nikolaev  
FSUE «All-russian scientific research institute of aviation materials –  
state research center of the Russian Federation»  
105005, Russia, Moscow, 17 Radio St.  
E-mail: viam@yandex.ru

*The applicability of quantum-chemical methods to select the composition of an epoxy binder of a polymer composite material is shown. The proposed approach is based on the construction of a molecule in the HyperChem program and the calculation of the energy of the system with the subsequent assessment of the contribution of the spatial structure to the environmental resistance of polymers. Four types of hardeners with different chemical composition, structure and properties were used, namely 1,4-butylenediamine, m-phenylenediamine, succinic anhydride, and phthalic anhydride. It was shown that structural parameters and thermodynamic stability of cured epoxy resins can be evaluated by means of AM1 semi-empirical method. Based on the analysis, it was concluded that the resin cured with phenylenediamine was most susceptible to destruction, while the resin cured with phthalic anhydride possessed the highest environmental resistance.*

**Keywords:** quantum-chemical calculations, epoxy binder, polymer composite material.

Разработка принципов создания материалов, которые при длительной эксплуатации оказывали бы минимальное воздействие на экосистему, сохраняя при этом уровень служебных характеристик, является фундаментальной задачей. Одним из возможных путей решения данной задачи является использование методов молекулярного дизайна. Решающую роль здесь играет поиск оптимальной структуры материала с точки зрения минимизации вредного воздействия на окружающую среду. В настоящее время одними из наиболее перспективных материалов являются полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые широко применяются в высокотехнологичных отраслях промышленности. Поиск оптимальной структуры ПКМ предполагает, прежде всего, оптимизацию состава связующего.

Наибольшее применение при производстве ПКМ получили термореактивные связующие, благодаря высокой ударной вязкости, высокой радиационной и химической стойкости, хорошим адгезионным свойствам. Отличительной особенностью всех термореактивных связующих является образование сетчатой структуры в момент отверждения. Вопрос о связи свойств таких полимеров с их



структурой является одной из наиболее сложных проблем, так как до сих пор не разработаны адекватные методы описания структуры трехмерных полимеров. Среди терморезистивных связующих выделяются эпоксидные смолы, поскольку ПКМ на их основе обладают высокими механическими свойствами. Свойства сетчатых эпоксидных полимеров зависят не только от химического строения, но и от пространственного расположения цепей. Перспективным подходом для установления взаимосвязи между структурой и свойствами эпоксидных связующих является компьютерное моделирование с использованием полноатомных моделей. Изменение химической структуры на атомарном уровне эпоксидных матриц можно учесть, используя методы атомистической молекулярной динамики, в которых каждый атом описывается явным образом. Такое моделирование даёт возможность не только оценить зависимость макроскопических параметров (плотность, температура стеклования и т.д.) от химической структуры, но и исследовать особенности строения и поведение фрагментов полимерных цепей эпоксидных матриц. Применение методов компьютерного моделирования открывает возможность комплексного исследования физических свойств эпоксидных матриц при виртуальном дизайне новых материалов на их основе, предваряющего дорогостоящий синтез и долгие экспериментальные исследования.

В настоящей работе осуществляли моделирование структуры связующего на основе эпоксидно-диановой смолы с различными отвердителями. Выбор эпоксидно-диановых смол связан с тем, что в их молекулах присутствуют функциональные группы двух типов – гидроксильные и эпоксидные. Соответственно, в качестве отвердителей для эпоксидов могут выступать соединения различных классов. Кроме того, имеется возможность варьировать условия отверждения. Работу проводили в четыре этапа: 1) подбор отвердителей; 2) выбор метода расчёта; 3) расчёт значений параметров структуры отверждённой эпоксидно-диановой смолы; 4) расчёт термодинамических параметров системы «эпоксидно-диановая смола – отвердитель».

В качестве отвердителей были выбраны 4 соединения с различным химическим составом, структурой и свойствами: 1,4-бутилендиамин, м-фенилендиамин, янтарный ангидрид и фталевый ангидрид. Такой выбор позволяет наглядно продемонстрировать отличительные особенности влияния амино-групп, кислорода и бензольных колец на строение, устойчивость и свойства материалов.

Для выбора метода расчёта использовали молекулы отвердителей, так как они обладают анизотропией в распределении парциальных зарядов как носители функциональных групп. Для расчётов использовался димер предполагаемой структуры, поскольку показано, что такой фрагмент позволяет обеспечить адекватную точность вычислений (для бутилендиамина дополнительно был рассчитан более длинный фрагмент цепи; сравнение показало незначительные отклонения в результатах расчётов). Такой подход также применялся в работе [1].

В таблице 1 приведены значения дипольного момента для выбранных отвердителей, рассчитанные с использованием различных методов.

Как видно из таблицы 1, результаты, полученные методом DFT и полуэмпирическим методом AM1, коррелируют между собой и согласуются с литературными данными. Таким образом, для решения поставленных задач возможно использование полуэмпирического метода AM1, его корректность также подтверждается в работе [2]. Расчёты выполнены с помощью пакетов программ TurboMoleX (Cosmologic inc.) и HyperChem (HyperCube inc.)

Таблица 1 – Значения дипольного момента для четырёх выбранных отвердителей

	дипольный момент, D			
	Литературные данные	6-31G* (B3LYP)	6-31G** (B3LYP)	AM1
1,4-бутилендиамин	1,94	2,33	2,22	2,04
м-фенилендиамин	2,03	2,47	2,42	2,23
янтарный ангидрид	4,6	4,44	4,50	4,41
фталевый ангидрид	5,3	5,73	5,71	5,83

В таблицах 2 и 3 соответственно представлены фрагменты расчёта значений парциальных зарядов и длины связей для структур эпоксидно-диановой смолы, отверждённой с использованием четырёх выбранных отвердителей.

Таблица 2 – Фрагмент расчёта значений парциальных зарядов для системы «эпоксидно-диановая смола — отвердитель»

янтарный ангидрид		фталевый ангидрид		1,4-бутилендиамин		м-фенилендиамин	
c1	-0,079	c1	-0,064	c1	-0,097	c1	-0,087
c2	-0,096	c2	-0,074	c2	-0,081	c2	-0,062
o1	-0,259	O1	-0,264	o1	-0,257	o1	-0,243
c3	-0,014	c3	-0,01	c3	-0,017	c3	-0,014
o2	-0,214	O2	-0,023	o2	-0,205	o2	-0,205
...	...	...	...	...	...	...	...
c45	-0,079	o	-0,214	o7	-0,338	c45	-0,184
c46	0,096	c47	-0,015	n3	-0,405	c46	-0,105
o	-0,259	c48	-0,08			o7	-0,243
		c49	-0,096			n3	-0,37
		o	-0,258				

Таблица 3 – Фрагмент расчёта длины связей для системы «эпоксидно-диановая смола – отвердитель»

янтарный ангидрид		фталевый ангидрид		1,4-бутилендиамин		м-фенилендиамин	
c1-c2	1,48	c1c2	1,48	c1-c2	1,4	A	
c1o1	1,43	c1o	1,43	c1-o1	1,43	c1-c2	1,48
c2o1	1,43	c2o	1,43	c2-o1	1,43	c1-o1	1,43
c2c3	1,5	c2c3	1,5	c2-c3	1,5	c2-o1	1,43
c3o2	1,42	c3o2	1,43	c3o2	1,43	c2-c3	1,5
o2benz1	1,38	o2benz1	1,39	o2c4	1,38	c3o2	1,42
...	...	...	...	...	...	...	...
c20o	1,44	c21o	1,43	c25o6	1,42		
c21o	1,44	c2o	1,43				

На рисунке 1 приведена смоделированная в программе HyperChem (метод AM1) структура эпоксидной-диановой смолы, отверждённой м-фенилендиамином.

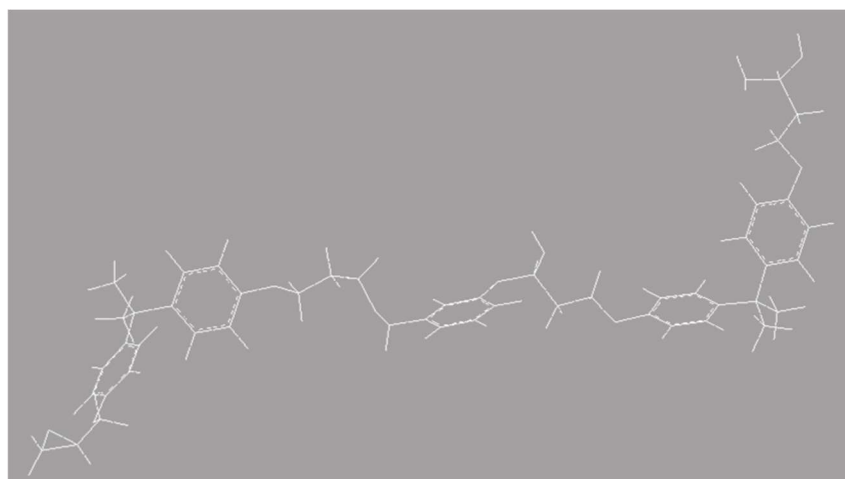


Рисунок 1 – Смоделированная в программе HyperChem структура отверждённой эпоксидно-диановой смолы (отвердитель — м-фенилендиамин)

Таблица 4 – Термодинамические параметры системы «эпоксидно-диановая смола – отвердитель»

	Н <sub>0</sub> , кДж/моль	Е <sub>а</sub> , кДж/моль	Е <sub>ТАК</sub> , кДж/моль	Е <sub>аэ</sub> , кДж/моль
1,4-бутилендиамин	-23,22	5428	10897	-86,526
м-фенилендиамин	-26,18	5425	10896	-80,256
янтарный ангидрид	-11,33	5440	10900	-226,347
фталевый ангидрид	-8,78	5443	10901	-258,115

### Заключение

В настоящей работе с помощью компьютерного моделирования проведена оценка некоторых факторов, влияющих на устойчивость отверждённых эпоксидных смол, использующихся в качестве связующего в полимерных композиционных материалах, к внешним воздействиям.

Показано, что полуэмпирический метод AM1 может быть успешно применён для расчёта структуры и термодинамической устойчивости связующего на основе отверждённой эпоксидно-диановой смолы.

На основе рассчитанных термодинамических параметров системы «эпоксидно-диановая смола – отвердитель» сделан вывод о том, что смола с отверждением фенилендиамином наиболее подвержена разрушению, а смола с отверждением фталевым ангидридом является наиболее устойчивой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках выполнения проекта № 18-53-34006\18.

### Литература

1. Многомасштабное компьютерное моделирование полимерных нанокомпозитов на основе термопластов / С.В. Люлин [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2016. – Т. 58. – № 1. – С. 4–18.
2. Компьютерное моделирование теплостойких полиимидов ULTEM™ И EXTEM™ с использованием силовых полей GROMOS53A6 и AMBER99 / С.Г. Фалькович [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2014. – Т. 56. – № 4. – С. 478–488.

### References

1. Lyulin S.V., Larin S.V., Nazarychev V.M., Falkovich S.G., Kenny J.M. // Polymer Science. Series C. – 2016. – V. 58. – No. 1. – P. 4–18.
2. Falkovich S.G., Larin S.V., Nazarychev V.M., Volgin I.V., Gurtovenko A.A., Lyulin A.V., Lyulin S.V. // Polymer Science. Series A. – 2014. – V. 56. – No. 4. – P. 478–488.

УДК 669.25

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДИЦИНСКОГО СПЛАВА CoCrMo, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЛИТЬЯ И АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

© И. В. Ежов<sup>1</sup>, Н. В. Казанцева<sup>1,2</sup>, Д. И. Давыдов<sup>1</sup>, А. Г. Меркушев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН

620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина  
620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: ezhov@imp.uran.ru

*Были исследованы сплавы CoCrMo, изготовленные из российского порошка, соответствующего стандарту ASTM F75. Образцы, полученные методом электродуговой плавки, имеют плотность 99,1%, полученные селективным лазерным сплавлением (СЛС) – 99,7%. С помощью рентгеноструктурного анализа обнаружено двухфазное состояние (ГЦК и ГПУ). Проведен сравнительный анализ микроструктуры и механических свойств полученных сплавов в исходном (литом) состоянии и после релаксационного отжига. Обнаружено, что выбранный режим для релаксационного отжига позволяет снизить уровень дефектности и не влияет на фазовый состав исследованных образцов. Наблюдалась дендритная структура на снимках образцов сплава, полученном дуговой плавкой в атмосфере гелия, и СЛС сплава. С помощью сканирующего электронного микроскопа в литом образце были обнаружены крупные частицы, обогащенные молибденом.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, CoCrMo, микроструктура, фазовый состав, механические свойства.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF THE MEDICAL CoCrMo ALLOY MANUFACTURED BY ELECTRIC-ARC MELTING AND BY SLM

I. V. Ezhov<sup>1</sup>, N. V. Kazantsev<sup>1,2</sup>, D. I. Davydov<sup>1</sup>, A. G. Merkushev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences  
620108, Russia, Yekaterinburg, st. S. Kovalevskaya, 18

<sup>2</sup>Ural Federal University

620002, Russia, Yekaterinburg, Mira st., 19

E-mail: ezhov@imp.uran.ru

*CoCrMo alloys made from Russian powder corresponding to ASTM F75 were investigated. Samples obtained by electric arc melting have a density of 99.1%, manufactured by selective laser melting (SLM) – 99.7%. With the help of X-ray diffraction, a two-phase state (FCC and HCP) was detected. A comparative analysis of the microstructure and mechanical properties of the alloys obtained in the initial (cast) state and after relaxation annealing has been carried out. It was found that the chosen mode for relaxation annealing reduces the defect level and does not affect the phase composition of the studied samples. A dendritic structure was observed in the images of alloy samples obtained by arc melting in helium atmosphere and SLM alloy. Using a scanning electron microscope in a cast sample, large particles enriched in molybdenum were detected.*

**Keywords:** additive technology, CoCrMo, microstructure, phase composition, mechanical properties.

Сплавы CoCrMo несколько десятилетий успешно используются в медицине благодаря высоким биохимическим и химическим свойствам [1]. В последнее время основным направлением для этого сплава в медицине является стоматологическое применение, в качестве материала для изготовления зубных протезов. Его устойчивость к агрессивной среде ротовой полости, а также высокая прочность и износостойкость служит залогом хорошего качества и долговечности зубопротезных конструкций [2]. Быстрое развитие аддитивных технологий и их явное преимущество для медицинских целей, по сравнению с традиционными методами получения материалов, вызывает в настоящее время большой интерес у исследователей, поэтому целью данной работы является диагностический анализ микроструктуры медицинского сплава CoCrMo, полученного методом селективного лазерного сплавления и методом литья.

Для исследования был взят медицинский порошок CoCrMo, произведенный компанией «Полема» (Россия). Химический состав порошка по ТУ 14-22-265-2016, марка ПР-КХ28М6, близок к сплаву ASTM F1537, используемому для медицинских назначений (Таблица 1) [3].

Таблица 1 – Химический состав порошка CoCrMo (ТУ), масс%

Порошок	Состав, масс. %							
	Co	Cr	Mo	Si	Mn	Fe	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
CoCrMo, ТУ 14-22- 265-2016	66,6 4	26,8	5,3 5	0,31	0,27	0,25	0,029	0,14

Структура исходного порошка представлена на рисунке 1. Максимальный размер порошинок составил 50 мкм.

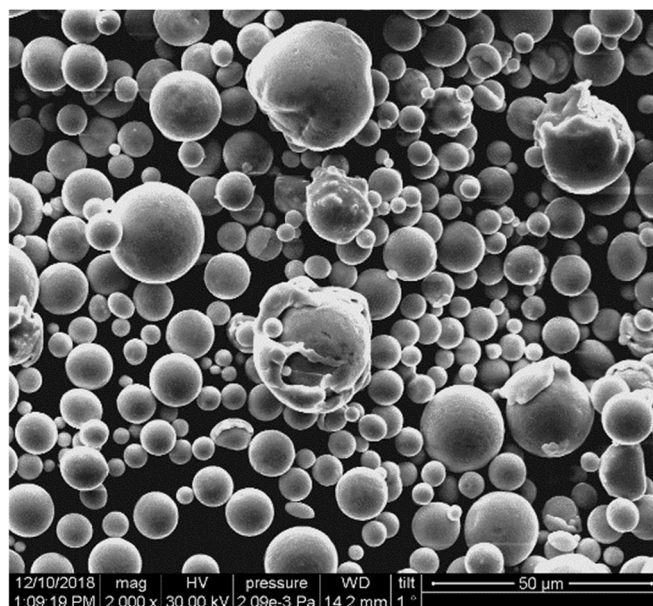
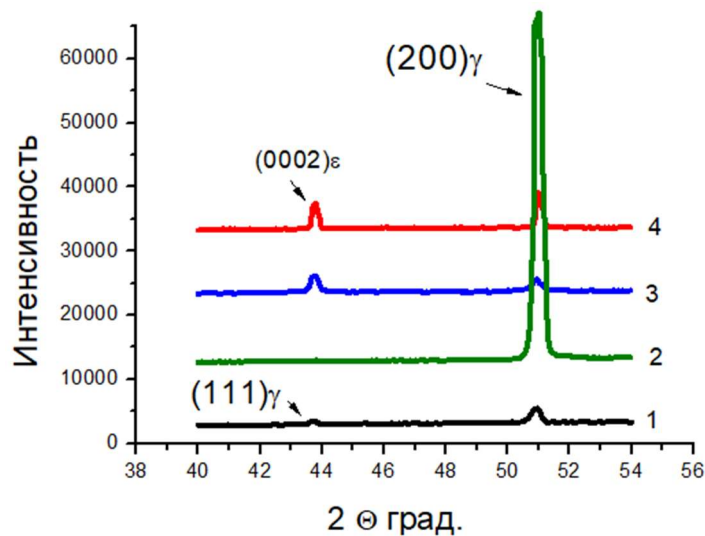


Рисунок 1 – Структура исходного CoCrMo порошка

Образцы размерами 2x10x10 мм были получены с помощью установки EOSINT M280 (EOS GmbH), оборудованной иттербиевым волоконным лазером, работающим на длине волны 1075 нм (IPG Photonics Corp.) в Региональном инжиниринговом центре, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Толщина порошкового слоя была 30 мкм, использовалась схема возвратно-поступательного сканирования в атмосфере азота с расстояниями между проходами лазера при сканировании 100 мкм, уровень кислорода в камере составил 0.07–0.12%. Мощность лазера и скорость сканирования составили 400 W и 2 м/с. Образцы из сплава CoCrMo были получены методом селективного лазерного плавления. Для сравнения из этого же порошка был выплавлен образец методом дуговой плавки в атмосфере гелия. Для снятия упругих напряжений в полученных образцах был проведен стандартный для образцов, полученных обычными способами литья, отжиг 1150°C-30 мин в вакууме.

Исследование структуры было выполнено в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН с помощью сканирующего электронного микроскопа QUANTA-200, оборудованного EDAX энерго-дисперсионным спектрометром для элементного анализа. Плотность полученных образцов определяли методом Архимеда.

На рисунке 2 представлены результаты рентгеноструктурного анализа исследованных образцов.

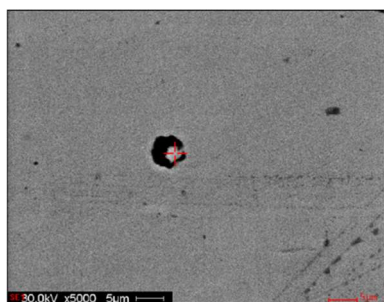


1-литой; 2- литой (отжиг); 3- СЛС; 4- СЛС (отжиг)  
Рисунок 2 – Дифрактограммы исследованных сплавов

Нами был выбран диапазон углов, в котором должны наблюдаться самые сильные линии ГЦК и ГПУ фаз. Как можно видеть из дифрактограммы, литой сплав является однофазным (ГЦК,  $\gamma$ -фаза) как в исходном состоянии, так и после отжига. СЛС сплав имеет двухфазное состояние: ГЦК  $\gamma$ -фаза и ГПУ  $\varepsilon$ -фаза, которое сохраняется после отжига.

При исследовании в сканирующем электронном микроскопе этого образца были обнаружены частицы, обогащенные молибденом, размер которых достигал 2 мкм (рисунок 3).

Присутствие тугоплавкого молибдена в составе исходного порошка в большинстве случаев приводит к формированию непроплавленных порошинок или пор в СЛС CoCrMo материале, которые служат концентраторами напряжений и провоцируют быстрое разрушение изделия [4].



Element	Wt%	At%
OK	00.79	02.87
SiK	00.85	01.76
MoL	15.15	09.17
CrK	31.62	25.30
MnK	00.72	00.76
FeK	00.79	00.82
CoK	50.08	49.32

Рисунок 3 – СЭМ изображение частицы, обогащенной молибденом в литом образце

Плотность СЛС CoCrMo сплава очень сильно зависит от параметров СЛС процесса. Измеренная плотность полученных образцов составила  $8,22 \text{ г/см}^3$  – для литого и  $8,26 \text{ г/см}^3$  – для СЛС. В сравнении с плотностью сплава ASTM F1537

(8,29 г/см<sup>3</sup>) [3] полученная плотность составляет 99, 15% для литого и 99,64% – для СЛС образца.

Дендритную структуру можно видеть на СЭМ-снимках сплава, полученного дуговой плавкой в атмосфере гелия, и методом селективного лазерного сплавления (рисунок 4).

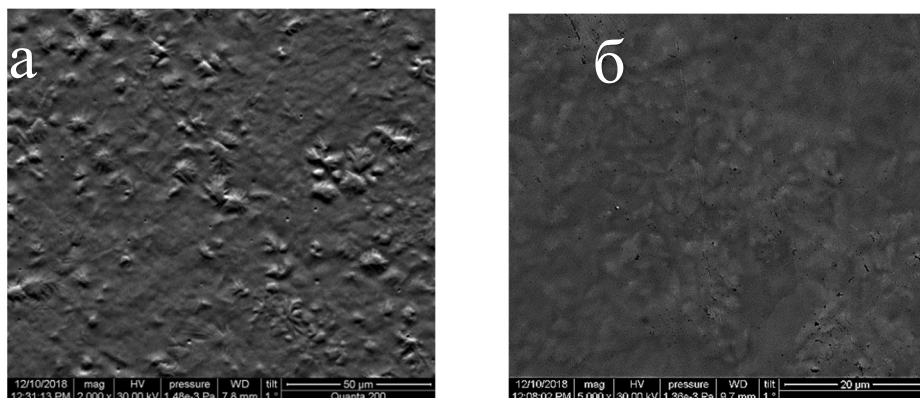


Рисунок 4 – Микроструктура исследованных образцов: а – литой (СЭМ); б – СЛС (СЭМ)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-03-000-84.

#### *Литература*

1. *Disegi J.A.* Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications / J.A. Disegi, R.L. Kennedy, R. Pilliar. – Virginia: ASTM STP 1365, 1999.
2. *Anusavice K.J.* Phillips' science of dental materials / K.J. Anusavice, C. Shen, H.R. Rawls. – Elsevier Health Sciences, 2013.
3. Phase characterization in as-cast F-75 Co–Cr–Mo–C alloy / R. Rosenthal [и др.] // Mater. Sci. – 2010. – С. 1-8.
4. *Dikova T.* Bending fracture of Co-Cr dental bridges, produced by additive technologies: experimental investigation / T. Dikova // Procedia Structural Integrity. – 2018. – Т. 13. – С. 461–468.

#### *References*

1. *Disegi J.A., Kennedy R.L., Pilliar R.* Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications. – Virginia: ASTM STP 1365, 1999.
2. *Anusavice K.J., Shen C. and Rawls H.R.* Phillips' science of dental materials. – Elsevier Health Sciences, 2013.
3. *Rosenthal R., Cardoso B. R., Bott I. S., Paranhos R. P. R., Carvalho E. A.* Phase characterization in as-cast F-75 Co–Cr–Mo–C alloy // Mater. Sci. – 2010. – P. 1-8.
4. *Dikova T.* // Procedia Structural Integrity. – 2018. – V.13. – P. 461–468.

УДК 677.017

## STUDY ON THE BENDING PROPERTY OF SHIRT SLEEVE SLITS

© Gu Yi-Chuang<sup>1,2</sup>, Mei Shun-Qi<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup>Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan 430073, China

<sup>2</sup>Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

E-mail: <sup>a</sup>armeishunqi@vip.sina.com, <sup>a</sup>2417751696@qq.com



*Among the various parts of men's shirts, sleeve slits are an indispensable part with practical functions and decorative features, and their structure and technological form are important standards to measure the quality of shirts. But the bending property of shirt fabric is an important factor affecting the effect of shirt sleeve slits. In order to achieve the best folding and ironing effect of shirt sleeve slits, the bending properties of the fabric should be studied first. In this paper, the bending stiffness, folding Angle and bending force of shirt are studied. The greater the bending stiffness, the stronger the fabric firmness, the less deformation.*

**Keywords:** shirt sleeve vents; bending property; bending stiffness; fold recovery angle; bending restoring force.

## **Introduction**

With the improvement of people's life quality, people have higher and higher requirements on clothing. As a necessity of People's Daily life, shirt is a kind of clothing favored by consumers. People's demand for shirts is not only limited to wear performance, but also to the aesthetic sense of the shirt is also increasingly important, the market has a variety of styles, fashionable shirt products. Shirt belongs to the traditional classic clothing, men's shirt attention to details and grasp is particularly important. Sleeve slits are an important component of men's shirts, and their structure and technological form determine the quality and style of shirts [1]. With the development of science and technology, automation device has been used in all aspects of industry, but in the process of making sleeve slits, it faces many problems. For example, the production of sleeve slits has a low degree of automation and a large labor operation cost. Even though some enterprises put in use of the folding mechanism, it can only be applied to the folding of a single type of cloth and cannot be widely applied to the folding of cloth of different materials and thickness, which increases the production cost. In order to develop a folding mechanism suitable for different fabrics, it is urgent to study the bending properties of different fabrics. In this paper, the bending property of shirt fabric is further studied on the basis of the study of shirt sleeve fabric.

The bending property of the fabric has a great influence on the appearance of the garment, the machinability of the garment and the comfort of the garment. The bending property of fabric is an important mechanical property index for evaluating the style of fabric. The bending property of fabric is related to the bending property of fiber, the structure of yarn and fabric and post-finishing, etc. And the relationship between them is very complex [2]. The methods used to study the bending properties of fabrics are analytical method, numerical method and rheological method. At present, the evaluation method of fabric folding and ironing effect is mainly subjective. The subjective evaluation method mainly evaluates the appearance of durable pressing products. As it is a subjective evaluation, human factors, such as the observation proficiency of rating personnel, make the test results easy to produce bias, affecting the final results [3]. In this paper, the bending properties of different shirt fabrics are studied from the three aspects of bending stiffness, folding angle and bending restoring force, and the best folding effect of shirt sleeve fabric is found in order to better choose the fabric and achieve the best folding and ironing effect.

## **Bending rigidity of fabric**

Researchers at home and abroad are committed to making objective evaluation standards for the bending properties of fabrics, put forward many testing schemes and formed many bending theories, such as inclined plane method, heart method, gray method, cantilever method, pure bending method and saddle method. The inclined

plane method mainly uses the mechanical model of cantilever beam to measure the bending length and calculate the bending stiffness, which has become the standard test method in various countries. The selection of experimental materials follows the principle of combining commonness, diversity and representativeness. According to the different thickness of fabrics and the different structure and organization, different groups of common cotton fabric, silk fabric and wool fabric are selected to be numbered respectively. Select fabric basic parameters are shown in table 1 (fabric density units: g/m<sup>2</sup>).

Table 1 – Basic parameters of each fabric

	Cotton	Cotton	Polyester	Polyester	silk	silk	Wool fabric	Wool fabric
Surface density	55.7	156.0	66.1	122.4	43.1	79.3	153.0	205.5
Tissue	Plain	Twill	Plain	Satin	Plain	Satin	Plain	Satin

According to GB /T 18318 – 2001 "determination of the bending length of textile fabrics", the bending length of the sample in the standard atmospheric environment was tested by YG(B) 022D automatic fabric stiffening apparatus. The calculation method of bending stiffness can be expressed as follows [4]:

$$B = W \cdot C^3 \cdot 9,807 \cdot 10^{-6}$$

In the formula,  $B$  is bending stiffness, the unit is N·m;  $W$  is the fabric surface density, the unit is g/m<sup>2</sup>;  $C$  is bending length in mm.

After many times of measurement and comparison, the conclusion is drawn: the fabric with the same material, the greater the surface density, the greater the bending stiffness of the fabric, the less easy to fold and ironing; The same material fabrics, twill than plain when the bending stiffness; The same material fabrics, twill than plain when the bending stiffness; As a whole, the bending stiffness of mulberry silk is less than that of wool and less than that of the surface. According to the above results, the folding and ironing scheme can be appropriately adjusted when the sleeve vents of different materials are folded and ironed, so as to achieve the best folding and ironing effect.

#### **Fabric folding recovery angle**

The crease recovery Angle of the fabric is mainly used to judge the good or bad resilience of the fabric, and to test the anti-crease seam of the fabric [5]. But in the opposite direction, it can also be used to judge the quality of fabric folding and ironing effect. The drape rebound Angle of fabric is bigger, the flexibility of cloth is better, go against fold iron. There are two existing testing standards for fabric crease recovery in China, one is GB/T 3819-1997 "determination of crease recovery Angle method for textile fabric", which is an objective testing method, the other is GB/T 29257-2012 "appearance evaluation method for textile fabric crease recovery", which is a subjective evaluation method. GB/T 3819 – 1997 is to keep the specimen folded along the warp (longitudinal) and weft (transverse) direction for a certain time, remove the load and recover for a certain time, measure the crease recovery Angle, and use the measured Angle to express the fabric fold recovery performance. The larger the rebound Angle of the crease, the better the crease resistance. GB/T 29257 – 2012 is to apply a certain load to the torsion sample at a certain Angle of three-dimensional torsion, so that it will produce wrinkles. The load will be removed and restored for a certain time, and then the degree of appearance wrinkling will be evaluated. Series is higher, fold is

less, fight fold performance is better. Method 1 is more commonly used. In this paper, GB/T 3819-1997 "determination of crease recovery Angle of textile fabric" was used to identify the recovery Angle of fabric folds [6]. In order to obtain a comprehensive result, several pieces of different fabrics with different thicknesses were selected, each material as shown in table 1 above, respectively to test the warp and weft bending performance and the warp and weft dry crease recovery Angle (DCRA) of these fabrics. First sample cut into "product" glyph, in order to the stability of the sample testing and representative, will be folded fabric according to the regulation, reply to wing sample size to 40 mm x 30 mm, and fixed on the wood, will reply wings folded, pressure on the regulation of the weight of a heavy hammer, after a certain time after the removal of load, unload load is measured with a protractor measuring sample reply wing back Angle, 5 min after the crease recovery Angle, record the heavy hammer weight and loading time. The elastic recovery Angle of longitude and latitude was measured for 10 times respectively, and the average value of each direction was taken.

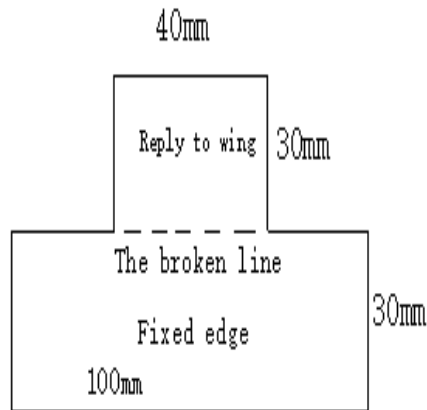


Figure 1 – Sample cutting shape model

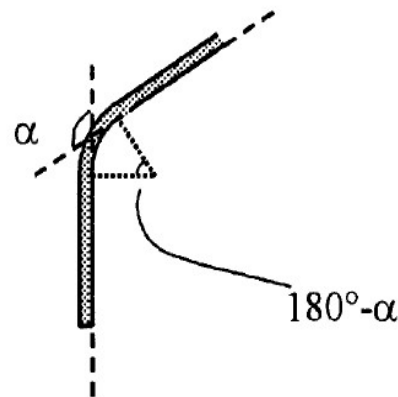


Figure 2 – Fabric bending recovery angle

SAS is a famous data analysis software system in the world, and it is the first choice for data management and statistical analysis at home and abroad. We used the SAS system to conduct statistical regression by taking the warp and weft direction, bending property B and 2HB of the fabric as independent variables and its slow elastic wrinkle recovery Angle as dependent variables. Through analysis and calculation, the regression equation of three independent variables is obtained [7]:

$$Y = 104,16293 - 10,35455 \cdot X_1 + 158,27376 \cdot X_2 - 235,39270 \cdot X_3 ,$$

$Y$  is the dry wrinkle recovery Angle of slow elasticity;

$X_1$  is the longitude and latitude density;

$X_2$  is the bending stiffness B;

$X_3$  is the bending hysteresis moment 2HB.

According to the experimental observation results, by establishing a regression model with bending stiffness B and bending lag moment 2HB as independent variables and slow elastic wrinkle recovery Angle as dependent variables, it is concluded that there is a great correlation between them. The larger the bending stiffness is, the larger the crease recovery Angle of the fabric will be.

### The fabric bends to restore force

In the process of wearing and storage, the fabric is deformed due to external forces such as folding, compression and washing. Even after the external forces are removed, it is difficult to restore to the original flat state, which is called crease [8]. Although drape is an insurmountable problem in the appearance of clothes, it can be used in the production of sleeve slits. How to maintain drape, how much force to use and how long to achieve the best folding and ironing effect under negative pressure are also problems to be solved urgently. Many scholars have done a lot of research on the wrinkle problem, but most of the literatures focus on the theoretical analysis and discussion of anti-crease finishing and fold characterization of fabrics. When the fabric creases, the external force is much greater than the bending force, and the process of creasing and deformation also changes with time. Research make fabric drape and fabric bending force of bending force, both to test and to improve the fabric drape performance, better use of principle of fold, better wrinkle fabric production, and can give the fabric folded iron to provide theoretical basis for support, how to control the size of the force and effect time, achieve the best folding hot effect, make the fabric external appearance more beautiful. The parameters of the structure and bending performance of polyester fabric and wool fabric are shown in table 2. The experimental tools include weights of different weights, timers, protractor, force measuring devices, etc. In order to control the independent variables and reduce the influence of other dependent variables, the experimental environment is the condition of constant temperature and humidity.

Table 2 – Parameters of sample structure and bending performance

Sample	organization	The linear density (tex)	The density (article $(10\text{cm})^{-1}$ ) *		The surface density ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	The thickness (mm)	The bending stiffness $B / \text{cN} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$	
			radial	zonal			radial	zonal
Polyester	plain	26	224	193	161	0.0329	10.81	8.05
Wool fabric	plain	34	320	248	238	0.0618	16.58	13.53

Reference fabric crease performance test method standard of vertical method to test, in order to sample testing of stability and a representative sample, the sample reply wing is 40 mm x 30 mm size, and fixed on the block, the shape of the sample for the "product" word, will reply wings folded, pressure on the regulation of the weight of a heavy hammer, after a certain time after the removal of load, the chock with sample according to the rules set direction quickly in good homemade load device, sensor fabric from 3 mm, measuring the initial wrinkle recovery force from the fold. Under the condition of keeping the load action time constant, change the size of the load, measure for many times, and observe the size of the experimental restoring force; In addition, the size of the load is maintained, and the duration of the variable action time is measured again to measure the drape recovery force of the sleeve slits of different materials, so as to better understand the influence factors and effect of the recovery force.

The results are shown in figure 3:

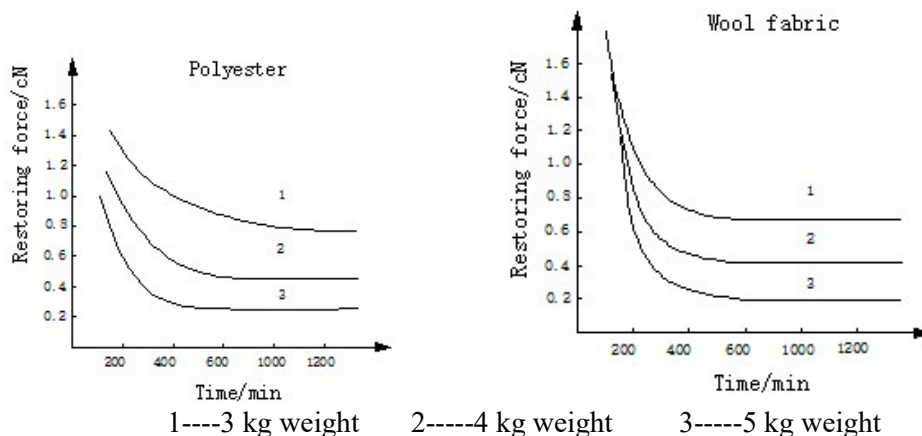


Figure 3 – Relationship between recovery force and negative pressure and negative pressure time of different fabrics.

Observation and statistics of the final experimental results show that the pressure time will directly affect the wrinkle recovery force. For the same kind of fabric, the longer the pressing time is, the smaller the crease recovery force will be, and with the increase of time, the crease recovery force will start to decline rapidly and become gentle after a certain time. The different time of hammering will directly affect the size of the recovery Angle of slow elastic wrinkle, For the same kind of fabric, the longer the pressing time is, the smaller the crease recovery Angle will be. And with the increase of time, the crease recovery Angle of the fabric with slow elasticity starts to decrease rapidly and becomes gentle after a certain time. Different fabrics under the same negative pressure and negative pressure time, the size of the recovery force is not the same.

### Conclusion

Folding and ironing play an important role in the production of clothing. The folding and ironing of shirt sleeve slits is the process of making the cloth from one steady state to another steady state [9]. The quality of the folding and ironing effect directly affects the quality of the shirt. Therefore, it is very important to study the bending performance of shirt sleeve slits. The bending stiffness of the fabric, the bending Angle of the sleeve slits and the bending restoring force of the sleeve slits studied in this paper reflect the bending performance of the fabric from different aspects, which makes the bending performance of the fabric more intuitive, and provides a strong basis for how to judge and achieve the best folding and ironing effect. The smaller the folding ironing recovery Angle, the smaller the recovery of the ironing effect is better. In this paper, the differences in the three forms of expression under different cloth with different negative pressure and different time are studied. There are also many influencing factors related to the folding and ironing effect, such as temperature, humidity, etc. In the follow-up study, the influence effect of various factors will be improved to show the best folding and ironing effect more accurately.

### References

1. Yumei X. // Journal of textile. – 2008. – No. 39 (10). – P. 110-114.
2. Han L., Dexin H. // Liaoning silk. – 2015. – No. 03. – P. 18-19.

3. Yongshu M., Jibo W. // Value engineering. – 2008. – No. 37 (32). – P. 169-170.
4. Qiaoying W., Ying H., Chunsheng W., Shihui L. // Journal of textile. – 2015. – No. 36 (07). – P. 126-130.
5. Fengjun S., Jinlian H. // Journal of textile. – 2005. – No. 03. – P. 15-18.
6. Haonan C. // Wool technology. – 2019. – No. 47(02). – P. 74-79.
7. Xiaorui T. // Quality and technical supervision research. – 2009. – No. 06. – P. 25-27+12.
8. Yan W., Kan L., Runjun S., Meiyu C. // Wool spinning technology. – 2007. – No. 01. – P. 54-57.
9. Jun L., Wenlin L. // Light industry standard and quality. – 2014. – No. 01. – P. 53-55.

УДК 54

### STUDY ON PHYSICAL PROPERTIES OF DISPERSED SILICA

© E. Tserenjav<sup>1</sup>, V. Jigmeddorj<sup>1</sup>, B.D. Lygdenov<sup>2</sup>, P. Shavrai<sup>1</sup>, N. Munhkbatt<sup>1</sup>,  
G. Omoontsoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National University of Mongolia

Ikh Surguuliin gudamj-1, Baga toiruu, Sukhbaatar district, Ulaanbaatar, 14201, Mongolia

<sup>2</sup>East Siberia State University of Technology and Management

670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya St., 40v

<sup>3</sup>Mongolian University of Science and Technology

8th khoroo, Baga toiruu 34, Sukhbaatar district, Ulaanbaatar, 14191, Mongolia

E-mail: erdenebatt@seas.num.edu.mn

*In this paper physical properties as distribution width ( $Q_x$ , %) and density ( $q_x$ , %) of colloidal silica dispersed system were defined photon cross correlation spectroscopy (PCCS) at average size as 17.06 nm for  $D_{50}$ , % and area of specific surface as 349.96 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> depending on molar ( $R_{m2}$ ) optimal ratio of silica stone mineral to alkali ash powder. By X-ray diffraction analysis was determined its change of crystal structure to amorphous state. The results of their kinematic viscosity, liquid density, UV light adsorption inspections show that possibility to produce that colloidal silica by using the wetting and ultrasonic vibration method for that fusible alloy.*

**Keywords:** colloidal silica, sodium ash, fusion, dispersion system, nanoparticles.

#### Introduction

Silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) nanoparticles aqueous dispersion is used in broad range of environmental friendly performance products as large variety of industries for biomedicine, food and beverages field. Within this study to produce this dispersed silica particles by the direct fusion of precisely determined ratios of soda ash (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) and natural silica stone in electric muffle furnace at approx. 1100 °C and then it isn't well dispersed typically after wetting [1]–[3].

But for most silica applications especially when being used in coatings to improve scratch resistance, the silica particles need to be smaller than 40 nm to fulfill this requirement and that particle agglomeration hinders each individual silica particle to interact with the surrounding media. So the stability and agglomeration state of this aqueous dispersion nanofluids are key parameters for their use [4]–[6].

Ultrasonic processing has been used in this experiment to get more effective colloid

size, stable and non-agglomerated dispersion system. The dispersed silica colloid particles were measured by using photon cross correlation spectrometer. The minimal particle size was reduced to 17.06 nanometers at  $D_{50}$ , % of the test. The area of specific surface ( $S_v$ ) for  $R_m$  2 as molar optimal ratio of 2 for silica to sodium oxide weight was obtained  $349.9 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ .

#### Experimental. Material and method

Dispersed silica nanoparticles were prepared by melting process of mixes by certain ratio of grinded powder of local silica stone from Tuv province, Sereglen soum which is located at  $47^\circ 65' 03.72'' \text{N}$ ,  $107^\circ 25' 22.47'' \text{E}$  area with utilization license N.21101 and sodium oxide as from sodium ash, CAS 497-19-8, Sigma Aldrich,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . The physics chemical properties were designed as shown at tables 1 and 2 according to molecule ratio of acid to alkali as silica to sodium oxide weight.

Table 1 – Molar mixing designed ratio ( $R_m$ ) of silica to sodium ash & oxide

Sample No.	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$R_m = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$
1	10.1	8.1	3.4	3.0
2	10.1	12.2	5.1	2.0
3	6.0	14.5	6.0	1.0

Dispersed silica sols as yield content, density and formula for nanofluids etc. were prepared under their molar ratio ( $R_m$ ) of the weight as shown in table 2.

Table 2 – Physics chemical characterization for obtained dispersed silica materials from  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

$R_m$	Yield (%)	Density (kg/l)	Formula
3.0 – 3.2	25 – 40	1.26 – 1.45	$\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ( $3.0 < x < 3.2$ )
2.0 – 2.6	35 – 46	1.38 – 1.53	$\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ( $2.0 < x < 2.6$ )
1.0 – 1.6	35 – 55	1.38 – 1.70	$\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ( $1.0 < x < 1.6$ )

Chemical composition of the silica stone used in the experiment was shown at the table 3 by comparing to test results of certified reference material (CRM.N40 testing) and its certified data of CRM.N40 at certificate. Mineral composition of the silica stone was studied by powder X-Ray Diffraction Analysis (XRDA) with an equipment as Siemens, Diffractometer D5000 and results described at figure 1.

The dispersed colloidal silica was prepared by following steps [7]: as mixing initial components and fusing them to temperature influence as approx.  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  and wetting by distilled water to transform into liquid state. The cleaning and non-agglomeration and was done by centrifugal and ultrasonic method [8] with an equipment as 800D Centrifuge at 2000-2500 rpm speed and SK – 120DTH Ultrasonic with 900 watt capacity for 15 min each sample. Value of pH for synthesized sol were defined by laboratory pH-meter PH5011. Liquid density of colloidal silica was determined by aerometric method as described at GOST18481-81 [9] and kinematic viscosity done by viscosimeter as described at GOST 10028-81 [10]. Absorbivity of UV light for the dispersed nanoparticles in distilled water was determined by spectroscopic method using Shimadzu, UV-Vis Recording Spectrophotometer, UV-2401PC, the size, the value of

average suspended sol, and the width of particle size distributions etc were defined by photon cross correlation spectroscopic (PCCS) method using Shimadzu, STMPA Nanophox as described at MNS:ISO 13321:2014 standard [11]. This equipment determines the particle size from few nanometers to value of 10mkm at the initial step of precipitation. Test results were calculated by using WINDOX 5 program.

### Results and discussion

The chemical composition of silica stone which was used in this study shown at the table 3. X-ray diffraction analysis was performed for both untreated silica stone (figure 1) and the dispersed silica, which were treated by different ratio for sodium ash at 1100 °C for 1 h (figure 2).

Table 3 – Chemical composition of the silicestone

Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>tot</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Silicestone	98.56	0.15	<0.005	1.13	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.012	<0.005	0.28
CRM.N40test	87.98	6.15	0.057	0.27	0.08	0.16	0.04	4.51	0.008	0.076	0.57
CRM.N40cert	88.20	6.18	0.058	0.261	0.11	0.15	-	4.23	-	0.077	-

Measurement of all these properties provides information about the colloidal state of nanofluids. Here the most important variable was the solid content. X-ray diffraction intensive peaks at figure 1 as corresponding to quartz crystal of silica were disappeared and decreased their reflection intensity at figure 2 because of that dispersed from the surface of colloidal amorphous silica phase at x-ray pattern with sodium carbonate phase after drying this low melting alloy at elevated temperature by distilled water (see figure 2).

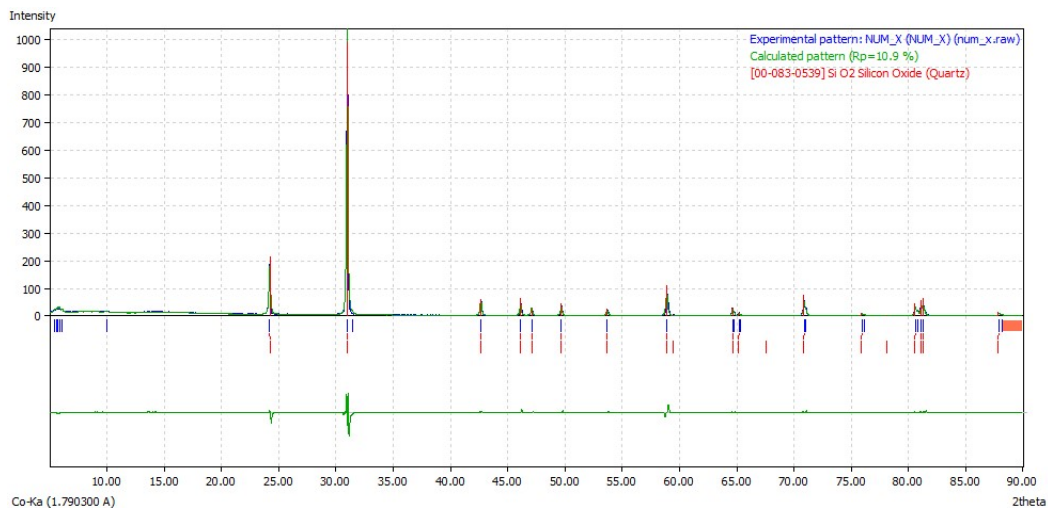
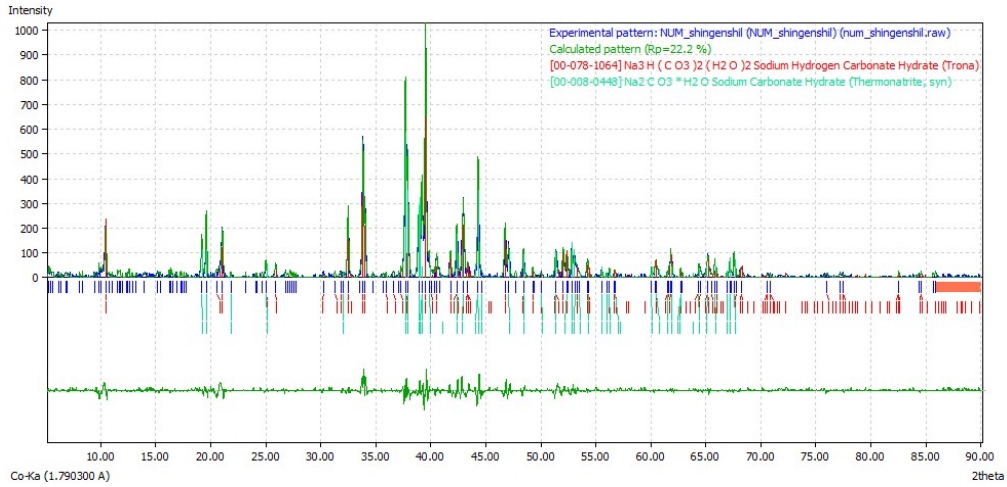


Figure 1 – X-ray powder pattern of the silica stone

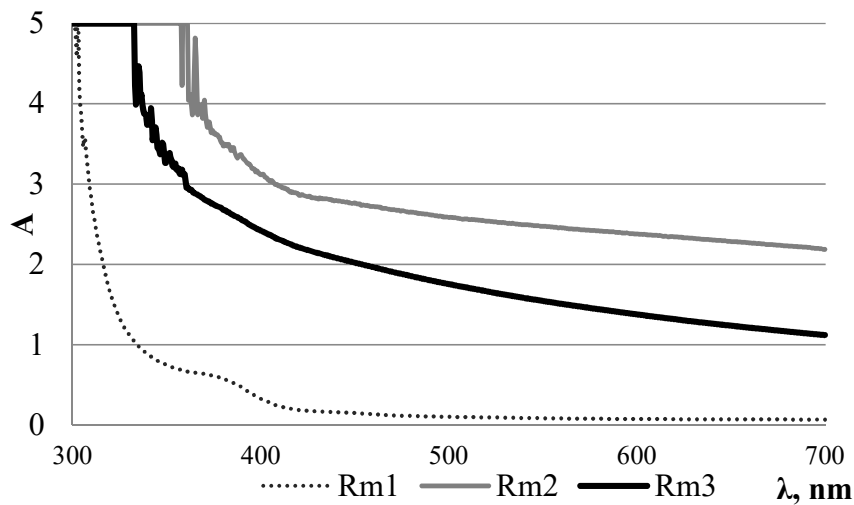




By X-ray diffraction analysis the crystal structure of quartz crystal was disappeared at  $2\theta = 31.8^\circ$  and that confirmed its complete transition to amorphous state for this pyro chemically prepared colloidal silica particles. Behind it, pH value of the medium can be used as important factor for the stability of system to control it and as a driving force in electric chemistry [12]. So, value of pH and density ( $\rho$ , g/ml), kinematic viscosity ( $\mu$ ), absorbed spectroscopy investigations for UV light on synthesized each colloidal silica samples were measured and shown at table 4 and figure 3.

Table 4 – Study on molar ratio dependence of pH, density, viscosity and  $UV_{abs}$  for colloidal nanofluids

$R_m$	pH	$\rho$ , g/ml	$\mu$ , Pa·s	$UV_{abs}$ nm
1	13.53	1.08	226.62	303
2	12.94	1.09	307.85	361
3	12.3	1.035	576.08	333



The band gap of electronic transition vibrational fine structure for the absorptivity of UV-Vis spectra at widest value of  $\lambda=361$  nm area was observed for  $R_{m2}$  type soluble silica suspension. These results were shown that dispersions can be used as is, or diluted with suitable (compatible) solvents as suspensions of nanoparticles in water. These dispersions of nanoparticles in can sometimes settle upon storage, in which case they can be mixed (shake up) before use and that colloidal silica as raw material for water glass production as optimal at molar ratio  $R_{m2}$  for silica to alkali metal oxide. In addition, this dispersed phase cannot dissolve in dispersion medium of water therefore negative charges were observed while their aging time and dispersion was controlled photon cross correlation spectroscopy for achieved by ultrasonic treatment. The experimental results for particle size of the dispersed silica sol depending on its distribution width ( $Q_x$ , %) and density of colloidal suspension ( $q_x$ , %), and coefficient of regression ( $r^2$ ) for linear equation for all samples shown in figure 4 were described at table 5 in detail.

Table 5 – Average size ( $X_{nm}$ , %), density ( $q_x$ ), area ( $Q_x$ , %) and coefficient of regression ( $r^2$ ) of particle size distribution width for nano dispersed colloidal silica

$R_m$	$D_{nm}$ , %						$S_V$ , $m^2/cm^3$	Slope, $\sigma_g=x_{84}/x_{50}$	$\alpha=\sigma_g/x_{50}$	$r^2$	SMD, nm	VMD, nm
	10	16	50	84	90	99						
1	37.8	39.2	43.9	49.2	50.9	56.5	137.58	1.12	0.03	0.98	43.61	44.15
2	16.5	16.6	17.1	17.7	18.1	18.8	349.96	1.04	0.06	0.97	17.14	17.16
3	37.6	39.2	44.8	53.3	53.4	60.9	135.05	1.19	0.03	0.96	44.43	45.22

The mass median diameter as  $D_{50}$  were for  $R_{m1}=43.9$  nm,  $R_{m2}=17.1$  nm,  $R_{m3}=44.8$  nm as shown at figure 4 and table 5. Concerning the influence of the solid content, pH and salt concentration results were declared that minimal average size of colloidal silica the area of specific surface was as  $349.96 m^2/cm^3$  at  $R_{m2}$ . So, the molar optimal ratio to produce colloidal  $SiO_2$  particles was concluded to 2 when use sodium carbonate to process the natural silica stone minerals.

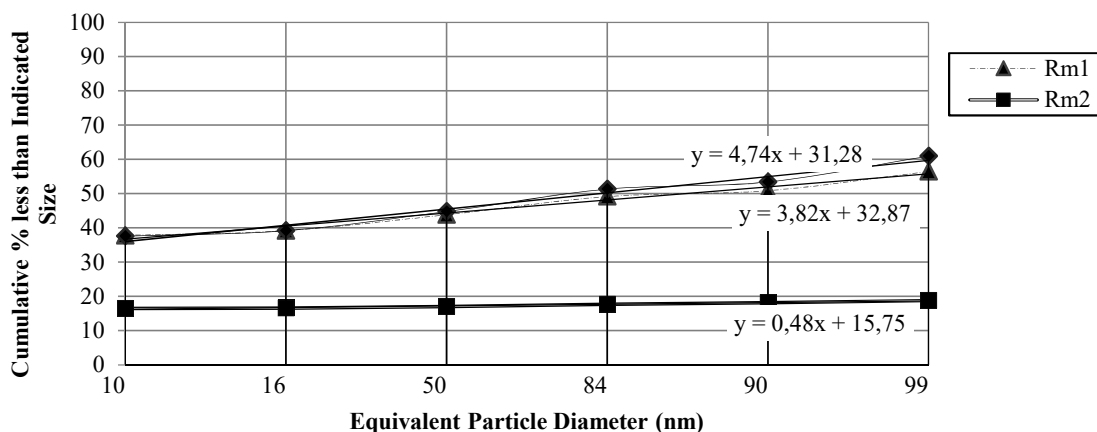


Figure 4 – Colloidal silica particles' distribution statistical curve by cumulative percent

## Conclusion

Colloidal silica was produced by pyro chemical of silica stone as an abundant mineral of Mongolia with molar different ratios of sodium ash at 1100 °C. The synthesis parameters, such as molar ratio of mixing, fluid density and size of colloid particles were optimized.

– X-ray powder diffraction of colloidal silica was disappeared the crystal peak of quartz peak at  $2\theta = 31.8^\circ$  and UV-vis. spectrum the band gap vibration of electronic transition was observed at the widest value of  $\lambda = 361$  nm area for  $R_m2$  type soluble silica suspension.

– Colloid silica nanoparticles at the optimized parameters of  $R_m2$  were confirmed by PCCS inspection with the area of specific surface of up to  $349.96 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ . The average size of the colloidal silica particles was 17.6 nm at  $D_{50}$ , % value and coefficient of regression for linear equation as 0.97 and with 1.04 slope.

– These findings seem to be extremely important for the industry to produce colloidal  $\text{SiO}_2$  particles by using that silica stone and sodium ash minerals in practice at given area.

## Acknowledgement

The authors kindly appreciate the support of National University of Mongolia, to fund of advanced technology promotion for the project as P2016-1218, “*Getting method of soluble silica for leather processing industry from abundant silicate minerals of Mongolia*” and the colleagues of Laboratory for New Materials at Dept. of Chemistry and Biological Engineering, School of Engineering & Applied Sciences.

## References

1. Neville F., Mohd. Zin A., Jameson G. J., Wanless E. J. // J. Chem. Educ. – 2012. – V. 89. – No. 7. – P. 940–942.
2. Kobayashi Y. et al. // Appl. Nanosci. – 2016. – V. 6. – No. 3. – P. 301–307.
3. Bitter J. L., Duncan G. A., Beltran-Villegas D. J., Fairbrother D. H., Bevan M. A. // Langmuir. – 2013. – V. 29. – No. 28. – P. 8835–8844.
4. Buckley A. M., Greenblatt M. // J. Chem. Educ. – 1994. – V. 71. – No. 7. – P. 599.
5. Hoshikawa Y., Yabe H., Nomura A., Yamaki T., Shimojima A., Okubo T. // Chem. Mater. – 2010. – V. 22. – No. 1. – P. 12–14.
6. Sekhar P.K., Bhansali S. // Encyclopedia of Nanotechnology. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2016. – P. 1404–1427.
7. Mondragon R., Julia J. E., Barba A., Jarque J. C. // Powder Technol. – 2012. – V. 224. – P. 138–146.
8. Serrano-Ruz J. A. et al. // Mater. Res. Express. – 2018. – V. 5. – No. 1. – P. 015038.
9. GOST 18481-81. Glass hydrometers and cylinders. General specifications. – Moscow: Standartinform, 2007. – 23 p. – Introduced 01.01.1983.
10. GOST 10028-81. Glass capillary viscosimeters. Specifications. – Moscow: Standartinform, 2005. – 15 p. – Introduced 01.01.1983.
11. Mongolian standards catalogue. List of standards classified by subject [Electronic source]. – 269 p. – URL: <https://pingpdf.com/pdf-list-of-standards-classified-by-subject.html> (date of the application 30.07.2019).
12. Tang B., Wu C., Qiu M., Zhang X., Zhang S. // Mater. Chem. Phys. – 2014. – V. 144. – No. 1–2. – P. 162–167.

**RESEARCH ON THE TECHNOLOGY  
OF PASTE BORONIZING FOR H13 DIE STEEL**

© Zhang Yan-wei<sup>1,2</sup>, Zhen Quan<sup>1,2</sup>, B. Lygdenov<sup>1,2,3</sup>, A. M. Гурьев<sup>1,2,4</sup>, Mei Shun-qi<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup>Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan 430073, China;

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University,  
Wuhan 430073, China;

<sup>3</sup>East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, 670013, Russia;

<sup>4</sup>Altai State Technical University, Barnaul, 656049, Russia

E-mail: <sup>a</sup>rmeishunqi@vip.sina.com, <sup>a</sup>9859624870@qq.com

*In this paper, the boronizing effect of H13 hot work die steel is studied. The effect of boronizing is better. The experiment is carried out to compare the boronizing experiments of H13 steel at 850 °C, 900 °C and 950 °C. The time is set to 4 hours. After the experiment, the sample was observed under the microscope. The depth of the boronized layer was increased by 15um~20um at 950 °C and 850 °C and 900 °C. The hardness test of the sample after boronizing was found to be 950 °C and 850 °C and 900 °C is raised from around 1200HV to around 1400HV. When the temperature is 950 °C, the layer is more tightly bonded to the substrate.*

**Keywords:** boronizing, boronizing layer, layer hardness, layered structure.

### Preface

Metal component surface treatment or surface modification techniques such as physical vapor deposition, chemical vapor deposition, induction beam hardening, hot dip coating, nickel plating, chrome plating, tin plating, carburizing, nitriding, carburizing, boronizing, and the like. Some of these treatments involve coatings that are the outer film layer of the metal substrate outer casing, while others process the physical and chemical properties over a distance of the substrate by diffusing another element. In the latter process, the change in substrate thickness is negligible. Boronizing is a surface diffusion treatment that increases some properties of the matrix to a certain depth [1, 2, 3]. After the boronizing treatment of the steel material, the wear resistance, corrosion resistance and high temperature oxidation resistance can be improved, and the parts can be used in a more complicated and multi-environment environment [4]. The performance of boronized steel is always superior to that of nitrided steel and carburized steel [5, 6, 7].

H13 hot work die steel is widely used in extrusion die and die casting. It is usually characterized by high strength and toughness. Direct contact with the workpiece during work, the temperature can reach 400-500 °C. In the forging machine, it can reach 650-700 °C. However, such die steels are commonly used in corrosive environments. The use of thermochemical treatment technology can improve the surface wear resistance, thermal fatigue and corrosion resistance. Boronizing technology is an effective surface treatment method. Due to the nature of the diffusion process, the boride layer has good adhesion to the substrate compared to conventional physical coating processes. Due to the high hardness of boride (1500~2000HV), it has the advantage of high hardness compared with traditional surface treatment such as carburizing, nitriding and carbonitriding [8, 9, 10].

In this paper, the effect of temperature on the boronizing layer was determined by comparing the boronizing effect of h13 die steel at the same boronizing time at dif-

ferent temperatures. According to the literature [11, 12], it can be known that the boronizing temperature is generally between 850 and 1000 degrees, so this temperature selection is 850 °C, 900 °C, 950 °C.

## 1 Experimental materials and experimental methods

### 1.1 Experimental materials

The experimental materials used in this paper are H13 hot work die steel, the chemical composition of which is shown in Table 1. The microhardness of H13 steel is 450HV~550HV, and the H13 steel is cut into 20mm×10mm×10mm size, which is used for the microhardness test of boronizing experiment. The experimental plasters are C, B<sub>4</sub>C, NaF, and the like.

Table 1 – Composition of H13 hot work die steel

element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S
content(%)	0.32~0.45	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.75	0.80~1.20	≤0.030	≤0.030

### 1.2 Experimental methods

The H13 steel sample having a size of 20 mm × 10 mm × 10 mm was sanded and polished with a sandpaper, and then the surface grease and the like were washed with alcohol, and dried by a blower to be placed in a desiccator for use. After weighing the appropriate amount of the agent, add a proper amount of water to form a paste and apply it evenly on the sample. The thickness is about 3~5mm. Place it in a dry and ventilated place and dry it for one night. Then put it in a dry box and heat it to 150 °C for 2 hours. Dry thoroughly. The heating temperature of the resistance box was set to three temperatures of 850 °C, 900 °C, and 950 °C, respectively, and three samples were heated, the heating time was set to 4 hours, and the sample was cooled to room temperature with the furnace.

After the sample is completely cooled, the sample is taken out and knocked out of the outer casing, and the sample is cut from the middle by wire cutting. The cut surface of the sample is polished, polished, etched, etc. with different types of sandpaper. The sample was placed under an optical microscope OLYMPUS DSX-HRUF to observe the layer structure. Hardness was measured by applying a force of 25 g on a (HV-100) hardness tester for 10 s.

## 2. Experimental results

### 2.1 Analysis of boronized layer

Three samples which had been subjected to boronizing treatment at 850 °C, 900 °C, and 950 °C were again polished and polished. According to the literature [13, 14], the surface of the treated sample was etched by disposing a 3% to 5% nitric acid solution, and then the boronized layer was observed under a microscope. A, b, and c of Figure 1 are boronized layers of 850 °C, 900 °C, and 950 °C, respectively.

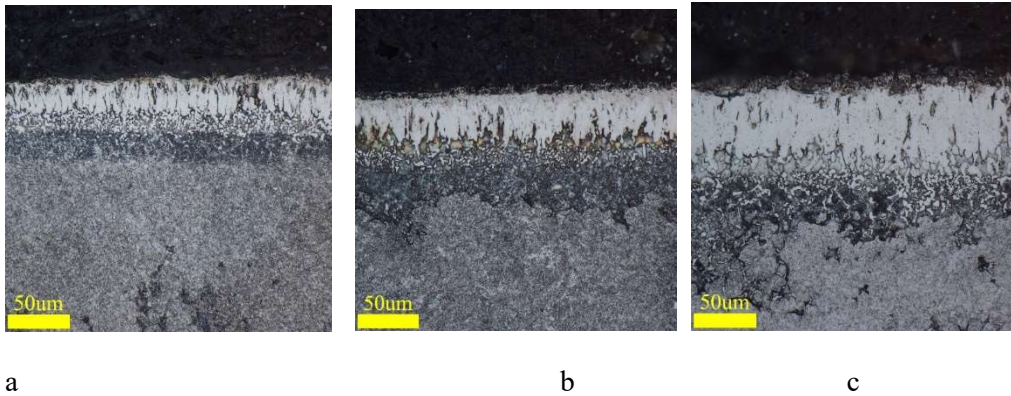


Figure 1 – The boronized layer at different temperatures

Since a, b, and c in Figure 1 can be seen that the boronized layer is sparse at 850 °C and the boronizing depth is shallow, when the temperature rises to 900 °C, the temperature of the boronizing layer begins to become tight and begins to appear jagged. When the temperature reaches 950 °C, the boronized layer is more compact, and the sawtooth shape is more obvious. The boronizing depth is obviously improved relative to 850 °C and 900 °C. Table 2 shows the depth of the boronized layer at 850 °C, 900 °C, and 950 °C. It can be seen that the effect of temperature on the boronized layer indicates that the boronizing effect at 950 °C is significantly better than 850 °C and 900 °C.

Table 2 – Depth of boronized layer of H13 steel

Temperature (°C)	850	900	950
Layer thickness (um)	30~40	35~40	55~60

## 2.2 Analysis of the hardness of the layer

Table 3 is the hardness value of each point of the sample, and Figure 2 shows the approximate hardness curve at 850 °C, 900 °C, and 950 °C.

Table 3 – Hardness values

	20um	40um	100um	200um	300um
850 °C	1127.82HV	620.2HV	475.1HV	510.32HV	463.33HV
900 °C	1298.76HV	570.3HV	479.33HV	530.20HV	478.2HV
950 °C	1402.77HV	590.20HV	454.32HV	490.72HV	530.21HV

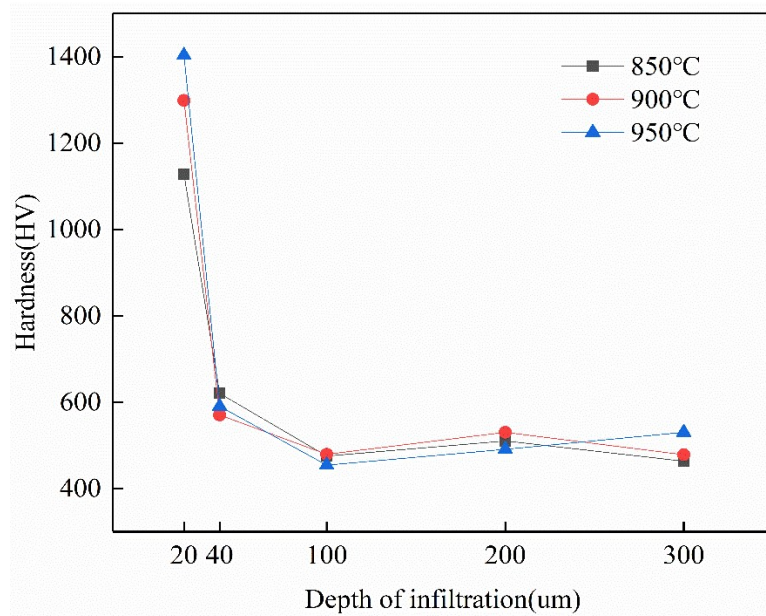


Figure 2 – Hardness value curve

Since only 20um of points on the thinner layer of the infiltrated layer are on the infiltrated layer, 40um is on the transition layer, 100um, 200um, 300um, on the base material. It can be seen from Table 2 and Figure 2 that the hardness of the layer at 950 °C in the 20 um layer is better than the hardness of the layer at 900 °C and 850 °C.

### 3 Conclusions

At 950 °C is a temperature suitable for boronizing of h13 steel. At 950 °C, the boronized layer is more tightly bonded to the matrix, and the depth of the layer is deeper than 850 °C and 900 °C. The hardness of the layer is better than 850 °C and 900 °C at 950 °C in terms of the hardness of the layer. Therefore, 950 °C is a suitable temperature for boronizing the H13 hot work die steel.

### References

1. Özgen Ö. S., Şeşen F. E., Şeşen M. K. // Materials Performance and Characterization. – 2017. – No. 6 (4). – P. 492-509.
2. Perry R. H., Green D. W. Chemical Engineering Handbook. – New York: McGraw-Hill, 2008.
3. Davis J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. – OH, Materials Park: ASM International, 2002.
4. He Wei, Zhang Boping, Li Maolin, Tan Fuzhen, Lin Naiming // Hot Working Technology. – 2016. – No. 45(08). – P. 19-24+29.
5. Sundararajan G., Venkataraman B., Lakshminarayana K., Harish G.B.K. Studies on Boronizing of En 24 Steel. – India, Hyderabad: ARCI Technical Report, 1998.
6. Venkataraman B., Sundararajan G. // Surf. Coating Technol. – 1995. – No. 73. – P. 177.
7. Jain V., Sundararajan G. // Surface and Coatings Technology. – 2002. – No. 149 (1). – P. 21-26.
8. Yang Zhe, Yang Haopeng, Wu Xiaochun, Qi Shengjun // Chinese Journal of Materials Research. – 2014. – No. 28(03). – P. 220-226.
9. Yang H., Wu X., Cao G. et al. // Surface and Coatings Technology. – 2016. – No. 307. – P. 506-516.

10. Campos I., Oseguera J., Figueroa U., Garcia J.A., Bautista O., Kelemenis G. // Mater. Sci. Eng. A. – 2003. – No. 352. – P. 261-265.
11. Ma Zhuang, Li Ling, Wang Siqi, Wei Baoquan, Li Zhichao // Heat Treatment of Metals. – 2017. – No. 42(08). – P. 146-151.
12. Xing Zhisong, Wang Baoping // Heat Treatment of Metals. – 2013. – No. 38(08). – P. 99-102.
13. Liu Yumeng. Research on boronizing process of self-protecting paste. – Nanjing Institute of Technology, 2014.
14. Liu, Jianjian, Chen Zhuping // Plating & Finishing. – 2011. – No. 33(07). – P. 24-28.

УДК 537.9; 539.23

**ЗАВИСИМОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК  
НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ  
ПЛАЗМОАКТИВИРОВАННОГО АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ,  
ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ЭКСПОЗИЦИИ**

© М. Г. Амбарцумов<sup>1</sup>, инженер, В. А. Тарала<sup>1</sup>, заведующий НЛК «Чистые зоны»,  
С. О. Крандиевский<sup>1</sup>, ведущий инженер, В. А. Лапин<sup>1,2</sup>, научный сотрудник,  
Д. С. Кулешов<sup>1</sup>, инженер, И. С. Чикулина<sup>1</sup>, заведующий НИЛ керамики и технохимии,  
Л. В. Тарала<sup>1</sup>, ведущий инженер

<sup>1</sup>НЛК «Чистые зоны», Инженерный институт, Северо-Кавказский Федеральный Университет, 355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, +7(8652) 95-68-08

<sup>2</sup>Южный научный центр Российской академии наук,

344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова 41

E-mail: ambmg@yandex.ru

*Тонкие пленки нитрида алюминия получены методом плазмоактивированного атомно-слоевого осаждения на подложках монокристаллического кремния Si(100) при температурах 150°C и 280°C и с длительностью плазменной экспозиции от 3 до 30 секунд. Образцы были исследованы методами эллипсометрии, атомно-силовой микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа, на подложках кремния осаждались поликристаллические пленки с гексагональным политипом. Показано, что для осаждения кристаллических пленок AlN и реализации процесса самоограниченного роста требуется установление длительности плазменной экспозиции свыше 10 секунд. При этом скорость роста была постоянной и составила 0,12 нм/цикл, а коэффициент преломления принимал значения от 1,93 до 1,99. При длительностях  $t_{PE}$  менее 10с осаждались преимущественно аморфные покрытия. Помимо этого, существенное влияние на выращивание качественных пленок нитрида алюминия методом плазмоактивированного атомно-слоевого осаждения оказывает температура процесса. Согласно результатам XRD анализа, показано, что повышение кристалличности материала сопряжено с проведением процесса осаждения при температурах выше температуры разложения триметиалюминия.*

**Ключевые слова:** AlN, PEALD, атомно-слоевое осаждения, XRD, АСМ.

**THE DEPENDENCE OF ALUMINUM NITRIDE THIN-FILMS  
MICROSTRUCTURE ON THE PLASMA EXPOSURE DURATION DURING  
VIA PLASMA-ENHANCED ATOMIC LAYER DEPOSITION**

M. G. Ambartsumov<sup>1</sup>, engineer, V. A. Tarala<sup>1</sup>, Head of SLC “Clean rooms”,  
S. O. Krandievsky<sup>1</sup>, Senior Engineer, V. A. Lapin<sup>1,2</sup>, Researcher, D.S. Kuleshov<sup>1</sup>, engineer  
I. S. Chikulina<sup>1</sup>, Head of the Scientific Research Laboratory of Ceramics and Technochemistry,



**L. V. Tarala**<sup>1</sup>, Senior Engineer

<sup>1</sup>SLC “Clean rooms” Engineering Institute, North Caucasus Federal University  
355017, Russia, Stavropol, 1 Pushkina St., +7 (8652) 95-68-08

<sup>2</sup> Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, 344006,  
Rostov-on-Don, 41 Chekhova St.  
E-mail: ambmg@yandex.ru

*Aluminum nitride thin films were obtained by plasma enhanced atomic layer deposition on single-crystal silicon substrates Si (100) at temperatures of 150°C and 280°C and with a plasma exposure duration of 3 to 30 seconds. Samples were studied by ellipsometry, atomic force microscopy, and X-ray diffraction. According to the results of XRD, polycrystalline films with a hexagonal polytype were deposited on silicon substrates. It was shown that the deposition of crystalline AlN films and the realization of the process of self-limited growth required the establishment of a plasma exposure time over 10 seconds. The growth rate was constant and amounted to 0.12 nm/cycle, and the refractive index values varied in the range of 1.93 to 1.99. At durations  $\tau_{PE}$  less than 10 s, predominantly amorphous coatings were deposited. In addition, a significant effect on the growth of high-quality films of aluminum nitride by the method of plasma-enhanced atomic layer deposition is influenced by the process temperature. According to the results of XRD, it was shown that an increase in the crystallinity of the material is associated with the rise of temperature above the decomposition temperature of trimethylaluminum.*

**Keywords:** AlN, PEALD, atomic-layer deposition, XRD, AFM.

Тонкие пленки нитрида алюминия (AlN) находят свое применение для создания компонентной базы микро-, нано- и оптоэлектронных СВЧ-устройств [1,2]. Покрытия AlN осаждаются методами физического и химического осаждения из газовой фазы. В рамках данного исследования слои нитрида алюминия выращивались методом плазмоактивированного атомно-слоевого осаждения (PEALD – Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition). Преимуществом этого способа является прецизионный контроль толщины пленки и возможность существенно снизить температуру осаждения. Цель работы состояла в исследовании зависимости микроструктуры пленок AlN от длительности плазменной экспозиции.

Пленки нитрида алюминия были получены на установке TFS 200 (Venet, Финляндия) при температурах реактора  $T_1 = 150^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 280^\circ\text{C}$  и с длительностью плазменной экспозиции  $\tau_{PE}$  от 3 до 30 секунд на подложках монокристаллического кремния Si(100). В качестве источника алюминия использовался триметилалюминий (ТМА), а источника азота – плазмообразующая смесь  $\text{N}_2/\text{H}_2$ . Значения температур осаждения подбирались выше и ниже температуры разложения ТМА ( $T_{разл} = 230^\circ\text{C}$ ). Более подробно условия осаждения пленок изложены в работе [3]. Определение толщины покрытия ( $h$ ) и коэффициента преломления ( $n$ ) осуществлялось при помощи спектроскопического эллипсометра SE 800 (Sentech Instruments GmbH, Германия). Микроструктурные измерения проводились на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific, USA) в геометрии малоуглового рассеяния (GIXRD) при угле падения  $\omega = 0,5^\circ$ . Для исследования морфологии поверхности и определения средних значений шероховатости (RMS) применялся атомно-силовой микроскоп Ntegra Maximus в контактном режиме с областью сканирования 0,5мкм x 0,5мкм.

Зависимости скорости роста и коэффициента преломления от длительности плазменной экспозиции представлены на рисунке 1. Скорость роста ( $V$ ) пленок AlN определялась как отношение толщины покрытия к количеству циклов. Для случая высокотемпературного синтеза ( $T_2 = 280^\circ\text{C}$ ), наблюдалось постепенное возрастание скорости роста при увеличении длительности плазменной экспозиции от 3 до 10 секунд. По всей видимости, причиной этого являлось увеличение доли молекул и радикалов TMA, вступающих в химическую реакцию с ионами азота. При низкотемпературном синтезе ( $T_1 = 150^\circ\text{C}$ ) и при длительностях  $\tau_{PE}$  менее 6 секунд наблюдалось резкое возрастание скорости. По нашему мнению, причиной этого послужило «зарастание»  $-\text{CH}_x$  радикалов ( $0 < x < 3$ ) в объеме пленки и протекание неполных химических реакций.

При дальнейшем увеличении  $\tau_{PE}$  (при  $150^\circ\text{C}$ ) происходило уменьшение скорости роста, вызванное возрастанием эффективности плазменной обработки и уменьшением доли метильных групп, и, как результат, повышение плотности пленки. При этом, как видно из рисунка 1а, дальнейшее увеличение длительности  $\tau_{PE}$ , как для  $T_1 = 150^\circ\text{C}$ , так и для  $T_2 = 280^\circ\text{C}$ , не приводило к существенным изменениям  $V$  (0,12 нм/цикл), что говорит о наступлении стадии насыщения и реализации самоограниченного режима метода PEALD. В качестве подтверждения этого обстоятельства служат результаты исследования зависимости коэффициента преломления от длительности плазменной экспозиции (рисунок 1б).

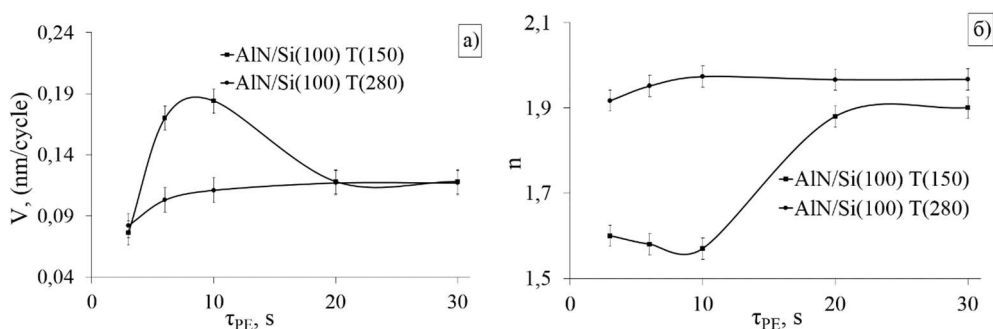


Рисунок 1 – Зависимость скорости роста (а) и коэффициента преломления (б) от длительности плазменной экспозиции

Как известно, показатель преломления поликристаллических пленок AlN принимает значения в диапазоне от 1,9 до 2,1 и с увеличением кристалличности, и, как следствие, плотности, возрастает. Согласно рисунку 1б, в случае высокотемпературных процессов ( $280^\circ\text{C}$ ), увеличение длительности плазменной экспозиции до 6 секунд приводило к увеличению  $n$  с 1,93 до 1,99, после чего измененный значения показателя преломления не было обнаружено. Данное обстоятельство указывает на то, что наиболее существенные изменения в микроструктуре пленок AlN происходят при  $\tau_{PE} < 6$  секунд.

На рисунке 2а представлены результаты зависимости шероховатости (RMS) от длительности плазменной экспозиции.

Для случая низкотемпературного синтеза ( $150^\circ\text{C}$ ) наблюдались высокие значения шероховатости при  $\tau_{PE}$  до 6 секунд, что связано с осаждением в этом случае пленки с высокой плотностью пор. При реализации высокотемпературного синтеза ( $280^\circ\text{C}$ ) в подобных условиях RMS оказалась минимальной, что соответствует аморфной структуре. Увеличение длительности плазменной экспозиции

свыше 10 секунд не приводило к существенным изменениям шероховатости поверхности, которая принимала близкие значения ( $<0,8$  нм) для  $T_1 = 150^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 280^\circ\text{C}$ .

Различия в микроструктуре образцов подтверждают результаты рентгеноструктурного анализа. На рисунке 2б представлены  $\omega/2\theta$ -сканы пленок, полученных при длительности  $\tau_{\text{PE}} = 20$  с.

Как видно из рисунка 2б, наличие трех основных рефлексов  $33.02^\circ - (100)$ ,  $36.04^\circ - (002)$  и  $37.9^\circ - (101)$ , а также отражений от плоскостей  $(102)$ ,  $(103)$  и  $(112)$  в геометрии GIXRD свидетельствует об осаждении поликристаллической гексагональной пленки AlN типа вюрцит [4]. Однако при этом покрытия нитрида алюминия, выращенные при  $T_2 = 280^\circ\text{C}$  обладают лучшей кристаллическостью, чем пленки AlN при  $T_1 = 150^\circ\text{C}$ . Результаты АСМ и GIXRD исследований хорошо согласуются с результатами, полученными методом эллипсометрии (рисунк 1).

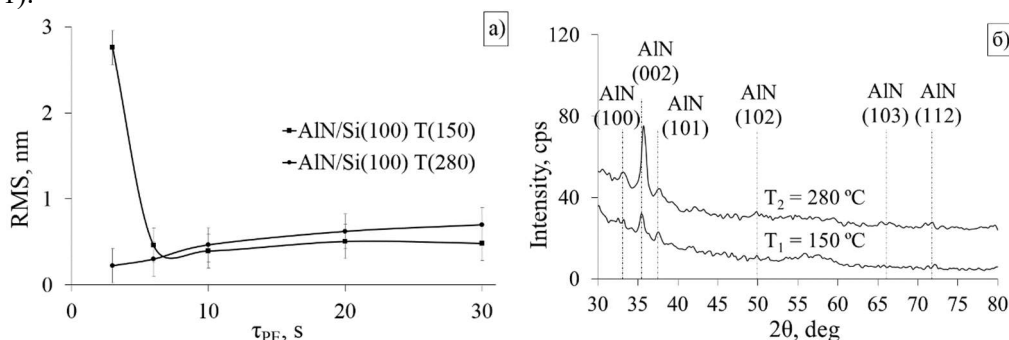


Рисунок 2 – а) Зависимость RMS от длительности плазменной экспозиции; б)  $\omega/2\theta$ -сканы в геометрии GIXRD пленок AlN при  $T_1 = 150^\circ\text{C}$  и  $T_2 = 280^\circ\text{C}$

Таким образом, на основании проведенных исследований можно утверждать, что для выращивания качественных кристаллических пленок нитрида алюминия методом PEALD требуется увеличение длительности плазменной экспозиции выше 10 с.

#### Литература

1. Assouar M.B. Study of structural and microstructural properties of AlN films deposited on silicon and quartz substrates for surface acoustic wave devices / M.B. Assouar, O. Elmazria, M. Elhakiki, P. Alnot // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. – 2004. – Т. 22. – С. 1717 – 1722.
2. Sahyoun W. Acoustic, piezoelectric, and dielectric nonlinearities of AlN in coupled resonator filters for high RF power levels / W. Sahyoun, J.M. Duchamp, P. Benech // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. – 2011. – Т. 58. – С. 2162 – 2170.
3. Growth of aluminum nitride films by plasma-enhanced atomic layer deposition / D.P. Valyukhov [и др.] // Inorg. Mater. – 2015. – Т. 51. – С. 728-735.
4. Ozgit C. Self-limiting low-temperature growth of crystalline AlN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition / C. Ozgit, I. Donmez, M. Alevli, N. Biyikli // Thin Solid Films. – 2012. – Т. 520. – С. 2750-2755.

#### References

1. Assouar M.B., Elmazria O., Elhakiki M., Alnot P. // J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. – 2004. – V. 22. – P. 1717 – 1722.

2. *Sahyoun W., Duchamp J.M., Benech P.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. – 2011. – V. 58. – P. 2162 – 2170.

3. *Valyukhov D.P., Shevchenko M.Y., Martens V.Y., Lisitsyn S. V., Tarala V.A., Altakhov A.S.* // Inorg. Mater. – 2015. – V. 51. – P. 728-735.

4. *Ozgit C., Donmez I., Alevli M., Biyikli N.* // Thin Solid Films. – 2012. – V. 520. – P. 2750-2755.

УДК 691.189.3

### **О РЕЗУЛЬТАТАХ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ И ПЕНОСТЕКЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

© **Н. Н. Анчилов**<sup>1,a</sup>, старший преподаватель, **В. Е. Рогов**<sup>2,b</sup>, старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН  
670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

E-mail: <sup>a</sup>anchilov@yandex.ru, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru

*Проведены исследования структур исходного сырья и получаемых на их основе пено-стекло систем «алюмосиликатная порода-стеклобой – гидроксид натрия», с применением рентгенфазового и термического анализа. Установлена взаимосвязь рецептурно-технологических параметров и физико-механических свойств пеностекло системы «стеклобой – алюмосиликатная порода – гидроксид натрия». Разработаны составы пенообразующих смесей, позволяющих получать пеностекла с плотностью от 412 до 1200 кг/м<sup>3</sup> и прочностью от 2.0 до 16.1 МПа.*

**Ключевые слова:** пеностекло, структура, исследование, породы, сырье.

### **ON THE RESULTS OF INTEGRATED RESEARCHES OF THE STRUCTURE OF THE INITIAL RAW MATERIAL AND FENCED GLASS WITH THE APPLICATION OF MODERN PHYSICAL-CHEMICAL METHODS**

**N. N. Anchilov**<sup>1,a</sup>, senior teacher, **V. E. Rogov**<sup>2,b</sup>, Senior Researcher

<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Kluchevskaya St.

<sup>2</sup>Baikal Institute of Nature Management of Siberian branch of the Russian Academy  
of sciences 670047, Russia, Ulan-Ude, 6 Sakhyanovoi St.

E-mail: <sup>a</sup>anchilov@yandex.ru, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru

*Structures of the initial raw material and foam glass of the “aluminosilicate rock-cullet – sodium hydroxide” systems obtained on their basis were studied using X-ray and thermal analysis. The interrelation of the prescription-technological parameters and the physicomechanical properties of the foamglass of the system “cullet – aluminosilicate rock – sodium hydroxide” is established. Compositions of foam-forming mixtures have been developed that make it possible to obtain foam glass with a density from 412 to 1200 kg / m<sup>3</sup> and strength from 2.0 to 16.1 МПа.*

**Keywords:** foam glass, structure, research, rocks, raw materials.

Все материалы, применяемые в строительстве, в зависимости от своего функционального назначения, обладают различными физико-механическими свойствами. На любые свойства материала оказывают влияние их химический и фа-

зовый составы, способы получения, а также внутреннее строение [1-5]. Из всех вышеперечисленных характеристик для теплоизоляционных материалов решающее значение имеет их строение. Это обстоятельство вызывает необходимость тщательного изучения структуры получаемых материалов и их исходных компонентов.

Для комплексного исследования структуры, составов и свойств получаемых материалов, а также исходного сырья, применялись следующие физико-химические методы: рентгенофазовый анализ; ик-спектроскопия; электронная микроскопия; термический анализ. Все исследования были проведены на базе Центра коллективного пользования «Прогресс» инновационного центра ФГБОУ ВО ВСГУТУ, а также Бурятского Научного Центра СО РАН.

При проведении исследований и постановке экспериментов в качестве сырьевых компонентов были рассмотрены глины и перлит месторождений Республики Бурятия, бой тарного стекла и гидроксид натрия.

Рентгенофазовый анализ стеклобоя, как правило, обнаруживает их рентгеноаморфность. На ИК-спектрах стеклобоя (рисунок 1) отмечено наличие широкой полосы поглощения в высокочастотной области спектра при  $1050\text{ см}^{-1}$ , соответствующей колебаниям сравнительно высокополимеризованных групп из тетраэдров  $[\text{SiO}_4]$ . Полосы поглощения у частоты  $772\text{ см}^{-1}$  указывают на усиление степени полимеризации кремнекислородных групп при встраивании  $[\text{AlO}_4]$  – групп в кремнекислородную сетку. Полоса поглощения при  $600\text{ см}^{-1}$  указывает на незначительное присутствие различных модификаций  $\text{Si}_2\text{O}_7$  в структуре стеклобоя, которые могут быть отнесены к связям  $\text{Si-O-Si}$  в качестве второго тона валентных колебаний. Наличие эффектов в диапазоне  $1510\text{-}1679\text{ см}^{-1}$  можно объяснить деформационными колебаниями свободных молекул воды, которая адсорбировалась стеклом. Полоса поглощения при  $2878\text{ см}^{-1}$  может быть связана с валентными колебаниями гидроксильных групп.

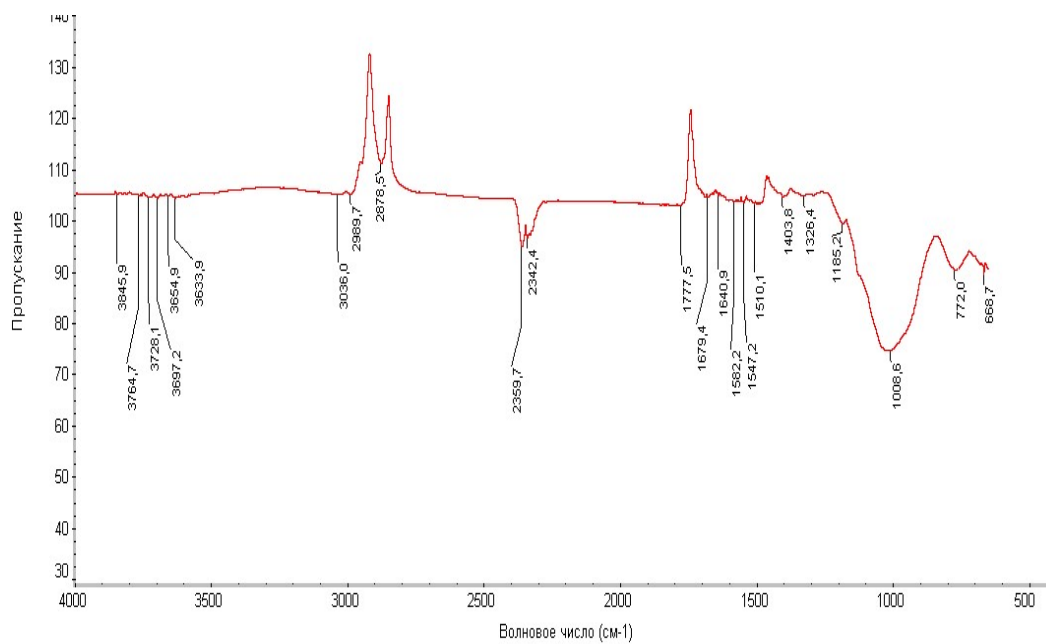


Рисунок 1 – ИК-спектроскопия стеклобоя

По данным электронно-микроскопических исследований структура стеклобоя является гомогенной при достаточной однородности его химического состава.

По данным РФА (рисунок 2) структура глинистой породы представлена монтмориллонитом (0,457; 0,447; 0,245; 0,256; 0,223; 0,167 нм), каолинитом (0,713; 0,446; 0,357; 0,259; 0,233 нм), минералами группы кальцита (1,424; 0,302; 0,289; 0,279; 0,213; 0,182; 0,159 нм), низкотемпературным кварцем (0,425; 0,334; 0,228; 0,182; 0,154 нм), гидрослюдой (0,996; 0,446; 0,285; 0,2558; 0,197; 0,178 нм), полевыми шпатами (0,3236; 0,318; 0,259; 0,178 нм).

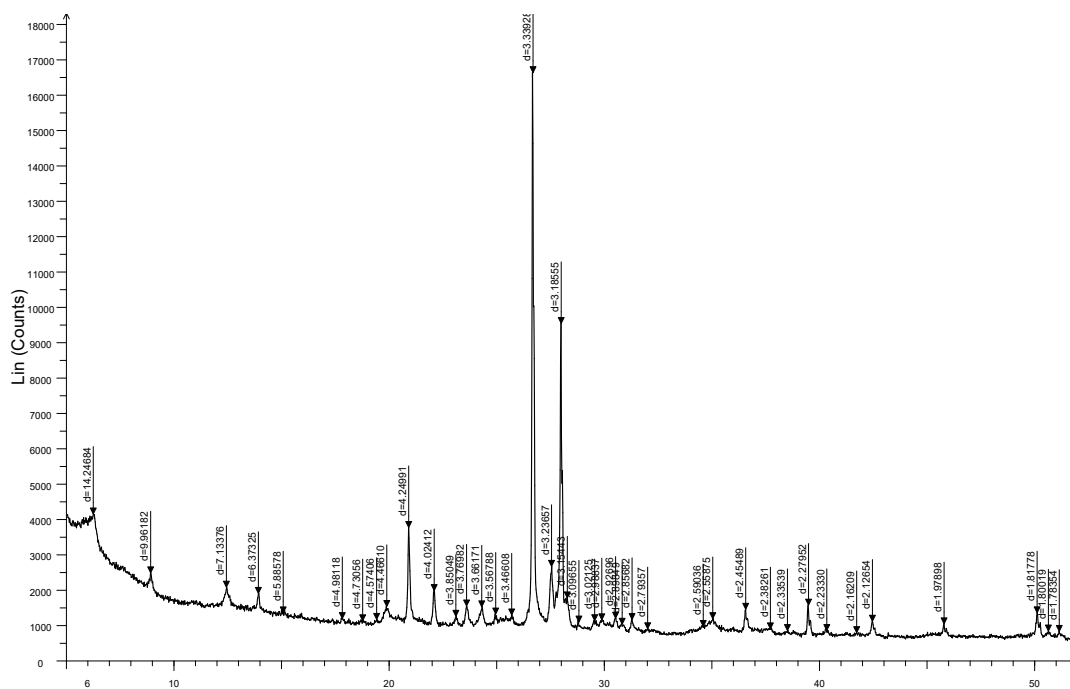


Рисунок 2 – РФА глинистой породы

ИК-спектроскопия глинистой породы пород (рисунок 3) показала, наличие полосы поглощения у частот  $1000-1008 \text{ см}^{-1}$  в структуре исходных веществ характеризуют валентные колебания силоксановых групп, а наличие полос в интервале  $500...700 \text{ см}^{-1}$  – связана с наличием модификаций кремнезема. Полосы в интервале  $3500-3600$  относятся к ОН-валентным и деформационным колебаниям свободной и связанной воды в виде свободного гидроксила.

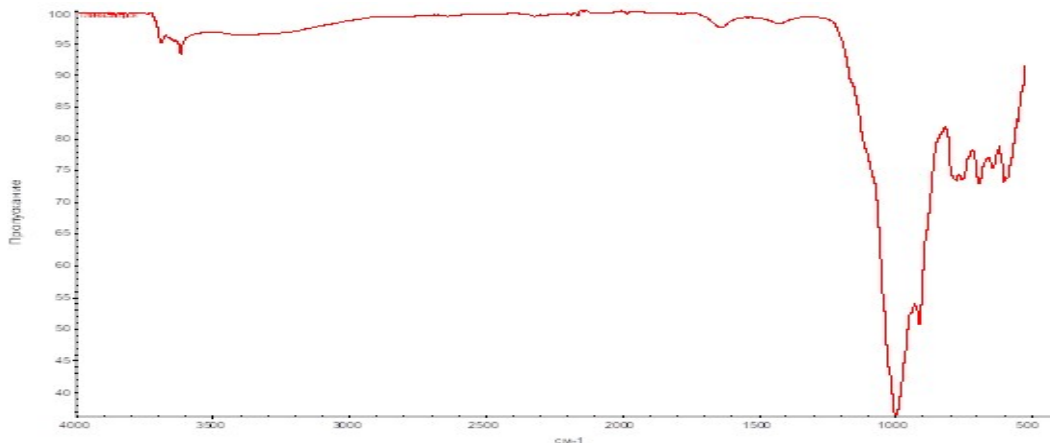


Рисунок 3 – ИКА – спектр глинистой породы

На рентгенограмме стекловидного перлита (рисунок 4) в интервале от 4 до 40  $\theta^\circ$  отмечаются пики небольшой интенсивности, из которых можно выделить рефлексы с  $d/\text{н} = 4,191; 3,346; 3,223; 2,817 \text{ \AA}$ . Из этого следует, что перлит стекловидный практически рентгеноаморфен.

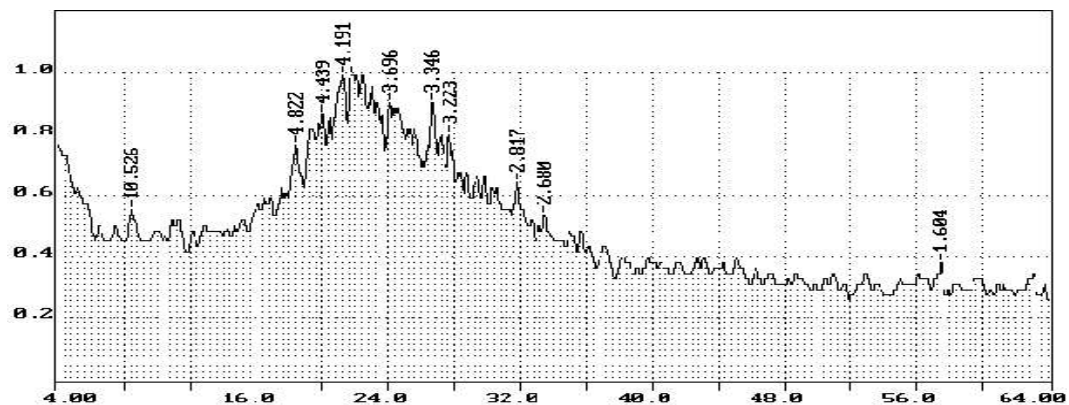


Рисунок 4 – Рентгенографический анализ перлитовой породы

ИК-спектроскопия стекловидного перлита (рисунок 5) показала наличие широкой полосы поглощения в высокочастотной области спектра при  $3500 \text{ см}^{-1}$ . Наличие слабых дублей у частот  $2850$  и  $2910 \text{ см}^{-1}$  характеризует водородные связи, образованных гидроксилами, связанными с атомами кремния. Полоса поглощения с максимумом у  $1650 \text{ см}^{-1}$ , соответствует деформационным колебаниям связей О-Н и свидетельствует о присутствии молекулярной воды и воды в виде свободного гидроксила. Интенсивная полоса поглощения при  $1050 \text{ см}^{-1}$  у перлитовой породы указывает на усиление связей в природном стекле. Дубли у частот  $710\text{-}780 \text{ см}^{-1}$  свойственны полосам поглощения кристаллического кварца. На присутствие в перлите различных модификаций  $\text{Si}_2\text{O}_\sim$  указывает также полоса поглощения с максимумом при частоте  $475 \text{ см}^{-1}$ .

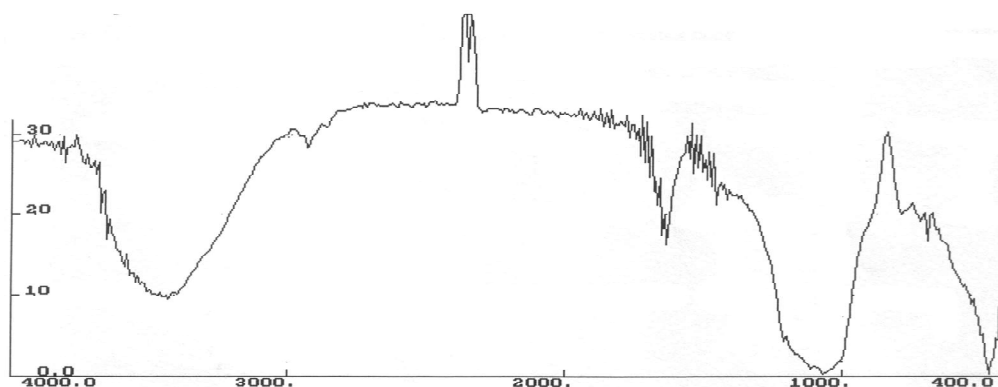


Рисунок 5 – ИК-спектр перлитовой породы

Исследуемые материалы приводили в тонкомолотое состояние механическим измельчением в вибрационном измельчителе ВИ 350х4. Стеклошихта для получения пеностекла подготавливалась следующим образом: куски стеклобоя после предварительного дробления до размера не более 2 мм дозировали по массе в соответствующих пропорциях и измельчали в вибрационном измельчителе до удельной поверхности 300-350 м<sup>2</sup>/кг.

Глинистая порода и перлит мелкой фракции после дробления также измельчали в вибрационном измельчителе до удельной поверхности не менее 350 и 450 м<sup>2</sup>/кг соответственно.

Компоненты затворяли водным раствором гидроксида натрия. Формовочная влажность прессованных образцов составила 16 – 19 %. Изготовленные образцы подвергали нагреву и вспениванию в лабораторной муфельной печи ЭКПС – 10 с максимальной температуры подъема до 1100 °С в соответствии с принятыми режимами нагрева, вспенивания и охлаждения.

Установлено, что введение в состав пенообразующих смесей при получении пеностекол наряду со стеклобоем алюмосиликатных горных пород – глины и перлита в присутствии щелочного компонента создает условия для направленного регулирования фазового состава и свойств синтезируемых пеностекол.

Доказана целесообразность использования наряду с ранее применяемыми методами механо- и щелочной активации термической обработки глинистой породы, способствующей интенсификации процесса обжига пеностекла за счет новообразованных легкоплавких соединений. С применением рентгенофазового анализа исследованы структуры исходных сырьевых материалов, промежуточных продуктов и готовых пеностекол системы «алюмосиликатная порода – стеклобой – гидроксид натрия».

Разработаны составы пенообразующих смесей, позволяющие получить при энергетически выгодных температурных режимах в диапазоне от 850 °С до 900 °С пеностекла со средней плотностью 412-542 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 2.0-3.6 МПа для теплоизоляционных изделий и пеностекла со средней плотностью 588-1200 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии 1,7-16,1 МПа для конструктивно-теплоизоляционных изделий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-18050/18.



#### *Литература*

1. Дамдинова Д.Р. Пеностекла системы стеклобой – глина – гидроксид натрия: составы, структура и свойства / Д.Р. Дамдинова, В.Е. Павлов, Н.Н. Анчилов // Строительные материалы. – 2014. – № 8. – С. 38-40.
2. Рогов В.Е. Термохимическое взаимодействие оксида свинца с фторопластовой матрицей/ Рогов В.Е., Курбатов Р.В., Бохоева Л.А. // Журнал прикладной химии. -2019.- Т. 92.- № 2.- С.187-190.
3. Дамдинова Д.Р. Пеностекло на основе местного глинистого сырья и стеклобой: структура и свойства / Д.Р. Дамдинова, В.Е. Павлов, Н.Н. Анчилов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия, физика. – 2017. – № 2-3. – С. 3-11.
4. Анчилов Н.Н. Разработка и применение пенокерамических материалов для быстровозводимых зданий в условиях климата республики Бурятия / Н.Н. Анчилов // Механика конструкций и материалов: сборник научных трудов по материалам 55-й научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГУТУ. – 2016. – Выпуск 1. – С. 3-10
5. Рогов В.Е. Термическое взаимодействие оксида свинца с политетрафторэтиленом/ Рогов В.Е., Цыренова Г.Д., Перевалов А.В., Бохоева Л.А.//Химическая технология. – 2016. – Т. 17. № 10. — С. 446-452.

#### *References*

1. Damdinova D.R., Pavlov V.E., Anchilov N.N. // Building materials. – 2014. – No. 8. – P. 38-40.
2. Rogov V. E. Thermochemical interaction of lead oxide with PTFE matrix/ Rogov V. E., Kurbatov R. V., Bogoeva L. A. //Journal of applied chemistry.- 2019.- Vol. 92. No. 2. - P.187-190.
3. Damdinova D.R., Pavlov V.E., Anchilov N.N. // Bulletin of the Buryat State University. Chemistry, physics. – 2017. – No. 2-3. – P. 3-11.
4. Anchilov N.N. // Mechanics of structures and materials: proceedings of 55<sup>th</sup> scientific-practical conference of teachers, researchers and graduate students of ESSUTM. – 2016. – Issue 1. – P. 3-10.
5. Rogov V. E. Thermal interaction of lead oxide with PTFE / Rogov V. E., Tsyrenova G. D., Perevalov A. V., Bogoeva L. A. // Chemical technology. – 2016. – Vol. 17. No. 10. – P.446-452.

УДК 677.017

### **STRETCH ELASTICITY AND GARMENT PRESSURE OF SHAPING-UNDERWEAR FABRIC**

© Yun-Qi Gong<sup>1</sup>, Shun-Qi Mei<sup>1,2,a</sup>

<sup>1</sup>Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

<sup>2</sup>Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan, 430073, China

E-mail: <sup>a</sup>ymeishunqi@vip.sina.com, <sup>a</sup>853573939@qq.com

*In recent years, the relationship between corsets and human health has been widely concerned. In order to explore the relationship between body shaping fabric and garment pressure, the article starts from the reasons for the formation of body-dressing clothes. This article also introduces the comfort range of human body wear and summarizes the principles, advantages and disadvantages of various methods of testing body-dressing clothes. At the same time, five elastic fabrics were selected to test their tensile properties. The garment pressures produced by the human calf diameter of 9 cm were also tested. The relationship between the tensile properties of the fabric and the garment pressure was analyzed, which lays the foundation for design-*

*ing the intelligent corset that can meet the health requirements of people and realize the shaping of the body.*

**Keywords:** *body shaping fabric, garment pressure, test method, tensile properties.*

## **Introduction**

Shaping-underwear, also known as tight garment, include bras, waist-nipper, split type shaping-underwear, toning pants, etc., mainly by applying pressure to the wearer to help people transfer excess meat from various parts of the body to the desired position. In this way, it can straighten the chest, lift the buttocks, slim the legs and correct the hunchback, so as to correct the body curve and shape the perfect figure for modern women [1, 2]. However, too much clothing pressure will not only cause the wearer's bone deformation, internal organs movement, but also bring them a series of physiological problems, and even cause diseases [3, 4]. Therefore, studying the pressure comfort of shaping-underwear is of great significance for optimizing its structural design and improving its fit and health.

### **1 Garment pressure produced by shaping-underwear**

The garment pressure produced by the corset is mainly composed of weight pressure, surface pressure and restraint pressure. Weight pressure is formed by the weight of the body-shaping garment itself. Surface pressure is caused by the elasticity of the fabric and the looseness of the clothing or the excessive frictional resistance of the fabric when the human body is in dynamic contact with the garment. The restraint pressure is produced when the body is wrapped tightly in the body during exercise. The impact of the three on the human body depends on the specific situation. Generally, there are at most two of them in the plane of the human body, and sometimes only one kind of pressure exists. In the curved part of the human body, there may be two kinds of pressures or three kinds of pressures. In addition, the cause of the garment pressure of the corset is also related to the psychological factors of the human body.

A large number of studies have shown that the pressure comfort on clothing required by the human body under normal exercise conditions is about 0.49 to 2.6 kPa. However, due to the different wearers and wear parts, the degree of discomfort will vary [5]. In 1995, Pratt proved through a large number of experiments that the blood pressure of the capillaries on the surface of the human body is close to 1.96~3.92kPa. When the garment pressure reaches 5.88~9.8kPa, people will feel uncomfortable. When the garment pressure exceeds 9.8kPa, the human body is not able to withstand it [6]. When wearing a tight garment such as toning pants, if the leggings clothing pressure is less than 1.47 kPa, the human body basically does not feel the pressure. When the clothing is pressed at 1.47~2.46kPa, the human body feels comfortable pressure. At this time, the exercise can be strengthened. When the clothes of the pants are pressed at 2.46~3.92kPa, people begin to feel the pressure, but it is not enough to cause physiological harm. If the uncomfortable clothing pressure threshold reaches between 3.92 and 7.85 kPa, the wearer will feel extremely uncomfortable [7, 8].

### **2 Test method for pressure of shaping-underwear**

#### **2.1 Subjective testing method**

The evaluation of garment pressure produced by corsets has special characteristics. Shapewear will wrap the body tightly, so the comfort level is directly perceived by the body itself. Therefore, the subjective evaluation method is often used to study the clothing pressure. In order to quantify subjective feelings, psychological scales are often used in trials to assign different levels of sensation to different values, allowing

the wearer to mark the scale based on their wearing sensation. At the end of the test, the tester estimates the size of the value based on the marker. However, due to the large difference in subjective evaluation of individual feelings, simple subjective test can not accurately describe the comfort performance of clothing. So it is necessary to use instruments to obtain more objective results [9].

## 2.2 Objective testing method

Objective tests include direct measurement and indirect measurement. The direct test method is to place the sensor in some parts of the corset and the wearer in the dressing state, and directly measure the pressure value of the specific part. The direct test method is divided into many types, as shown in Table 1 [10, 11].

Table 1 – Several direct garment pressure testing methods

Test Methods	Principle	Advantages	Disadvantages
Fluid pressure test	Measuring the garment pressure value by reading the height change of the mercury column in the single tube or the height difference of the liquid level in the U-tube	Simple operation, light weight and small size	Low data reliability, without continuous dynamic measurement
Sensor measurement	Including piezoresistive type, capacitive strain type, piezoelectric type and pressure change detected by voltage or resistance value change	Light weight, small size, high precision, stable results, real-time measurement of continuous pressure distribution	Easy to be affected by factors such as radius of curvature, hardness, and elastic elongation of the fabric.
Air bag pressure tester	By applying pressure to the airbag filled with a certain amount of air, the pressure sensing member transmits the pressure to the input end of the strain gauge pressure sensor, and the change in pressure is detected as a change in voltage.	Good applicability, small error and good flexibility	Only point measurement can be performed, and local pressure distribution law cannot be predicted
Elastic fiber pressure test	The incident light is generated by the He-Ne laser generator, enters the optical fiber and is reflected back to the core from beginning to end. The elastic fiber is deformed by force to change the number of rays transmitted in the core layer. And the external force value of the elastic fiber can be obtained by the amount of light.	Simple structure, small size, being commonly used for socks, bandages and other ribbon fabric testing	Being restricted by pressure measurement site
FlexiForce Stress Test	Through the FlexiForce pressure sensor, the measured physical signal is converted into an electrical signal by the amplifying circuit, and then converted into a computer by the data acquisition system, and finally	Excellent technical characteristics and easy to use with continuous measurement and analysis	It is suitable for static measurement and the cost is high. Dynamic test can also be carried out when the measurement accuracy is not high.

	processed, analyzed and displayed by the computer.		
Virtual instrument based pressure test system	The signal collected by the sensor is processed and sent to the PC through the signal conditioning device and the data acquisition card. Finally, the data is analyzed by the Labview program.	It improves the measuring efficiency, realizes multi-point simultaneous measurement and real-time observation of pressure changes.	When measuring, the sample content is large, and it is necessary to master high theoretical knowledge of computer, physics, mathematics, etc.

Differences in the laboratory environment, temperature, humidity, and the physiological condition of the wearer will have a certain impact on the direct test results. In order to effectively avoid these interference factors, indirect measurement methods can be used. It is also divided into many types, as shown in Table 2 [12, 13, 14].

Table 2 – Several indirect garment pressure testing methods

Test Methods	Principle	Advantages	Disadvantages
Theoretical calculation method	Based on the establishment of the three-dimensional human body model, the garment pressure is theoretically calculated from the elongation deformation and curvature in all directions.	Various effects can be simulated to predict the pressure distribution	Pressure calculation results have large errors
Plaster method	Gypsum or synthetic resin is used to form a convex model that simulates the elbow, knee, etc. Holes are punched in the arch, and a pressure sensor is attached to measure the pressure on the raised part of the clothes.	The natural garment pressure at the time of dressing can be measured	The gypsum model material is hard and far from the softness of the human body.
Soft dummy method	The shape of the soft dummy is digitally scanned by a humanoid scan. And it has a special skeleton, soft tissue, smooth skin and a pair of easily changing artificial breasts.	The modulus of elasticity is similar to that of a real person, with a wide range of applications, saving time and cost.	Ignoring the effects of physical and psychological reactions on the body's stress

### 3 The relationship between fabric and garment pressure

As a kind of clothing with adjustment function, the corset is generally made of elastic fabric. Compared with ordinary fabric, elastic fabric has the mechanical characteristics of easy elongation, easy recovery and good elasticity. The elasticity of the fabric depends on the stretching of the fabric, while the garment pressure is caused by the compression of the fabric into the body. Therefore, the garment pressure must be related to the elongation of the fabric.

#### 3.1 Basic parameters of the fabric

In order to make the test results representative, five representative corset fabrics were purchased from the market, and the parameters are shown in Table 3.

Table 3 – Fabric parameters

Fabric number	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 5	Sample 5
Composition and content	5% spandex + 95% polyester	8% spandex + 92% polyester	12% spandex + 88% nylon	15% spandex + 85% nylon	18% spandex + 82% nylon
Gram (g/m <sup>3</sup> )	180	176	198	192	170

### 3.2 Fabric extension performance test

When the human skin is in motion, the maximum elongation of the longitudinal and transverse skin is 45% and 34%, respectively. Therefore, during normal wearing, the elongation of the garment material is similar to the skin elongation and will not exceed 50%. In this paper, the longitudinal and transverse tensile properties of elastic fabrics were tested using an electronic universal testing machine. The tensile curves of the five fabrics are shown in figure 1 and figure 2.

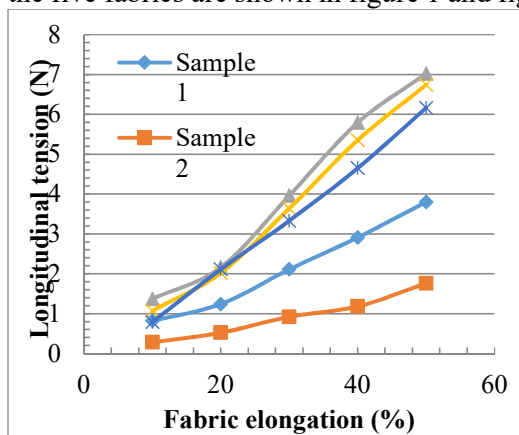


Figure 1 – Longitudinal tensile curve of the fabric

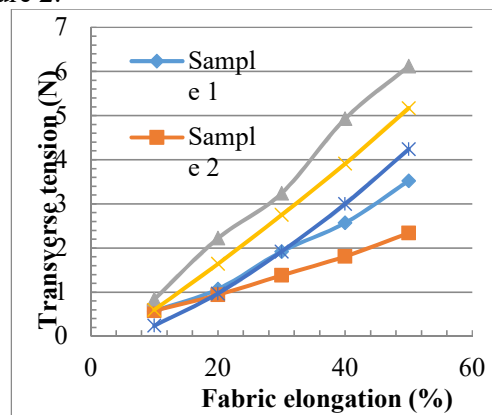


Figure 2 – Transverse tensile curve of the fabric

During the stretching process of the five fabrics, the tensile forces in both the longitudinal and transverse directions increased with the increase of the elongation. Moreover, in the initial stage of stretching, the sample can produce a large elongation deformation under the action of a small tensile force.

### 3.3 Research on garment pressure of body shaping fabric

In this paper, the pressure of the garment with a diameter of 9 cm on the human calf was measured with a sensor. Through curve fitting, the relationship between the garment pressure generated and the fabric elongation within the range of 50% was obtained, as shown in figure 3 and figure 4.

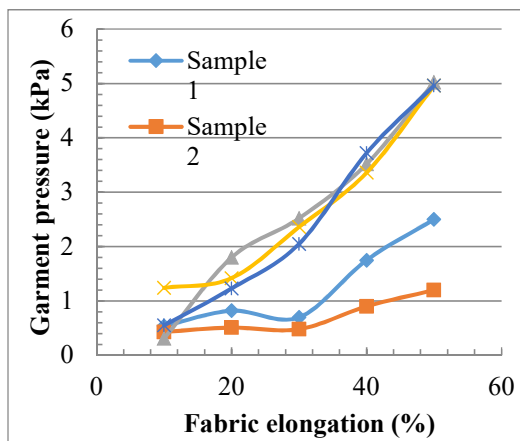


Fig 3 Longitudinal elongation and pressure curve of fabric

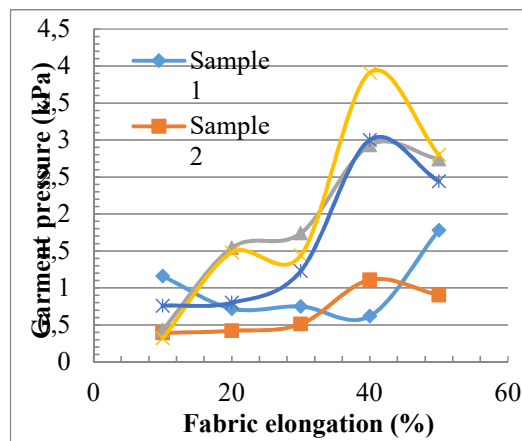


Fig 4 Transverse elongation and pressure curve of fabric

Except for sample 1, during the longitudinal stretching of the fabric, the garment pressure increases linearly with the tensile elongation, which may be caused by the different spandex content of the fabric or the different fabric structure. Compared with the transverse stretching, the longitudinal stretching has a greater impact on the garment pressure generated by the human body, which may be because the garment pressure is mainly caused by the longitudinal stretching of the fabric.

#### 4 Concluding remarks

The paper starts with the reasons for the garment pressure on the body moulding underwear and summarizes the principles, advantages and disadvantages of various methods of testing body shaping clothes. At the same time, this paper also focuses on the relationship between the extension of some elastic fabrics and the garment pressure. This kind of discussion is limited to the surface. It is also necessary to experiment with more elastic fabrics to study the specific relationship between fabric and garment pressure.

#### References

1. Zhou J., Wang A.X., Liu S.S. // Journal of Xi'an Polytechnic University. – 2018. – V. 32. – No. 2. – P. 152–157.
2. Liu X.H. // Beijing institute of Fashion Technology. – 2017.
3. Guo Z.R., Xu J., Liu X.T. // Journal of Xi'an Polytechnic University. – 2012. – V. 26. – No. 2. – P. 168–173.
4. Gaied I., Drapier S., Lun B. // Journal of Biomechanics. – 2006. – V. 39. – No. 16. – P. 3017–3025.
5. Wang Q., Chen D.S., Wei Q.F. // Journal of Textile Research. – 2009. – V. 30. – No. 4. – P. 139–144.
6. Pratt J., West G. // United Kingdom: Bath Press, 1995.
7. Makabe H., Momota H., Mitsuno T. // Seni Gakkaishi. – 1993. – V. 49. – No. 10. – P. 513–521.
8. Liao L.X. // Suzhou University. – 2012.
9. Chen D.S., Liu H., Wang L.Z. // Advanced Textile Technology. – 2012. – V. 20. – No. 4. – P. 53–58.
10. Lee Y., Hong K. // Textile Research Journal. – 2013. – V. 83. – No. 15. – P. 1594–1605.
11. Hu Y.Q., Zhang H., Deng Y.M. // China Textile Leader. – 2015. – No. 5. – P. 70–72.

12. Ishimaru S., Isogai Y., Matsui M. et al. // Textile Research Journal. – 2011. – V. 81. – No. 18. – P. 1851–1870.

13. Ma L., Zhang X., Ying B.A. et al. // Shandong Textile Science & Technology. – 2018. – V. 59. – No. 4. – P. 27–29.

14. Yu W., Fan J., Qian X. // Fiber. – 2004. – V. 60. – No. 2. – P. 57–64.

УДК 691.32

### СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ С МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

© Э. В. Бадмаева<sup>1</sup>, Л. А. Урханова<sup>2</sup>, С. А. Лхасаранов<sup>3</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1

E-mail: <sup>1</sup>e.v.badmaeva330@gmail.com, <sup>2</sup>urkhanova@mail.ru, <sup>3</sup>solbon230187@mail.ru

*В статье рассмотрены вопросы применения различных минеральных материалов для модификации портландцемента с целью получения сухих строительных смесей. Основным компонентом в составе сухих строительных смесей, влияющим на его физико-механические и технологические свойства является портландцемент. Для модификации портландцемента, используемого для получения сухих строительных смесей, были использованы различные микро- и нанодобавки: вулканический шлак, микрокремнезем, нанокремнезем. Определены физико-механические показатели модифицированного портландцемента в различные сроки твердения. Введение микро- и нанодобавок положительно сказывается на процессе гидратации портландцемента, что подтверждается исследованием микроструктуры модифицированного цементного камня с применением растровой электронной микроскопии. Установлено, что при использовании различных микро- и нанодобавок происходит изменение количества низкоосновных гидросидкатов кальция, влияющих на повышение физико-механических показателей цементного камня.*

**Ключевые слова:** сухие строительные смеси, портландцемент, нанокремнезем, микрокремнезем, вулканический шлак, микроструктура.

### DRY MIXES ON THE BASIS OF COMPOSITE BINDERS WITH MODIFIED ADDITIVES

E. V. Badmaeva<sup>1</sup>, L. A. Urkhanova<sup>2</sup>, S. A. Lkhasaranov<sup>3</sup>

East Siberia State University of Technology and Management

670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., building 1

E-mail: <sup>1</sup>e.v.badmaeva330@gmail.com, <sup>2</sup>urkhanova@mail.ru, <sup>3</sup>solbon230187@mail.ru

*The article discusses the use of various mineral materials for the modification of Portland cement in order to obtain dry mixtures. The main component in the composition of dry building mixtures that affect its mechanical and technological properties is Portland cement. For the modification of Portland cement used to obtain dry building mixtures, various micro and nano-additives were used: volcanic slag, silica fume, nanosilica. The mechanical properties of the modified Portland cement at various curing times were determined. The introduction of micro- and nano-additives has a positive effect on the process of hydration of Portland cement, which is confirmed by the study of the microstructure of the modified cement stone using scanning electron microscopy. It has been established that with the use of various micro- and nano-*

additives, there is a change in the amount of low-basic calcium hydrosilicates, which influence the increase in the mechanical parameters of the cement stone.

**Keywords:** dry building mixes, portland cement, nanosilica, microsilica, volcanic slag, microstructure.

Основные исследования при проектировании составов сухих строительных смесей направлены на улучшение показателей технологичности и уменьшения себестоимости их производства за счет применения композиционных материалов оптимальной структуры на основе цемента, смешанных композиционных вяжущих веществ, мелкого заполнителя оптимальной гранулометрии, тонкодисперсных наполнителей и химических добавок [1-5].

Применение для модификации сухих строительных смесей наноразмерных модификаторов не только активно влияет на процессы структурообразования при гидратации цемента [6], но и улучшает технологические свойства смесей. Введение наномодифицирующих добавок приводит к существенному изменению физико-механических показателей. Для сравнительного анализа проведены эксперименты по определению физико-механических показателей цементного камня (ПЦ) модифицированного микро- (МК) и нанокремнеземом (НК), вулканическим шлаком (ВШ) (рисунок 1).

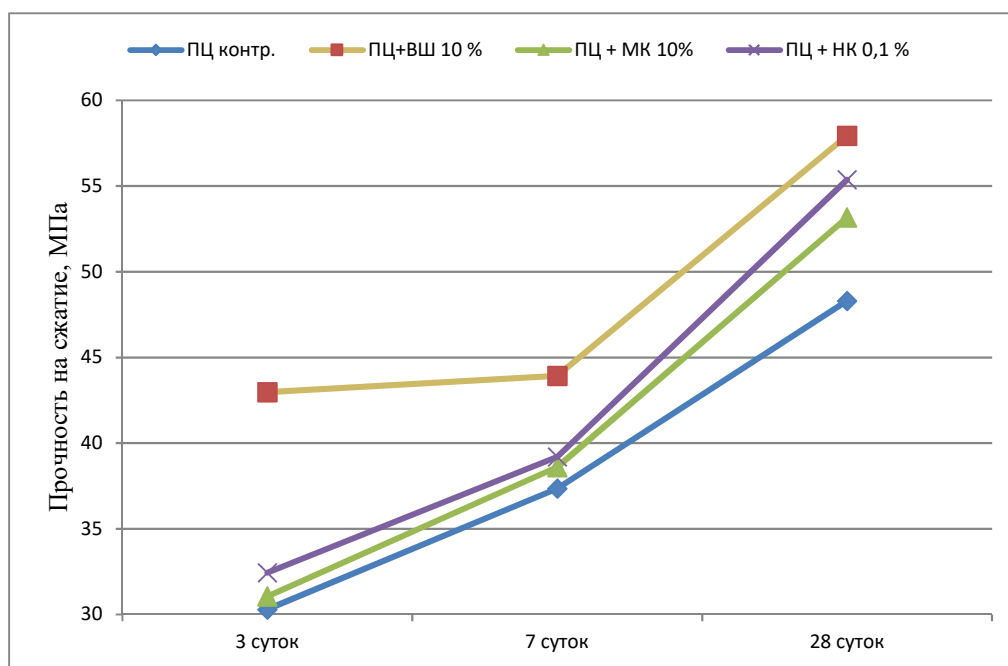


Рисунок 1 – Физико-механические показатели модифицированного цементного камня

Теоретическими исследованиями и результатами экспериментов установлено, что оптимальная дозировка микрокремнезема лежит в пределах 10%. Поскольку полное связывание гидроксида кальция снижает рН поровой жидкости и тем самым отрицательно сказывается на стабильности кальциево-силикатного гидрогеля и на коррозионной стойкости арматуры. Кинетика набора прочности модифицированного цементного камня показывает, что при использовании вулканического шлака получены максимальные показатели, связанные с пуццоланиче-



ской активностью и структурообразующим действием шлака. Показатели микро- и нанокремнезема несколько ниже, что возможно связано с нерациональным интервалом дозирования. Механизм действия модифицирующих добавок связан с изменением структуры композита.

Изменения физико-механических свойств модифицированных вяжущих композиций и ССС на их основе связано с изменением его структуры. Микрофотографии сколов модифицированных композитов в сравнении с контрольным бездобавочным составом показали значительное различие в сформировавшейся структуре композитов (рисунок 2).

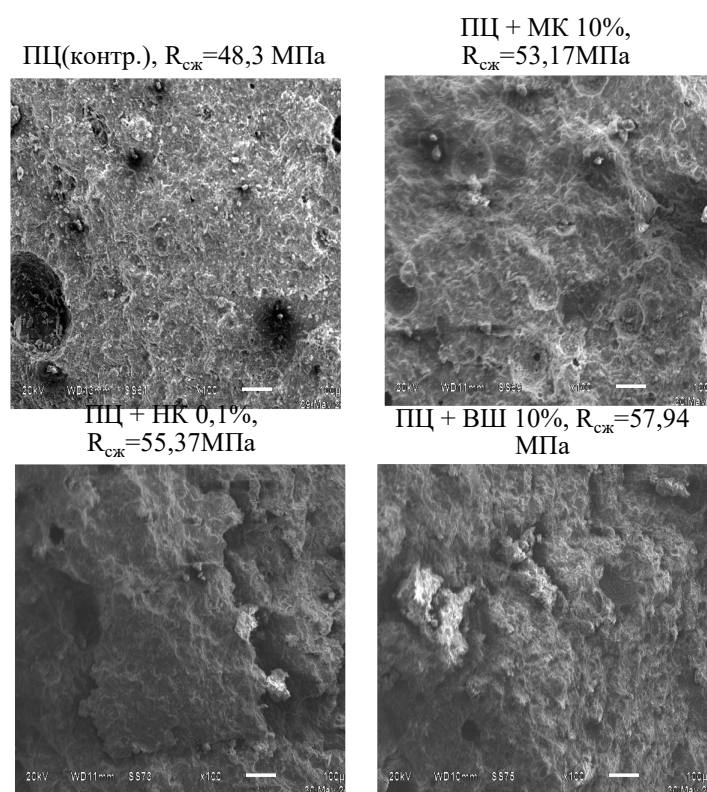


Рисунок 2 – Микроструктура (x500) модифицированного цементного камня в возрасте 28 суток

В исходном цементном камне из-за неплотной укладки частиц цемента имеются поры, в процессе твердения это пространство заполняют кристаллы извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Микроструктура образцов с использованием ВШ, МК и НК более плотная по сравнению с контрольным составом. Введение минеральных добавок приводит к снижению капиллярной пористости, и в то же время приводит к увеличению количества мельчайших гелевых пор, входящих в состав кальциевосиликатного гидрогеля.

Наличие в ВШ кремнезема с дефектной кристаллической решеткой; приводит к созданию высокоплотной структуры цементного камня за счет связывания портландита и дополнительного образования гидросиликатов кальция. Снижает-

ся содержание капиллярных пор, при росте гелевой пористости. МК оказывает положительное влияние на структуру переходной зоны; толщина сопоставима с размерами цементных зерен. Отмечается густое микроармирование матрицы, что приводит к повышению плотности и прочности композита. Стоит отметить, что структура при введении НК показала устойчивую тенденцию созданию прочного единого конгломерата, отмечаются объемные прорастания гидросиликатов кальция по всему объему.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что составы композиционных вяжущих с вулканическим шлаком отличаются улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, введение нанокремнезема в состав вяжущих оказывает благоприятное воздействие на технологические и физико-механические свойства композитов.

Исследование микроструктуры модифицированных цементных композитов, показало различие и благоприятное структурообразующее воздействие вулканического шлака и нанокремнезема. Введение активных минеральных микро- и нанодобавок приводят к созданию плотной структуры и росту числа новообразований.

#### *Литература*

1. *Баженов Ю.М.* Технология сухих строительных смесей: учебное пособие / Ю.М. Баженов, В.Ф. Коровяков, Г.А. Денисов. – Москва: АСВ, 2003. – 96 с.
2. *Загороднюк Л.Х.* Композиционное вяжущее на основе комплексного органоминерального модификатора для сухих ремонтных смесей / Л.Х. Загороднюк, В.С. Лесовик, А.В. Шамшуров, Д.А. Беликов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 5. – С. 25-31.
3. *Козлов В.В.* Сухие строительные смеси / В.В. Козлов. – Москва: АСВ, 2000. – 96 с.
4. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ / В.С. Лесовик [и др.] // Строительные материалы. – 2014. – № 7. – С. 82-85.
5. *Лесовик В.С.* К проблеме проектирования сухих ремонтных смесей с учетом строения структур / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, Д.А. Беликов // Вестник РААСН. – 2014. – № 18. – С. 112-119.
6. *Урханова Л.А.* Модифицированный бетон с применением нанокремнезема: монография / Л.А. Урханова, С.А. Лхасаранов, С.П. Бардаханов. – Улан-Удэ: Издательство ВСГУТУ, 2014. – 104 с.

#### *References*

1. *Bazhenov Yu. M., Korovyakov V.F., Denisov G.A.* Technology of dry building mixes: study guide. – Moscow: DIA, 2003. – 96 p.
2. *Zagorodnyuk L.Kh., Lesovik V.S., Shamshurov A.V., Belikov D.A.* // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov. – 2014. – No. 5. – P. 25-31.
3. *Kozlov V.V.* Dry mixes. – Moscow: DIA, 2000. – 96 p.
4. *Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Belikov D.A., Shchekina A.Yu., Kuprina A.A.* // Construction materials. – 2014. – No. 7. – P. 82-85.
5. *Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Belikov D.A.* // Vestnik RAASN. – 2014. – No. 18. – P. 112-119.
6. *Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P.* Modified concrete using nanosilica: monograph. – Ulan-Ude: ESSUTM Press, 2014. – 104 p.

## МНОГОСЛОЙНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Л. А. Бохоева<sup>1</sup>, Г. П. Садовский<sup>2</sup>, С. С. Гуртовой<sup>3</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, стр. 1  
E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>rooper2582@gmail.com, <sup>3</sup>rempel.serzh@mail.ru

*В работе проведен анализ современного состояния исследований многослойных защитных конструкций из композиционных материалов и создания эффективной защиты аппаратов от мелкого космического мусора. Представлены виды защитных экранов для космических аппаратов от мелкого космического мусора. Выполнена 3D-модель защитного экрана для космического аппарата в программном комплексе SolidWorks из слоистых композиционных материалов. Защитный экран состоит из прочных многослойных внешних панелей и расположенного между ними сотового заполнителя.*

**Ключевые слова:** космические аппараты, композиционные материалы, защитные экраны, космический мусор, SolidWorks, ANSYS.

## MULTILAYER PROTECTIVE STRUCTURES MADE OF COMPOSITE MATERIALS

L. A. Bokhoeva<sup>1</sup>, G. P. Sadovsky<sup>2</sup>, S. S. Gurtovoy<sup>3</sup>

East Siberia State University of Technology and Management  
670013, Russian Federation, Ulan-Ude, bldg. 1 40v Klyuchevskaya St.  
E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>rooper2582@gmail.com, <sup>3</sup>rempel.serzh@mail.ru

*The paper analyzes the current state of research of multilayer protective structures made of composite materials and the creation of effective protection of vehicles from small space debris. Presents types of protective screens for spacecraft from small space debris. The 3D model of the protective screen for the spacecraft in the SolidWorks software complex of layered composite materials. The protective screen consists of durable multi-layered external panels and honeycomb core located between them.*

**Keywords:** spacecraft, composite materials, protective screens, space debris, SolidWorks, ANSYS.

### Введение

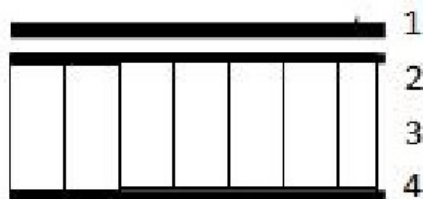
В данной работе сделан обзор работ и сделан анализ современного состояния исследований многослойных защитных конструкций из композиционных материалов. Проанализированы теоретические и экспериментальные работы отечественных и зарубежных авторов по направлению: оценка повреждений космических аппаратов от воздействия высокоскоростных частиц космического мусора и создания эффективной защиты аппаратов от мелкого космического мусора.

Значительный рост космических аппаратов (КА) на орбите приводит к сильному росту засорения космического пространства, что представляет собой потенциальную угрозу для долговременной безопасности космической деятельности и прямую угрозу безопасной жизнедеятельности людей околоземного пространства [1]. В настоящее время существует несколько возможных решений проблемы космического мусора. Увод объектов космического мусора с орбиты и кинематическое воздействие фрагментов мусора на КА представлены в работах

[2, 3]. В работах [4, 5] рассмотрены проблема управления движением КА при подлете к объекту космического мусора и разработка алгоритма предварительной фильтрации объектов космического мусора

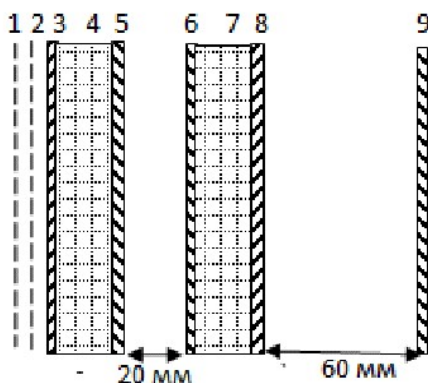
Ввиду сосредоточения на низких орбитах большого количества космического мусора, для низкоорбитальных КА задача проектирования многослойных корпусов и защитных экранов из композиционных материалов особенно актуальна. Повреждение КА зависит от свойств материала и интенсивности потоков сверхскоростных частиц. Встречи КА с крупными фрагментами космического мусора редки и однозначно заканчиваются катастрофой. Повреждение КА зависит от интенсивности потоков сверхскоростных частиц и свойств материала. Анализ повреждений КА при скорости соударения от 0,01 до 1,5 км/с показал, что происходит расслаивание слоев в многослойных корпусах и их защитных экранах [6, 7]. Не смотря на всю ценность представленных исследований, столкновение КА с объектами космического мусора в ряде случаев сегодня является неизбежным, поэтому требуются новые исследования многослойных композитных защитных конструкций с техногенными дефектами, возникшими вследствие воздействия высокоскоростных частиц космического мусора [8-13].

В работе [14] проведен анализ существующих защитных экранов космических аппаратов. Однослойный экран (рисунок 1), состоящий из двух металлических листов (верхний и нижний) и сотового наполнителя. Такой экран не способен защитить КА от частиц мусора, превосходящих толщину самого экрана.



1 – защищаемая поверхность; 2 – передняя стенка; 3 – соты; 4 – задняя стенка  
Рисунок 1 – Схема экрана из трехслойной панели

Эффективным способом защиты от частиц космического мусора различных размеров являются защитные экраны в виде панелей (рисунок 2), состоящих из слоев различных материалов (сэндвич-панели).

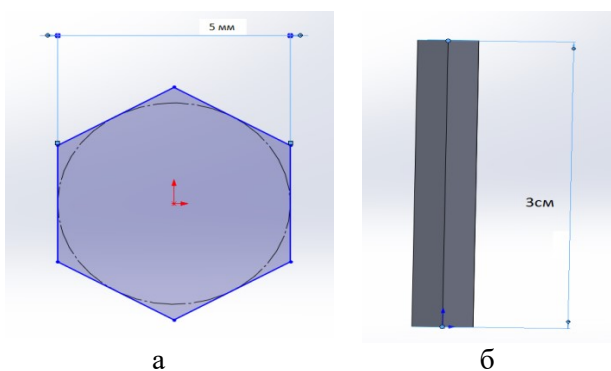


1, 2 – сетка из толстой проволоки; 3, 5, 6, 8 – алюминиевые стенки; 4, 7 – соты алюминиевые; 9 – защищаемая конструкция космического аппарата  
Рисунок 2 – Сэндвич-панели с двумя экранами из сотопанелей и сетки

### Моделирование

В работе была выполнена 3D модель защитного экрана для КА в программном комплексе SolidWorks из слоистых композиционных материалов [15, 16]. Данная программа предназначена для создания твердотельных и оболочных моделей деталей, обеспечивает моделирование изделий любой степени сложности и назначения и поддерживает поверхностное моделирование.

Модель защитного экрана состоит из двух тонких многослойных панелей, между которыми находится сотовый наполнитель. В программе была смоделированы соты с шестигранной ячейкой, шириной 5 мм, высотой 3 см (рисунок 3а, б). В программе SolidWorks в режиме «Сборка» создан сотовый наполнитель (рисунок 4): созданы вспомогательные плоскости, нарисован контур с помощью сплайнов на созданных плоскостях. Далее, были смоделированы две многослойные панели (передняя и задняя) и создана полная модель защитного экрана (рисунок 5).



а – ширина соты, б – высота соты  
Рисунок 3 – Модель соты

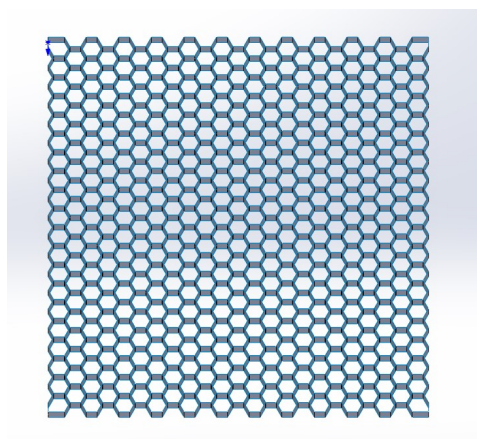


Рисунок 4 – Сотовая составляющая экрана

Расчеты на прочность и жесткость будут выполнены в программном комплексе ANSYS с помощью модулей Fluid Flow (Fluent), расчет композиционного материала в модуле Composite PrePost и в Direct Optimization, оптимизация с использованием Adaptive Single-Objective Optimization (программа адаптивной одноцелевой оптимизации) [17, 18]. В качестве материала для сотового слоя вы-

бран стеклопластик, обладающий высокими жесткостными и прочностными характеристиками. Для верхней и нижней панелей выбран материал углепластик.

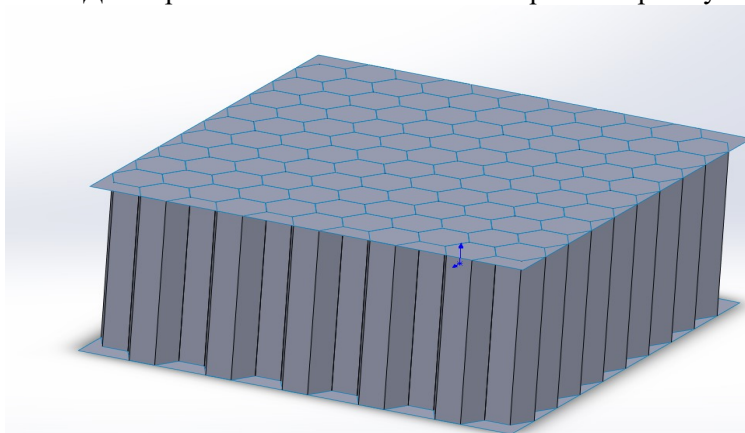


Рисунок 5 – 3D-модель защитного экрана

### **Вывод**

Проведен анализ современного состояния исследований многослойных защитных конструкций из композиционных материалов и создания эффективной защиты аппаратов от мелкого космического мусора. Несмотря на всю ценность представленных исследований, требуются новые исследования многослойных композитных защитных конструкций с техногенными дефектами, возникшими вследствие воздействия высокоскоростных частиц космического мусора.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-18050/18.

### *Литература*

1. *Зеленцов В.В.* Проблемы мелкого космического мусора / В.В. Зеленцов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 04. – С. 89-104.
2. *Steindorfer M.A.* Наблюдение и преследование объектов космического мусора с использованием данных по направлению в реальном времени / M.A. Steindorfer, G. Kirchner, F. Koidl, P. Wang // Adv. Space Res. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 1201-1209.
3. *Богданова В.С.* Методы защиты космических аппаратов от внешних воздействий / В.С. Богданова, Д.А. Замятин, В.В. Кольга // Решетневские чтения. – 2017. – С. 9-10.
4. *Felicetti L.* Отношение координации нескольких космических аппаратов для наблюдения за космическим мусором / L. Felicetti, M.R. Emami // Adv. Space Res. – 2017. – V. 59. – №. 5. – P. 1270-1288.
5. *Баранов А.А.* Методика выявления и оценки сближений космического аппарата с объектами космического мусора [Электронный ресурс] / А.А. Баранов, М.О. Каратунов // Инженерный журнал: Наука и инновации. – 2016. – № 4 (52). – Режим доступа: <http://engjournal.ru/articles/1485/1485.pdf>.
6. *Герасимов А.В.* Защита космического аппарата от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование / А.В. Герасимов, С.В. Пашков, Ю.Ф. Христенко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – №4 (16). – С. 70–78.
7. Новая концепция защиты космических аппаратов от микрометеороидов и орбитального мусора / А.И. Малкин [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 436. – № 4. – С. 470-473.
8. *Михайловский К.В.* Прогнозирование зарождения и эволюции дефектов в материалах композитных конструкций многоцветных космических аппаратов на основе много-

масштабного математического моделирования / К.В. Михайловский, С.В. Резник, С.О. Юрченко // Вестник МГТУ. Серия «Приборостроение». – 2010. – С. 30-43.

9. Плазменный метод обнаружения дефектов изоляции в бортовой аппаратуре космических аппаратов / А.В. Батраков [и др.] // Решетневские чтения: Материалы 19 Международной научной конференции. – Красноярск: Издательство СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, 2015. – Ч. 1. – С. 272-274.

10. Герасимов А.В. Высокоскоростное взаимодействие естественных и техногенных частиц с элементами космических аппаратов / А.В. Герасимов, С.В. Пашков, Ю.Ф. Христенко, Р.О. Черепанов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 117-133.

11. Устойчивость космического корабля к орбитальному мусору / S. Heinrich [и др.] // 6 IAASS Conference "Safety is Not an Option". – 2013. – Montreal. – С. 25-34.

12. Бохоева Л.А. Особенности расчёта на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами / Л.А. Бохоева. – Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ, 2007. – 192 с.

13. Bokhoeva L.A. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects / L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov, A.S. Chermoshentseva, D.V. Lobanov // Proceedings of VII International Scientific Practical Conference «Innovative Technologies in Engineering». – National Research Tomsk Polytechnic University. – 2016. – С. 12077.

14. Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора / В.В. Зеленцов / Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 06. – С. 123–142.

15. Бохоева Л.А. Моделирование элементов конструкции беспилотного летательного аппарата в программном комплексе SolidWorks / Л.А. Бохоева, А.А. Буторин, С.А. Биров, А.Н. Кондратьева, Д.Н. Ипатов // Механика XXI века. – 2018. – № 17. – С. 281-286.

16. Бохоева Л.А. Моделирование и технология изготовления конструкций авиационной техники из композиционных материалов / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, А.С. Чермошнцева, А.В. Перевалов // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 2 (41). – С. 12-18.

17. Бохоева Л.А. Экспериментальное определение характеристик сопротивления усталости изделий авиационной техники / Л.А. Бохоева [и др.] // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 5 (44). – С. 46-53.

18. Бохоева Л.А. Испытание изделий авиационной техники с применением нового программного обеспечения для сбора, обработки данных и построения текущего состояния деформированного изделия / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, К.А. Филиппова // Вестник ВСГУТУ. 2015. № 4 (55). С. 20-25.

#### References

1. Zelentsov V.V. // Science & Education. Scientific edition of Bauman MSTU. – 2015. – No. 04. – P. 89-104.

2. Steindorfer M.A., Kirchner G., Koidl F., Wang P. // Adv. Space Res. – 2017. – V. 60. – No. 6. – P. 1201-1209.

3. Bogdanova V.S., Zamyatin D.A., Kolga V.V. // Reshetnyovskie chteniya. – 2017. – P. 9-10.

4. Felicetti L., Emami M.R. // Adv. Space Res. – 2017. – V.59. – No. 5. – P. 1270-1288.

5. Baranov A.A., Karatunov M.O. [Electronic resource] // Engineering Journal: Science and Innovation. – 2016. – No. 4 (52). – URL: <http://engjournal.ru/articles/1485/1485.pdf>.

6. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Christenko Yu.F. // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2011. – No. 4 (16). – P. 70-78.

7. Malkin A.I., Zanozin V.M., Kononenko M.M., Toporov Yu.P., Shumikhin T.A., Tsivadze A.Yu. // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 436. – No. 4. – P. 470-473.

8. *Mikhailovskii K.V., Reznik S.V., Yurchenko S.O.* // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. – 2010. – P. 30-43.
9. *Batnikov A.V., Popov S.A., Nefyodtsev E.V., Dubrovskaya E.L., Shnaider A.V.* // Reshetnyovskie chteniya: proceedings of 19<sup>th</sup> International Scientific Conference. – Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Press. – 2015. –Part 1. – P. 272-274.
10. *Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Khristenko Yu.F., Cherepanov R.O.* // Mechanics of composite materials and structures. – 2017. – V. 23. – No. 1. – P. 117-133.
11. *Heinrich S., Legloire D., Tromba A., Tholot M., Nold O.* // 6 IAASS Conference "Safety is Not an Option". – 2013. – Montreal. – P. 25-34.
12. *Bokhoeva L.A.* Osobennosti raschyota na prochnost elementov konstruktssii iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami. – Ulan-Ude: ESSTU Press, 2007. – 192 p.
13. *Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S., Lobanov D.V.* // Proceedings of VII International Scientific Practical Conference «Innovative Technologies in Engineering». – National Research Tomsk Polytechnic University. – 2016. – P. 12077.
14. *Zelentsov V.V.* // Science & Education. Scientific edition of Bauman MSTU. – 2015. – No. 06. – P. 123–142.
15. *Bokhoeva L.A., Butorin A.A., Bairov S.A., Kondratieva A.N., Ipatov D.N.* // Mechanical engineers to XXI century. – 2018. – No. 17. – P. 281-286.
16. *Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Chermoshentseva A.S., Perevalov A.V.* // ESSUTM Bulletin. – 2013. – No. 2 (41). – P. 12-18.
17. *Bokhoeva L.A., Perevalov A.V., Chermoshentseva A.S., Kurokhtin V.Yu., Lygdenov B.D., Rogov V.E.* // ESSUTM Bulletin. – 2013. – No. 5 (44). – P. 46-53.
18. *Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Filippova K.A.* // ESSUTM Bulletin. – 2015. – No. 4 (55). – P. 20-25.

УДК 678.74.41

## **МОДИФИКАЦИЯ ФТОРПОЛИМЕРАМИ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

© **Т. А.Исакова<sup>1</sup>, П. Н.Петрова<sup>2</sup>**

ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН Институт проблем нефти и газа СО РАН  
677007, Россия, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20  
E-mail: <sup>1</sup>tanchik1985@mail.ru, <sup>2</sup>ppavlina@yandex.ru

*Создание полимерных композиционных материалов ПКМ – одно из направлений современного материаловедения. Перспективным методом разработки ПКМ с улучшенным комплексом свойств является метод введения модифицированного наполнителя в полимерную матрицу.*

*В данной работе приводятся результаты исследований по разработке технологии модификации наполнителя полимерными макромолекулами для получения новых композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Показана перспективность использования совместной механической активации компонентов для поверхностной модификации наполнителя – природных цеолитов. Исследованы ползучесть полимерных композитов и деформационно-прочностные свойства при растяжении и сжатии. При использовании в качестве поверхностного модификатора цеолита фторопласта марки Ф-42 наблюдается существенное повышение жесткости материалов, что способствует снижению ползучести композитов в 2-2,75 раза по сравнению с исходным ПТФЭ.*



**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, полимерные композиционные материалы, наполнители, совместная механоактивация, деформационно-прочностные свойства, ползучесть.

## MODIFICATION BY FLUOROPOLYMERS OF THE FILLERS WHEN DEVELOPING NEW POLYMERIC COMPOSITES ON THE BASIS OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE

T. A. Isakova<sup>1</sup>, P. N. Petrova<sup>2</sup>

Institute of oil and gas problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
677007, Russia, Yakutsk, Avtodorozhnaya St., 20  
E-mail: <sup>1</sup>tanchik1985@mail.ru, <sup>2</sup>ppavlina@yandex.ru

*Creation of the polymeric composites PC is one of the directions of the modern materials science. A perspective method of development of PC with the improved complex of properties is the method of introduction of the modified filler to a polymeric matrix.*

*Results of researches on development of technology of modification of the filler by polymeric macromolecules for receiving new composites on the basis of polytetrafluoroethylene are given in this work. The prospects of use of collateral mechanical activation of components for the superficial modification of a filler – natural zeolites are shown. The creep of polymeric composites and straining and strength properties at stretching and compression are investigated. When using as the superficial modifier of zeolite of fluoroplastic of F-42 brand significant increase in a rigidity of materials is observed that promotes decrease in creep of composites by 2-2.75 times in comparison with initial PTFE.*

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, polymeric composites, fillers, collateral mechanoactivation, straining and strength properties, creep.

Полимерные композиционные материалы ПКМ в настоящее время находят широкое применение во всех областях техники. Среди полимеров, применяемых в качестве уплотнительных и антифрикционных материалов, политетрафторэтилен ПТФЭ занимает особое место. Он обладает высокой химической стойкостью, низким коэффициентом трения, повышенным морозо- и термостойкостью, имеет превосходные механические и электроизоляционные свойства [1]. Наряду с достоинствами ПТФЭ обладает и рядом недостатков, в частности низкая износостойкость материала. Одним из способов ее устранения является разработка композитов на основе ПТФЭ с введением модифицированного наполнителя в полимерную матрицу [2].

Модификация поверхностей частиц наполнителя очень важна при достижении максимально возможной его дисперсности в полимере, а также для формирования прочной адгезионной связи на границе раздела фаз полимер-наполнитель.

В данной работе приводятся результаты исследований по разработке технологии модификации наполнителя фторполимерами для получения новых композиционных материалов на основе политетрафторэтилена.

Объектами исследования являлись политетрафторэтилен ПТФЭ и композиты на его основе. Наполнителем ПКМ была выбрана природная цеолитовая порода, представляющая собой алюмосиликатные минералы. Цеолиты относятся к сорбентам с микропористой структурой, обладают высокой адсорбционной активностью и молекулярно-ситовыми свойствами. Для повышения реакционной способности во всех случаях использовался механоактивированный цеолит.

В качестве модификаторов поверхности наполнителя были использованы фторполимеры марки Ф-2М и Ф-42. Фторполимер марки Ф-2М ТУ 6-05-1781-84 – поливинилиденфторид, модифицированный гексафторпропиленом с температурой плавления 155-165 °С. Он обладает высокой механической прочностью, твердостью, отсутствием хладотекучести под нагрузкой. Была разработана технология совмещения цеолитов с фторполимерами – это механоактивация в планетарной мельнице Pulverizette 5 фирмы Fritch при скорости вращения 200 оборотов/мин в течение 2 мин. При изготовлении образцов использовали технологию холодного прессования и спекание по заданному режиму.

В таблице 1 приведены результаты исследования свойств ПКМ на основе ПТФЭ и цеолита, модифицированного фторполимером марки Ф-2М.

Таблица 1 – Деформационно-прочностные характеристики ПКМ на основе ПТФЭ и цеолита, модифицированного фторполимером Ф-2М

Состав	Соотношение Ф-2М:цеолит	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E_p$ , МПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$ при деформации 25%, МПа	$E_{сж}$ , МПа
ПТФЭ	-	18,5	281,0	468,7	2,19	25	437,2
ПТФЭ + 1% (Ф-2М:цеолит)	1:1	15,4	347,9	543,4	2,19	25	377,2
ПТФЭ + 2% (Ф-2М:цеолит)	1:1	13,2	325,3	592,1	2,17	25	388,5
ПТФЭ + 5% (Ф-2М:цеолит)	1:1	11,9	257,6	575,1	2,12	25	371,9
ПТФЭ + 1% (Ф-2М:цеолит)	1:2	15,1	355,9	548,3	2,17	24	418,7
ПТФЭ + 2% (Ф-2М:цеолит)	1:2	10,5	202,5	674,2	2,19	26	466,6
ПТФЭ + 5% (Ф-2М:цеолит)	1:2	11,8	248,1	578,6	2,15	26	431,8
ПТФЭ + 1% (Ф-2М:цеолит)	2:1	15,1	353,4	578,7	2,17	26	499,7
ПТФЭ + 2% (Ф-2М:цеолит)	2:1	10,2	134,3	790,9	2,16	26	450,4
ПТФЭ + 5% (Ф-2М:цеолит)	2:1	11,6	240,1	546,6	2,09	24	302,9

*Примечание:*  $\sigma_p$ - предел прочности при растяжении;  $\epsilon_p$  -относительное удлинение при разрыве;  $E_p$  -модуль упругости при растяжении;  $\rho$  – плотность;  $\sigma_{сж}$ - предел прочности при сжатии;  $E_{сж}$  -модуль упругости при сжатии.

Малое количество наполнителя повышает модуль упругости и относительное удлинение при разрыве композитов на 20-50% по сравнению с исходным полимером при небольшом снижении показателя прочности при растяжении. Механические характеристики при сжатии остаются на уровне исходного полимера.

Влияние модифицированного фторполимером Ф-42 цеолита на деформационно-прочностные характеристики ПКМ на основе ПТФЭ представлены в таблице 2. Фторполимер марки Ф-42 ГОСТ 25428-82 – сополимер винилиденфторида с тетрафторэтиленом с температурой плавления

150-160 °С. Он обладает высокой прочностью и химической стойкостью, антифрикционными свойствами, стойкостью к световому старению.

Таблица 2 – Деформационно-прочностные характеристики ПКМ на основе ПТФЭ и цеолита, модифицированного фторполимером Ф-42

Состав	Соотношение Ф-42:цеолит по массе	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E_p$ , МПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$ при дефор-м 25%, МПа	$E_{сж}$ , МПа
ПТФЭ	-	18,5	281,0	468,7	2,19	25	437,2
ПТФЭ + 1% (Ф-42:цеолит)	1:1	14,4	317,9	594,0	2,18	25	469,4
ПТФЭ + 2% (Ф-42:цеолит)	1:1	13,7	374,6	647,3	2,18	25	443,0
ПТФЭ + 5% (Ф-42:цеолит)	1:1	9,1	4,90	860,3	2,15	26	435,3
ПТФЭ + 1% (Ф-42:цеолит)	1:2	15,1	343,1	562,0	2,18	26	407,0
ПТФЭ + 2% (Ф-42:цеолит)	1:2	11,5	295,9	713,3	2,17	26	431,2
ПТФЭ + 5% (Ф-42:цеолит)	1:2	9,70	3,7	1002,3	2,19	23	490,7
ПТФЭ + 1% (Ф-42:цеолит)	2:1	14,1	305,2	617,0	2,18	26	407,8
ПТФЭ + 2% (Ф-42:цеолит)	2:1	10,7	4,1	1037,1	2,18	25	349,6
ПТФЭ + 5% (Ф-42:цеолит)	2:1	10,6	14,4	773,0	2,14	24	400,2

Как известно [3], одной из основных задач, решаемых при введении наполнителей в полимерные матрицы, является повышение жесткости последних, которая характеризуется величиной модуля упругости. У образцов состава ПТФЭ + 2 мас.% (Ф-42: цеолит) при массовом соотношении 2:1 и ПТФЭ + 5 мас.% (Ф-42: цеолит) при соотношении 1:2 выявлены повышение значений модуля упругости в 2-2,5 раза по сравнению с исходным полимером, что указывает на существенное повышение жесткости материалов.

Ползучесть отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах несущих деталей, так как в результате могут развиваться большие деформации, превышающие допустимые нормы, что приводит к исключению дальнейшей эксплуатации данного изделия. Ползучестью называется процесс нарастания остаточной деформации во времени при постоянной нагрузке и температуре. Это свойство проявляется даже у весьма жестких полимеров и обусловлено развитием как пластической, так и квазипластической деформации [4]. На рисунке 1 приведены кривые зависимости относительного удлинения от времени при нагрузке 7,5 МПа исходного ПТФЭ и полимерных композитов.

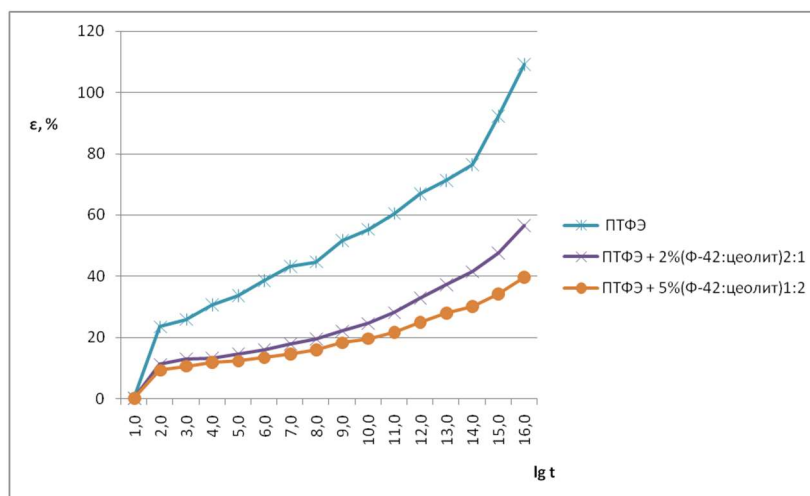


Рисунок 1 – Зависимость относительного удлинения от логарифма времени при напряжении 7,5 МПа

Для композитов наблюдается длительная вторая стадия ползучести и на кривых отсутствует третья ускоренная стадия ползучести по сравнению с исходным ПТФЭ. Таким образом, ползучесть исследованных композитов меньше в 2-2,75 раза по сравнению с исходным полимером. Нужно отметить, что исследованные образцы не разрушились в течение 1000 часов испытаний, не наблюдается на их поверхности никаких трещин, что свидетельствует об их меньшей склонности к хрупкому разрушению, несмотря на низкие значения деформационно-прочностных показателей (таблица 2).

#### Литература

1. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития / В.М. Бузник // Российский химический журнал. – 2008.– Т. 52. – № 3. – С. 7–12.
2. Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий / О.А. Аммосова [и др.] [под ред. С.Н. Попова]. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2017. – 217 с.
3. Крыжановский В.К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс / В.К. Крыжановский. – Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2009. – 204 с.
4. Чередниченко В.С. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / В.С. Чередниченко. – 2-е издание. – Москва: Омега-Л, 2006. – 752 с.

#### References

1. Buznik V.M. // Russian chemical journal. – 2008. – V. 52. – No. 3. – P. 7–12.
2. Ammosova O.A. et al. The modified polymeric and composites for northern conditions (editor S.N. Popov). – Novosibirsk: Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2017. – 217 p.
3. Kryzhanovsky V.K. Engineering choice and identification of plastic. – Saint-Petersburg: Scientific bases and technologies, 2009. – 204 p.
4. Cherednichenko V.S. Materials science. Technology of structural materials. – 2<sup>nd</sup> edition. – Moscow: Omega-L, 2006. – 752 p.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПОЗИТОВ НАНОГИДРОКСИАПАТИТА С ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТОЙ

© Т. П. Калмыкова<sup>1,2,a</sup>, аспирант 2 года обучения, инженер

А. В. Северин<sup>1,b</sup>, канд. хим. наук, доцент

А. В. Гопин<sup>1,c</sup>, канд. хим. наук, старший научный сотрудник

Ю. В. Костина<sup>2,d</sup>, канд. хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник

<sup>1</sup>Химический факультет МГУ имени Ломоносова

119991, Россия, Москва, Ленинские Горы, д.1, стр. 3, ГСП-1

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева РАН»

119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 29

E-mail: <sup>a</sup>taisia2906@rambler.ru, <sup>b</sup>severin@radio.chem.msu.ru, <sup>c</sup>alexgopin@gmail.com, <sup>d</sup>julia@ips.ac.ru

*Медицинские препараты на основе гидроксиапатита (ГАП) и гиалуроновой кислоты (ГК) обладают биоактивностью, биорезорбируемостью, биосовместимостью, стимулируют регенерацию тканей, при этом не являются токсичными. Тем не менее активные свойства ГАП проявляются при условии того, что размер частиц примерно равен размеру частиц нативного ГАП, присутствующего в человеческом организме.*

*Авторами разработана методика синтеза ГАП в активной среде ГК, которая приводит к образованию биокомпозиата с структурными и размерными характеристиками близкими к нативному ГАП. Выявлены особенности структуры, морфологии и реологического поведения композиатов ГАП-ГК, полученных различными способами. Предложены различные варианты их медицинского применения: в качестве реминерализующей композиции, а также в качестве инъекционного препарата, стимулирующего регенерацию раны при пародонтите.*

**Ключевые слова:** гидроксиапатит, нанокристаллы, гиалуроновая кислота (гиалуронат), биоминеральные синтетические композиаты.

## PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF NANOHYDROXYAPATITE COMPOSITES WITH HYALURONIC ACID

T. P. Kalmykova<sup>1,2,a</sup>, graduate student 2 years of study, engineer

A. V. Severin<sup>1,b</sup>, Ph.D., associate professor

A. V. Gopin<sup>1,c</sup>, Ph.D., senior researcher

J. V. Kostina<sup>2,d</sup>, Ph.D., associate professor, leading researcher

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Lomonosov Moscow State University

GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

<sup>2</sup>A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of Russian Academy of Sciences

Leninskii pr. 29, Moscow, 119991 Russia

E-mail: <sup>a</sup>taisia2906@rambler.ru, <sup>b</sup>severin@radio.chem.msu.ru, <sup>c</sup>alexgopin@gmail.com, <sup>d</sup>julia@ips.ac.ru

*Medical drugs based on hydroxyapatite (HAP) and hyaluronic acid (HA) have bioactivity, bioresorbability, biocompatibility, they stimulate tissue regeneration, at the same time they are not toxic. Nevertheless, the active properties of HAP appear if the particle size is approximately equal to the particle size of the native HAP present in the human body.*

*The authors developed a method of synthesis of HAP in the active medium of HA, which leads to the formation of biocomposite with structural and dimensional characteristics that are close to the native HAP. The features of the structure, morphology and rheological behavior of*

*HAP-HA composites obtained by various methods was revealed. Various options of their medical use was proposed: as a remineralizing composition, and also as an injectable drug that stimulates the regeneration of the wound with periodontitis.*

**Keywords:** *hydroxyapatite, nanocrystals, hyaluronic acid (hyaluronate), biomineral synthetic composites.*

Гидроксиапатит (ГАП) – минерал, являющийся основным компонентом костной ткани. Благодаря своим биоактивным свойствам ГАП в наносостоянии является перспективным компонентом для создания биокomпозиционных материалов, которые не токсичны, обладают биоактивностью, биорезорбируемостью и биосовместимостью. Когда форма и размеры наночастиц ГАП близки к «нативным» его биологические функции проявляются активнее [1].

Гиалуроновая кислота, или гиалуронан (ГК) – полисахарид, который в высоких концентрациях присутствует в организме млекопитающих, (синовиальной жидкости, амниотической жидкости, соединительных тканях, в коже, стекловидном теле глаза и др.) [2].

В данной работе синтез ГАП проводили в активной среде ГК, который приводит к образованию кристаллов ГАП, близкими по форме и размерам к «нативным». В ходе синтеза в лабораторный реактор с раствором ГК заданной концентрации вводили навеску оксида кальция, смесь гомогенизировали (значение pH смеси ~ 12) и затем подавали с определенной скоростью ортофосфорную кислоту с контролем pH до его значения примерно 6-7 [3].

Морфологический анализ, проведенный методом ТЭМ, продемонстрировал существенное изменение как морфологии нанокристаллов ГАП-ГК по сравнению с чистым ГАП (образец сравнения), так и уменьшение их размеров (длины и ширины) (рисунок 1). При этом интегральные функции распределения наночастиц ГАП, синтезированного в ГК, оказываются более узкими. По данным метода динамического светорассеяния для образца ГАП-ГК характерно мономодальное, узкое распределение по размерам частиц дисперсной фазы, в отличие от ГАП, синтезированного в воде, у которого наблюдается бимодальное распределение, основная мода более широкая. Можно предполагать, что дисперсные частицы в ГАП-ГК имеют органическое окружение, связанное с неорганическими частицами ГАП.

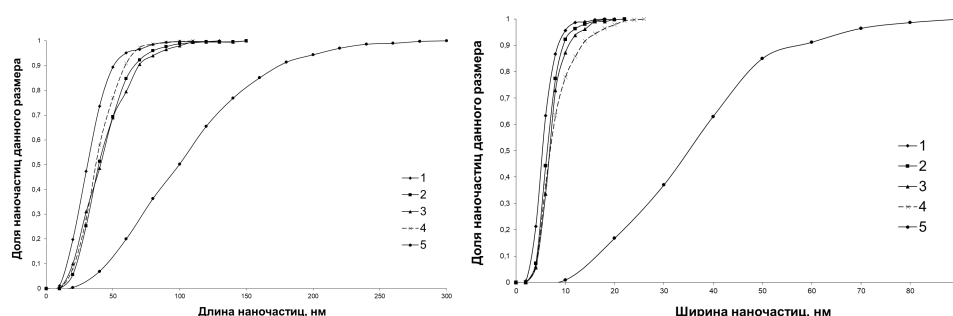


Рисунок 1 – Функции распределения по длине и ширине наночастиц ГАП, синтезированного в среде гиалуроновой кислоты различной концентрации: 0,01% (1); 0,07% (2); 0,1% (3); 0,2% (4) и ГАП, синтезированный в воде (5)

Данные электронной микроскопии высокого разрешения (ТЭМ–ВР) свидетельствуют о возможном наличии аморфных частиц в экспериментальных об-

разцах. Аморфные образования представляют собой частицы нанометрового размера (1-2нм) без видимой четко выраженной кристаллической структуры (рисунок 2). Эти образования могут представлять собой как аморфные агрегаты кальций-фосфатных кластеров (промежуточная стадия образования ГАП), так и частицы ГК или ее кальциевой соли, которые в процессе синтеза подверглись деструкции.

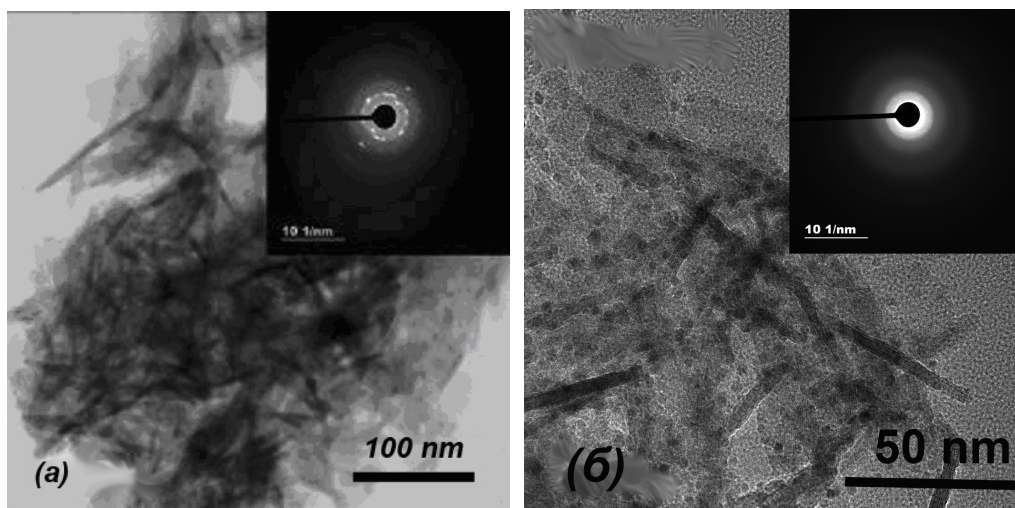


Рисунок 2 – Кристаллические частицы ГАП, синтезированного в 0,07% ГК (а), аморфизированные частицы ГАП, синтезированного в 0,1% ГК (б) и нанодифракция данных объектов

Таким образом, на основании того, что уменьшается размер кристаллов и увеличивается аморфная фаза мы делаем вывод, что ГК тормозит рост кристаллов, образуя вокруг них органическую оболочку, что согласуется с результатами работы [4].

Для сравнения химической структуры образцов, мы использовали метод ИК-НПВО-спектроскопии, который по изменению спектральных характеристик, то есть сдвигу максимумов полос поглощения, и по изменению относительной интенсивности может дать необходимую информацию. При анализе спектров образцов ГАП, синтезированного в ГК, мы видим изменения и в области поглощения РО связей от ГАП, и в области поглощения колебаний карбоксилат-иона от гиалуронана, что однозначно свидетельствует об участии этих групп в нековалентном взаимодействии. Положение полос поглощения карбоксилат-иона зависит от электроотрицательности металла-противоиона, следовательно, возможен эффект перioniзации с образованием гиалуроната кальция, и, таким образом, можно сделать вывод о том, что ГК является активной средой синтеза [5].

Результаты измерения  $\xi$ -потенциала подтвердили разницу в структуре ГАП-ГК и чистого ГАП, первый характеризуется большим по модулю отрицательным потенциалом на границе раздела фаз, то есть его суспензия более устойчива. Отрицательный заряд  $\xi$ -потенциала может играть положительную роль при создании медицинских препаратов

Были проведены реологические исследования, которые показали, что кривые течения типичны для полимерных систем, концентрированные растворы ГК яв-

ляются неньютоновскими жидкостями – их вязкость снижается при повышении скорости сдвига, а вязкость разбавленных растворов не зависит от скорости сдвига. Переход от разбавленных к концентрированным растворам происходит при 0,01% указывает на то, что молекулярная масса очень высокая [6]. Введение в раствор ГК гидроксиапатита с концентрациями от 0,1% до 1,5% ГАП не изменяет его вязкость, только концентрация 1,5% ведет к повышению вязкости. Согласно закону Эйнштейна, вязкость не должна повышаться при столь незначительных концентрациях твердых частиц. Это действительно так для 0,1% и 0,5% систем. Так как вязкость для 1,5%-ной системы значительно увеличилась, то можно сделать вывод, что при введении такого количества частиц, начинает формироваться какая-то структура этих частиц. Либо сами частицы начинают между собой контактировать, либо они делают это с участием ГК. Если бы частицы контактировали между собой, то бы наблюдался предел текучести. Если предела текучести нет, то можно сделать вывод о том, что в образовании структуры участвует ГК [7].

ГК будет адсорбироваться на этих частицах, препятствуя их агломерации [2]. Одна молекула ГК может адсорбироваться на 2-х частицах, связывая частицы вместе, и образуя таким образом трехмерную пространственную структуру.

Также для сравнения были определены реологические характеристики для дисперсии ГАП (без добавления полимера). В образце 5% ГАП без ГК на кривой течения наблюдается предел текучести, модуль упругости практически не зависит от частоты и превышает модуль потерь, то есть система 5% ГАП без добавления полимера является гелем, то есть ведет себя как твердое тело, при малых деформациях, в то время как, образцы ГК и ГАП-ГК проявляют вязкоупругость, это означает, что при низких частотах анализируемый образец проявляет свойства жидкости, а при высоких частотах образец ведет себя как упругое тело.

Таким образом, из полученных реологических данных можно сделать выводы о том, что поведение образцов ГАП-ГК типично для полимерных растворов, а также, что ГК стабилизирует дисперсию ГАП вследствие адсорбции на их поверхности.

Препараты на основе ГАП, синтезированного в среде ГК могут широко применяться в различных областях медицины, в частности для лечения стоматологических заболеваний, таких как кариес, пародонтит, пародонтоз и др.

Было проведено исследование в условиях *ex vivo*, объектами являлись образцы человеческих зубов, в которых была имитирована деминерализация эмали (начальная стадия кариеса). Препараты на основе ГАП-ГК использовались как реминерализующая композиция, в виде суспензий, паст и их сочетаний, которые показали свою эффективность в лечении данного заболевания.

Также был проведен эксперимент, в котором при моделировании патологии пародонтита у крыс изучались регенеративные процессы после инъекционного введения в десну препаратов на основе ГАП и ГК. Было показано, что препарат стимулирует процессы регенерации раны и сокращает сроки заживления тканей за счет сокращения фазы воспаления и ускорения созревания грануляционной ткани.

#### *Литература*

1. *Каназава Т.* Неорганические фосфатные материалы / Т. Каназава. – Киев: Наукова думка, 1998. – С. 17.



2. *Хабаров В.Н.* Гиалуроновая кислота: получение, свойства, применение в биологии и медицине / В.Н. Хабаров, П.Я. Бойков, М.А. Селянин. – Москва: Практическая медицина, 2012. – 224 с.

3. *Галиуллина Л.Ф.* [и др.] // Ученые записки Казанского университета. Серия «Естественные науки». – 2012. – Т. 154. – № 3. – С. 127.

4. *Bakos D.* Hydroxyapatite-collagen-hyaluronic acid composite / D. Bakos, M. Soldan, I. Hernandez-Fuentes // *Biomaterials*. – 1999. – Т. 20. – С. 191-195.

5. Особенности молекулярной структуры и морфологической организации биоминеральных композиций на основе наногидроксиапатита и гиалуронової кислоты / А.В. Северин [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б.* – 2016. – Т. 58. – № 4. – С. 314–325.

6. *Cleland R. L.* Ionic polysaccharides. III. Dilute solution properties of hyaluronic acid fractions / R. L. Cleland, J. L. Wang // *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*. – 1970. – Т. 9. – № 7. – С. 799-810.

7. *Ilyin S. O.* Sol–gel transition and rheological properties of silica nanoparticle dispersions / S. O. Ilyin, M. P. Arinina, A. Y. Malkin, V. G. Kulichikhin // *Colloid Journal*. – 2016. – № 78(5). – С. 608-615.

#### References

1. *Kanazava T.* Neorganicheskie fosfatnye materialy. – Kiev: Naukova dumka, 1998. – P. 17.

2. *Khabarov V.N., Boikov P.Ya., Selyanin M.A.* Gialuronovaya kislota: poluchenie, svoistva, primeneniye v biologii i meditsine. – Moscow: Prakticheskaya meditsina, 2012. – 224 p.

3. *Galiullina L.F., Mazaleva O.N., Rudin V.N., Salakhov M.Kh., Severin A.V., Silkin N.I., Khairullin R.N., Chelyshev Yu.A.* // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*. – 2012. – V. 154. – No. 3. – P. 127.

4. *Bakos D., Soldan M., Hernandez-Fuentes I.* // *Biomaterials*. – 1999. – V. 20. – P. 191-195.

5. *Severin A.V., Ivanov P.L., Kostina Yu.V., Khabarov V.N., Kalmykova T.P., Antonov S.V.* // *Polymer Science. Series B*. – 2016. – V. 58. – No. 4. – P. 314–325.

6. *Cleland R. L., Wang J. L.* // *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*. – 1970. – V. 9. – No. 7. – P. 799-810.

7. *Ilyin S. O., Arinina M. P., Malkin A. Y., Kulichikhin V. G.* // *Colloid Journal*. – 2016. – No. 78(5). – P. 608-615.

УДК 678.67.02

### ФИКСАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ВО ФТОРОПЛАСТОВОЙ МАТРИЦЕ

© **Е. Е. Кибирева**<sup>1</sup>, студент, **В. Е. Рогов**<sup>2</sup>, старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, стр. 1

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН  
670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

E-mail: rogov54v@mail.ru

*В статье описан механизм создания политетрафторэтиленового композита с распределенными частицами путем использования разности тепловых коэффициентов связующего и наполнителя. Показано, что в процессе формирования композиционного материала наряду со структурными превращениями полимера наблюдается фиксация*

частиц наполнителя в объеме полимера за счет его термической усадки с образованием механических связей.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, дисперсные частицы, наполнение, напряжение, коэффициент теплового расширения.

## FIXATION OF DISPERSED FILLERS IN A FLUOROPLASTIC MATRIX

**E. E. Kibireva**<sup>1</sup>, student, **V. E. Rogov**<sup>2</sup>, Senior Researcher

<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., building 1

<sup>2</sup>Baikal Institute of Nature Management of Siberian branch of the Russian Academy  
of sciences 670047, Russia, Ulan-Ude, 6 Sakhyanovoi St.

E-mail: rogov54v@mail.ru

*The article describes the formation mechanism of a composite based on polytetrafluoroethylene with dispersed fillers due to various coefficients of thermal expansion of the polymer and fillers. It is shown that during the formation of the composite material, along with the structural transformations of the polymer, the filler particles are fixed in the polymer volume due to its thermal shrinkage with the formation of mechanical bonds.*

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, dispersed particles, filling, stress, coefficient of thermal linear expansion.

В наши дни актуальной является проблема создания композиционных материалов с высокими антифрикционными показателями (высокой износостойкостью), в том числе за счет сочетания матриц из разных веществ с мелкими распределенными частицами. Полимеры с повышенной вязкостью используются при создании деталей, которые должны подвергаться длительным воздействиям извне. В качестве материала матрицы может использоваться политетрафторэтилен (фторопласт), обладающий высокими значениями вязкости расплава ( $10^{10}$  Па·с) и температуры спекания (633–643 К), низкой поверхностной энергией, высокими значениями теплового расширения, минимальной сцепляемостью. Фторопласт отличается крайне маленьким коэффициентом сухого трения (0,04–0,05 со сталью) и малой износостойкостью [1]. При внедрении во фторопласт рассеянных наполнителей [2] износостойкость возрастает тысячекратно.

Подобные композиты с характерным размером частиц наполнителя 30 – 50 мкм широко используются в триботехнических изделиях [3, 4], электропроводящих саморегулирующихся изделиях [5], в шлифовальных и инструментальных изделиях [6, 7].

Был проведен обзор литературы, по итогам которого можно сделать вывод, что повышение износостойкости политетрафторэтиленовых композитов происходит за счет превращений, происходящих в структуре полимера:

- увеличение кристалличности полимера и расстояния между слоями в аморфной фазе матрицы [8, 9];
- кристаллизации частиц наполнителя [10, 11];
- измельчении кристаллической фазы при термообработке [12, 13];
- в трансформации ленточной структуры в сферолитную при термообработке [14, 15].

Образование переходного слоя на разделе фаз приводит к росту износостойкости шлифовального инструмента [6, 7].

Представленные выводы сомнительны, так как достижение хорошего контакта полимера и наполнителя путем структурных превращений невозможно (фторопласт обладает малой поверхностной энергией и малым сцеплением). Предположим, что частицы наполнителя могут выступать в качестве дефектов – включений, не имеющих химических отношений с полимером. Фторопластовые композиты с дисперсными наполнителями являются гетерогенным материалом, в котором наполнитель и матрица не связаны. Имеющиеся работы описывают только технологические и эксплуатационные дефекты (отслоение, трещины) в слоистых композитах [16, 17].

В данной работе предлагается механизм создания фторопластового композита путем усадки полимера из-за разницы в коэффициентах тепловых расширений матрицы и наполнителя.

Стандартная технология изготовления фторопластового композита:

- разрыхление фторопласта;
- смешивание с наполнителем;
- прессование при комнатной температуре и давлении 30–55 МПа;
- выдержка под давлением (1 минута);
- термообработка при температуре  $643 \pm 5$  К с выдержкой из расчета 20 минут на 1 мм толщины.

Термообработка включает два процесса:

- при повышении температуры до 615 К (порошкообразный фторопласт) плавятся кристаллиты и полимер увеличивается в объемах на четверть;
- при дальнейшем росте температуры полимер монолитизируется, и возникают когезионные отношения на границах частиц порошка [1].

При прессовании пространство между частицами заполняется полимером, образующим после термической обработки объемную граничную фазу, толщина которой зависит от массовой доли наполнителя. Процесс структурирования в композиционном материале протекает иначе, нежели в полимере [17]. Воздушные включения и когезия происходят при повышении температуры. Во время спекания частицы наполнителя окружены полимерным расплавом; при дальнейшем снижении температуры полимер усаживается и кристаллизуется вокруг частиц. Поскольку коэффициенты теплового расширения отличаются, в полимере появляются напряжения сжатия. Закрепление наполнителя происходит путем упругой деформации (усадки) полимера.

Возникающее на поверхности наполнителя напряжение полимера имеет отличия от напряженно-деформированного состояния при термосборке. Напряжения фторопласта возникают по всему объему, в то время как при термосборке – только по поверхности [18,19]. Предположим, что напряжения по объему полимера приходят в равновесие в граничном слое частиц наполнителя, в пользу чего говорит следующий факт: изменение свойств композита наблюдалось бы при любых скачках напряжений в полимере в окрестности частиц наполнителя в промежутке времени, стремящемся к нулю. В то же время отсутствуют данные об изменении износостойкости фторопластовых композитов с течением времени.

При создании фторопластовых композитов с рассеянными наполнителями необходимо принимать во внимание не только изменения в структуре полимера, но и фиксацию частиц наполнителя в полимере за счет термоусадки и образования химических связей.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект № 9.7667.2017/БЧ, проект № 9.11221.2018/11.12.

#### *Литература*

1. *Панишин Ю.Ф.* Фторопласты / Ю.Ф. Панишин, С.Г. Малкевич, Ц.С. Дунаевская. – Ленинград: Химия, 1978. – 232 с.
2. *Погосян А.К.* Трение и износ наполненных полимерных материалов / А.К. Погосян. – Москва: Наука, 1977. – 137 с.
3. *Рогов В.Е.* Металлофторопластовые материалы для машиностроения: особенности разработки, производства и применения / В.Е. Рогов, А.М. Гурьев, С.О. Никифоров // Ползуновский альманах. – 2010. – № 1. – С. 51-57.
4. *Зыбин Ю.А.* Наполненные фторопласты / Ю.А. Зыбин, Н.Н. Самосадский. – Киев: Техника, 1965. – 73 с.
5. *Коваленко Н.А.* Исследование физико-механических свойств композиций на основе политетрафторэтилена с углеродными наполнителями / Н.А. Коваленко, И.Н. Черский // Механика композитных материалов. – 1991. – № 1. – С. 19-24.
6. *Шиц Е.Ю.* Свойства алмазосодержащих материалов на основе политетрафторэтилена / Е.Ю. Шиц, И.Н. Черский, А.А. Охлопкова // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2 (66). – С. 30-34.
7. *Охлопкова А.А.* Свойства политетрафторэтилена, модифицированного ультрадисперсными алмазами / А.А. Охлопкова // Материалы, технологии, инструменты. – 1999. – С. 60–63.
8. *Федорченко И.М.* Исследование свойств наполненного фторопласта / И.М. Федорченко, И.И. Белобородов, А.В. Ненахов // Физико-химическая механика материалов. – 1972. – № 2. – С. 49–52.
9. *Машков Ю. К.* Повышение износостойкости наполненного политетрафторэтилена путем оптимизации содержания наполнителей / Ю.К. Машков, Л.М. Гадиева, Л.Ф. Калистратова // Трение и износ. – 1988. – Т. 9. – № 4. – С. 606–616.
10. *Ненахов А.В.* Влияние металлического наполнителя на трение и износ фторопласта / А.В. Ненахов, О.И. Фучич // Порошковая металлургия. – 1980. – № 5. – С. 90–95.
11. *Истомин Н.П.* Антифрикционные свойства и износостойкость фторопласта-4 с различными наполнителями / Н.П. Истомин // Труды Всесоюзной конференции «Новые материалы в машиностроении». Серия С-Х. – Москва: НИИМАШ, 1968. – С. 223–235.
12. *Адрианова О.А.* Структура и свойства малонаполненного ПТФЭ / О.А. Адрианова, А.В. Виноградов, Ю.В. Демина // Механика композитных материалов. – 1986. – № 3. – С. 399–401.
13. *Охлопкова А.А.* Влияние дисперсных оксидов и нитридов переходных металлов на структурообразование в ПТФЭ / А.А. Охлопкова // Неметаллические материалы и конструкции для условий Севера. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1996. – Выпуск 2. – С. 72–76.
14. *Машков Ю.К.* Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, В.И. Суриков, Л.Ф. Калистратова. – Москва: Машиностроение, 2005. – 240 с.
15. *Рогов В.Е.* Взаимодействие свинецсодержащих наполнителей с фторопластовой матрицей при спекании / В.Е. Рогов, Г.Д. Цыренова // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т. 9. – № 3. – С. 315-318.
16. *Бохоева Л.А.* Прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами / Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, В.Е. Рогов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 87-92.
17. *Бохоева Л.А.* Устойчивость и рост круглых расслоений в слоистых элементах конструкций / Л.А. Бохоева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1989. – № 8. – С. 12-18.
18. *Липатов Ю.С.* Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – Москва: Химия, 1991. – 262 с.

19. *Зенкин А.С.* Оценка прогнозирования напряженно-деформированного состояния соединений с натягом при термических методах сборки / *А.С. Зенкин, Н.А. Зубрецкая* // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 6. – С. 9-12.

#### References

1. *Panshin Yu.F., Malkevich S.G., Dunaevskaya Ts.S.* Ftoroplasty. – Leningrad: Khimiya, 1978. – 232 p.
2. *Pogosyan A.K.* Trenie i iznos napolnennykh polimernykh materialov. – Moscow: Nauka, 1977. – 137 p.
3. *Rogov V.E., Guriev A.M., Nikiforov S.O.* // Polzunovskii almanakh. – 2010. – No. 1. – P. 51-57.
4. *Zybin Yu.A., Samosadskii N.N.* Napolnennye ftoroplasty. – Kiev: Tekhnika, 1965. – 73 p.
5. *Kovalenko N.A., Cherskii I.N.* // Mechanics of composite materials and structures. – 1991. – No. 1. – P. 19-24.
6. *Shitz E.Yu., Cherskii I.N., Okhlopkova A.A.* // Materials Science Issues. – 2011. – No. 2 (66). – P. 30-34.
7. *Okhlopkova A.A.* // Materialy, tekhnologii, instrumenty. – 1999. – P. 60-63.
8. *Fedorchenko I.M., Beloborodov I.I., Nenakhov A.V.* // Physicochemical Mechanics of Materials. – 1972. – No. 2. – P. 49-52.
9. *Mashkov Yu.K., Gadieva L.M., Kalistratova L.F.* // Journal of Friction and Wear. – 1988. – V. 9. – No. 4. – P. 606-616.
10. *Nenakhov A.V., Fuchich O.I.* // Powder Metallurgy. – 1980. – No. 5. – P. 90-95.
11. *Istomin N.P.* // Proceedings of All-Union Conference "New Materials in Mechanical Engineering". Series C-X. – Moscow: RDIME, 1968. – P. 223-235.
12. *Adrianova O.A., Vinogradov A.V., Dyomina Yu.V.* // Mechanics of composite materials and structures. – 1986. – No. 3. – P. 399-401.
13. *Okhlopkova A.A.* // Nemetallicheskie materialy i konstruksii dlya uslovii Severa. – Yakutsk: YaNTs SO RAN, 1996. – Issue 2. – P. 72-76.
14. *Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I., Kalistratova L.F.* Kompozitsionnye materialy na osnove politetraftoretilena. Strukturnaya modifikatsiya. – Moscow: Mashinostroenie, 2005. – 240 p.
15. *Rogov V.E., Tsyrenova G.D.* // Basic Problems of Material Science. – 2012. – V. 9. – No. 3. – P. 315-318.
16. *Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Rogov V.E.* // Basic Problems of Material Science. – 2013. – V. 10. – No. 1. – P. 87-92.
17. *Bokhoeva L.A.* // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. – 1989. – No. 8. – P. 12-18.
18. *Lipatov Yu.S.* Fiziko-khimicheskie osnovy napolneniya polimerov. – Moscow: Khimiya, 1991. – 262 p.
19. *Zenkin A.S., Zubretskaya N.A.* // Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii. – 2003. – No. 6. – P. 9-12.

УДК 620.3

### СИНТЕЗ И АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ОКСИДОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА

© **А. М. Кондранова<sup>1</sup>, А. С. Ложкомоев<sup>2</sup>, С. О. Казанцев<sup>3</sup>, А. В. Первиков<sup>4</sup>**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/4

E-mail: <sup>1</sup>amk@ispms.tsc.ru, <sup>2</sup>asl@ispms.tsc.ru, <sup>3</sup>kzso@ispms.tsc.ru, <sup>4</sup>pervikov@list.ru

*Показано, что композитные наночастицы на основе оксида цинка, полученные при электрическом взрыве 2-х проволочек Zn/Ag, Zn/Cu, в кислородсодержащей атмосфере, обладают хорошим антимикробным действием в отношении грамположительной бактерии клинического штамма метициллин-резистентного MRSA и грамотрицательной E. coli, по сравнению с наночастицами, полученными в аналогичных условиях электрическим взрывом одинарной проволочки Zn, Cu, Ag. При исследовании характеристик композитных наночастиц было установлено, что они имеют близкий дисперсный состав и положительный дзета-потенциал. Фазовый состав частиц может представлять собой смесь оксидов.*

**Ключевые слова:** электрический взрыв, кислородсодержащие наночастицы, композитные наночастицы, оксид цинка, антибактериальная активность.

### SYNTHESIS AND ANTIMICROBIAL ACTIVITY OF COMPOSITE OXIDES BASED ON ZINC OXIDE

A. M. Kondranova<sup>1</sup>, A. S. Lozhkomoev<sup>2</sup>, S. O. Kazantsev<sup>3</sup>, A. V. Pervikov<sup>4</sup>

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences  
634055, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4

E-mail: <sup>1</sup>amk@ispms.tsc.ru, <sup>2</sup>asl@ispms.tsc.ru, <sup>3</sup>kzso@ispms.tsc.ru, <sup>4</sup>pervikov@list.ru

*It is showed that composite nanoparticles based on zinc oxide, obtained by electric explosion of two wires Zn / Ag, Zn / Cu, (in an oxygen-containing atmosphere), have a good antimicrobial effect against gram-positive bacteria compared with nanoparticles obtained under similar conditions in an electric explosion using single-wire Zn, Cu, Ag. They have a similar particle composition and positive zeta potential. The phase structure of the particles may be a mixture of oxides.*

**Keywords:** electrical explosion of wires, oxygen-containing atmosphere, composite nanoparticles, zinc oxide, antibacterial activity.

Оксиды наночастиц металлов представляют собой новый класс важных материалов, которые все чаще разрабатываются для использования в научных исследованиях и в области медицины. Эти оксиды металлов интересны не только широким спектром физико-химических свойств, но и антибактериальной активностью [1].

А проблема образования устойчивых штаммов микроорганизмов способствует развитию направлений, связанных с разработкой наноматериалов, которые могут стать новой альтернативой уже известным антибиотикам [2]. Одним из перспективных направлений исследований является разработка новых композитных наночастиц, что обусловлено возможностью получения материалов, обладающих повышенными функциональными свойствами за счет аддитивного или синергетического действия компонентов. Так, например, нанокompозиты на основе оксидов металлов, находят применение для создания новых эффективных антимикробных агентов [3, 4].

Композитные наночастицы ZnO-Me(O), где Me – Cu, Ag получали методом совместного электрического взрыва двух проволок в буферном газе, содержащем аргон и кислород. В результате совместного электроимпульсного диспергирования скруток двух проволочек Zn/Cu, Zn/Ag в кислородсодержащей атмосфере образуются наночастицы и их агломераты различного размера. Для образца ZnO-CuO максимальное количество частиц имеет среднечисленный размер частиц в диапазоне 70-100 нм, для образца ZnO-Ag(O) более 40% всех частиц имеют размер в диапазоне 20-50 нм. Композитные наночастицы (Zn<sub>x</sub>-

Me<sub>1-x</sub>)O, где Me – Cu, Ag получали методом совместного электрического взрыва двух проволок в буферном газе, содержащем аргон и кислород. Содержание кислорода составляло 20 об. %.. Давление буферного газа при получении всех образцов составляло 3·10<sup>5</sup> Па. Принципиальная схема установки для получения наночастиц методом электрического взрыва проволок и принцип ее работы представлены в работе [5]. Частота взрывов проволок при получении наночастиц оксидов и композитных наночастиц оксидов составляла 0.3 Гц. Масса полученных образцов составляла не менее 70 гр. Параметры экспериментов приведены в таблице 1. Соотношение компонентов в образцах определялось диаметром диспергируемых проволок ( $d_w$ ). Длина проволок ( $l_w$ ), емкость накопителя энергии ( $C$ ), зарядное напряжение накопителя энергии ( $U_0$ ) подбирались таким образом, чтобы обеспечить введение в каждую из проволок энергии, составляющей порядка двух энергий сублимации проволоки. Такие параметры электрического взрыва проволок позволяют снизить содержание субмикронных капель жидкого металла в продуктах взрыва [6].

Таблица 1 – Параметры получения наночастиц

Образец	Проволока	$d_w$ , mm	$l_w$ , mm	$N$ , at.%	$C$ , $\mu$ F	$U_0$ , kV
(Zn <sub>0,55</sub> Cu <sub>0,45</sub> )O	Zn	0,38	80	55	3,2	33
	Cu	0,37		45		
	Al	0,35		44		
(Zn <sub>0,55</sub> Ag <sub>0,45</sub> )O	Zn	0,38	80	55	3,2	33
	Ag	0,36		45		
	Ti	0,30		66		
Ag(O)	Ag	0,25	80	100	2,4	24
ZnO	Zn	0,38	90	100	3,2	21
CuO	Cu	0,37	90	100	3,2	28

По данным просвечивающей электронной микроскопии при электроимпульсном диспергировании пары металлов Zn/Cu образуются сферические и близкие к сферической форме частицы. При этом медь и цинк по частицам распределены не равномерно, наблюдается разделение компонентов (рисунок 1а). Образец, полученный при диспергировании Zn и Ag (рисунок 1б) проволок, представляет собой частицы неправильной формы. При этом для многих частиц характерна форма Янус-частиц, где одна из частей обогащена Zn, другая Ag и присутствует четкая граница разделения компонентов.

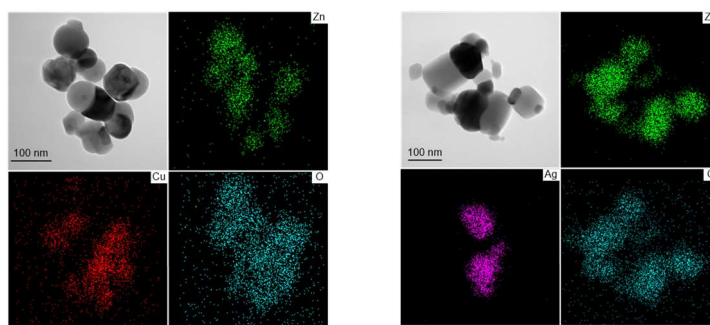


Рисунок 1 – ПЭМ-изображение и элементный анализ наночастиц ZnO-CuO (а), ZnO-A(O) (б)

По данным рентгенофазового анализа, при совместном электроимпульсном диспергировании металлов Zn/Cu в кислородсодержащей атмосфере (рисунок 2а) образуется смесь фаз ZnO (PDF card 01-075-0576), CuO (PDF card 00-002-1040) и Cu<sub>2</sub>O (PDF card 01-078-5772).

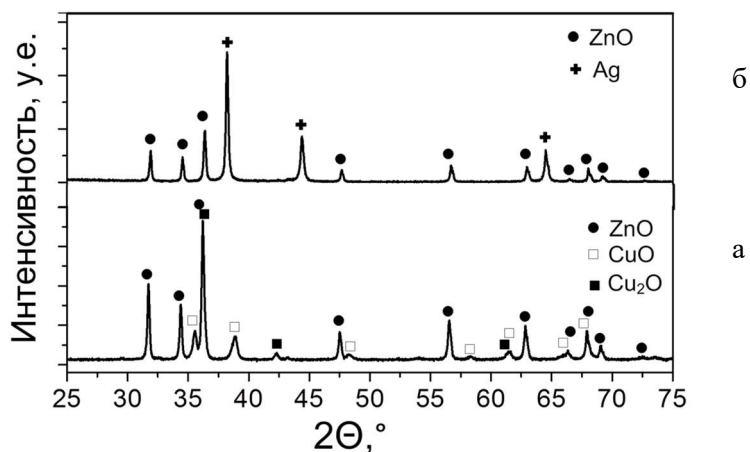


Рисунок 2 – РФА наночастиц ZnO-CuO (а) и ZnO-Ag(O) (б)

Основные рефлексы на дифрактограмме образца, полученного при диспергировании пары Zn/Ag (рисунок 2б), рефлексы соответствуют ZnO (PDF card 01-075-0576) и Ag (PDF card 01-071-3762). Таким образом, в проведенных условиях эксперимента серебро не реагирует с кислородом.

Все частицы имеют положительный дзета-потенциал в воде, измеренный при температуре 25 °С и при физиологических значениях рН. При этом дзета-потенциал наночастиц ZnO-CuO при рН7 составляет приблизительно +40 mV, наночастиц ZnO-Ag(O) – +28 mV. Точка нулевого заряда (IEP) наночастиц находится в диапазоне рН9-9,7.

При исследовании антимикробной активности синтезированных образцов было установлено, что композитные наночастицы, более эффективно подавляют рост как *MRSA* (клинический штамм) по сравнению с частицами, полученными при диспергировании одиночных проводников в аналогичных условиях. Мини-



мально ингибирующая концентрация (МИК) для ZnO-Me(O) наночастиц в несколько раз меньше, чем для наночастиц Me(O) (Таблица 2).

Для определения минимальной ингибирующей концентрации проводили в стерильном бульоне Мюллера-Хинтона при концентрации наночастиц в диапазоне от 0,1 мг до 2,5 мг/мл против двух патогенных микроорганизмов, грамположительного клинического штамма метициллин-резистентного *Staphylococcus aureus* MRSA ATCC 43300 и грамотрицательной *Escherichia coli* ATCC 25922. Анализ проводился в 96-луночных планшетах методом серийных разведений в каждую лунку вносили по 100 мкл бульона, 20 мкл микроорганизмов с концентрацией 0,5 единиц Макфарланда ( $10^8$  КОЕ / мл) и по 50 мкл суспензии. Микропланшеты инкубировали при 37 °С в течение 24 часов. После инкубации OD регистрировали при 620 нм. За МИК наночастиц принимали такую концентрацию, при которой в лунке не происходило изменение оптической плотности, вызванной ростом бактерий.

Таблица 2 – МИК исследуемых наночастиц

Композитные наночастицы	МИК, мг/мл	
	<i>MRSA</i>	<i>E.coli</i>
ZnO-CuO	0,25	0,75
ZnO-Ag(O)	0,25	0,25
Ag(O)	1,0	2,0
CuO	0,75	1,5
ZnO	1,0	1,75

Проведенные исследования показали, что в результате электрического взрыва двух проволок Zn/Ag, Zn/Cu, в кислородсодержащей атмосфере, могут быть получены композитные наночастицы различного состава, включая смесь оксидов, как в случае совместного электрического взрыва Zn и Cu проволок, смесь оксидов и шпинели. На примере грамположительной *MRSA* и грамотрицательной *E.coli*, показано, что синтезированные наночастицы обладают антимикробной активностью, более выраженной, чем наночастицы, полученные в аналогичных условиях при электроимпульсном диспергировании одиночных проволок соответствующих металлов, в том числе серебра, в кислородсодержащей атмосфере. Представленные результаты, при более глубоком исследовании биологического действия полученных наночастиц, могут найти применение для разработки новых антимикробных агентов на основе оксида цинка и являются перспективными исследованиями

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-79-20382.

#### Литература

1. Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms / N. Jones [и др.] // FEMS microbiology letters. – 2008. – Т. 279. – № 1. – С. 71-76.
2. Effect of zinc oxide amounts on the properties and antibacterial activities of zeolite/zinc oxide nanocomposite / A. A. Alswat [и др.] // Materials Science and Engineering: C. – 2016. – Т. 68. – С. 505-511.

3. *Arias C. A.* Antibiotic-resistant bugs in the 21st century—a clinical super-challenge / C. A. Arias, B. E. Murray // *New England Journal of Medicine.* – 2009. – Т. 360. – № 5. – С. 439-443.
4. *Balouiri M.* Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review / M. Balouiri, M. Sadiki, S. K. Ibsouda // *Journal of pharmaceutical analysis.* – 2016. – Т. 6. – №. 2. – С. 71-79.
5. Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements / M. I. Lerner [и др.] // *Powder Technology.* – 2016. – Т. 288. – С. 371-378.
6. State of the metal core in nanosecond exploding wires and related phenomena / G. S. Sarkisov [и др.] // *Journal of applied physics.* – 2004. – Т. 96. – №. 3. – С. 1674-1686.

#### References

1. *Jones N. et al.* // *FEMS microbiology letters.* – 2008. – V. 279. – No. 1. – P. 71-76.
2. *Alswat A. A. et al.* // *Materials Science and Engineering: C.* – 2016. – V. 68. – P. 505-511.
3. *Arias C. A., Murray B. E.* // *New England Journal of Medicine.* – 2009. – V. 360. – No. 5. – P. 439-443.
4. *Balouiri M., Sadiki M., Ibsouda S. K.* // *Journal of pharmaceutical analysis.* – 2016. – V. 6. – No. 2. – P. 71-79.
5. *Lerner M. I. et al.* // *Powder Technology.* – 2016. – V. 288. – P. 371-378.
6. *Sarkisov G. S. et al.* // *Journal of applied physics.* – 2004. – V. 96. – No. 3. – P. 1674-1686.

УДК 538.9

### ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ НА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ WC-CO

© Е. А. Ланцев<sup>1</sup>, А. В. Нохрин<sup>2</sup>, М. С. Болдин<sup>3</sup>, А. А. Попов<sup>4</sup>

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Лобачевского

603022, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

E-mail: <sup>1</sup>elancev@nifti.unn.ru, <sup>2</sup>elancev@nifti.unn.ru, <sup>3</sup>boldin@nifti.unn.ru, <sup>4</sup>feel-host@yandex.ru

*Исследованы возможности новой технологии электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС), обеспечивающей высокоскоростной (до 2500 °С/мин) нагрев материала за счет пропускания последовательности миллисекундных (3.3 мс) импульсов постоянного тока большой мощности (до 5000 А), для получения высокопрочных мелкозернистых твердых сплавов для перспективных приложений в машиностроении и станкостроении. Исследованы механизмы ЭИПС порошков WC-Co, исследовано влияние содержания свободного углерода и кобальта на кинетику ЭИПС. Показано, что процесс ЭИПС твердых сплавов WC-Co имеет двухстадийный характер и контролируется диффузионной ползучестью кобальта, причем на второй стадии (в области высоких температур спекания) интенсивность диффузионной ползучести существенно зависит от концентрации вольфрама и углерода в твердом растворе кобальта. Определены оптимальные режимы ЭИПС твердых сплавов различного состава, обеспечивающие формирование высокоплотной мелкозернистой структуры и отсутствие охрупчивающих частиц η-фазы. По оптимальным режимам ЭИПС получены образцы твердых сплавов WC-Co с высокой твердостью (21 ГПа), трещиностойкостью (5-8 МПа·м<sup>1/2</sup>) и стойкостью при резании.*

**Ключевые слова:** электроимпульсное плазменное спекание, карбид вольфрама, наноструктура, твердый сплав, режущий инструмент.

## THE INFLUENCE OF THE C CONTENT ON THE SPARK PLASMA SINTERING OF WC-CO

E. A. Lantsev<sup>1</sup>, A. V. Nokhrin<sup>2</sup>, M. C. Boldin<sup>3</sup>, A. A. Popov<sup>4</sup>

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

603022, Russia, Nizhniy Novgorod, 23 pr. Gagarina

E-mail: <sup>1</sup>elancev@nifti.unn.ru, <sup>2</sup>elancev@nifti.unn.ru, <sup>3</sup>boldin@nifti.unn.ru, <sup>4</sup>feel-host@yandex.ru

*The possibilities of spark plasma sintering (SPS), providing high-speed (up to 2500 °C / min) heating of the material due to passing a sequence of millisecond (3.3 ms) high-power DC pulses (up to 5000 A), to obtain high-strength fine-grained hard alloys for promising applications in mechanical engineering and machine tools are considered. The mechanisms of SPS of WC-Co powders are investigated, the effect of free carbon and cobalt content on the SPS kinetics is investigated. It is shown that the SPS process of WC – Co solid alloys has a two-stage character and is controlled by the diffusion creep of cobalt, and at the second stage (in the high sintering temperature) the intensity of diffusion creep depends significantly on the concentration of tungsten and carbon in the cobalt solid solution. The optimal modes of SPS of hard alloys of different composition were determined, ensuring the formation of a high-density fine-grained structure and the absence of embrittling etha-phase particles. According to the optimal SPS regimes, samples of WC-Co hard alloys with high hardness (21 GPa), crack resistance (5-8 MPa·m<sup>1/2</sup>) and resistance to cutting were obtained.*

**Keywords:** spark plasma sintering, tungsten carbide, nanostructure, hard alloy, cutting tool.

Нано- и ультрамелкозернистые твердые сплавы на основе карбида вольфрама играют важную роль во многих отраслях машиностроения. Благодаря высокой твердости карбида вольфрама и высокой пластичности кобальта, твердые сплавы WC-Co обладают редким сочетанием прочности, трещиностойкости и износостойкости, в том числе и при повышенных температурах, которое необходимо для высококачественной обработки металлов и сплавов резанием [1]. Особенно актуальным это становится при разработке современного металлорежущего инструмента (МРИ) для высокоскоростной обработки вязких (труднообрабатываемых) конструкционных материалов, широко используемых в современном общем и специальном машиностроении: титановых сплавов, коррозионно-стойких сплавов, жаропрочных никелевых сплавов и др [1].

Отметим, что в настоящее время около 90% отечественного рынка твердосплавного МРИ контролируют зарубежные производители (в первую очередь – компания Sandvik Coromant, Швеция), поэтому задача разработки отечественного высококачественного твердосплавного МРИ и конкурентоспособного с лучшими зарубежными образцами по цене и качеству продукта является актуальной.

Подчеркнем, что не смотря на большой интерес к изучению механизмов спекания твердых сплавов на основе карбида вольфрама с кобальтом, в настоящее время среди исследователей нет единого мнения в отношении механизмов спекания нано- и ультрамелкозернистых сплавов WC-Co, характера влияния состава и способа получения нано- и ультрадисперсных порошков на интенсивность и механизмы уплотнения на различных стадиях спекания, а также о необходимо-

сти формирования наноструктуры для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик твердосплавного МРИ.

Отметим, что спецификой твердых сплавов WC-Co является узкая область гомогенности на диаграмме вольфрам-углерод и высокая растворимость атомов вольфрама и углерода в кобальте при повышенных температурах. Вследствие этого при обычном спекании, отличительной особенностью которого являются малые скорости нагрева и длительные выдержки при повышенных температурах, необходимые для устранения пористости, происходит образование  $\eta$ -фазы (кубического твердого раствора вольфрама и углерода в кобальте), появление которой приводит к катастрофическому снижению трещиностойкости и износостойкости [1]. Одним из способов предотвращения образования  $\eta$ -фазы является повышение концентрации углерода в порошках WC-Co, а также высокоскоростной нагрев, позволяющий существенно снизить интенсивность процесса образования  $\eta$ -фазы.

Для решения данной задачи в данной работе использована новая перспективная технология высокоскоростной консолидации порошковых материалов – метод электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС), суть которого заключается в нагреве порошкового материала с высокой скоростью (до 2500 °C/мин) под постоянным давлением за счет пропускания последовательности миллисекундных импульсов постоянного тока большой мощности (до 5000 А) [2]. Высокие скорости нагрева позволяют сократить время нахождения образца при повышенных температурах и реализовать принцип «спекать быстрее, чем растут зерна», сформировав в спеченном материале однородную высокоплотную нанопористую или ультрамелкозернистую структуру. Высокий уровень автоматизации процесса спекания с одновременным контролем усадки в онлайн режиме непрерывного нагрева, а также возможность непосредственно в процессе спекания изменять температуру и скорость нагрева, величину приложенного давления, реализовывать ступенчатые режимы спекания и др. обеспечивает методу ЭИПС уникальные возможности по управлению структурой материалов, которые не могут обеспечить традиционные технологии порошковой металлургии.

Цель работы – разработка основ нового метода высокоскоростного спекания мелкозернистых твердых сплавов WC-Co.

#### **Методы и материалы, результаты**

В качестве исходных материалов были использованы мелкозернистые порошки WC и Co фирмы «Alfa-Aesar». С помощью планетарной мельницы «FRITZSCH – PULVERISETTE 6» получены композиции состава WC-10 масс.% Co с различным содержанием свободного углерода от 0 до 0.5 масс.%. ЭИПС осуществлялось в вакууме со скоростью нагрева 50 °C/мин и величиной приложенного давления 70 МПа. Нагрев проводился до температуры 1100°C, соответствующей области твердофазного спекания (ниже температуры плавления кобальтовой фазы), и до температуры 1400°C, соответствующей области жидкофазного спекания.

Проведены исследования кинетики уплотнения порошков в условиях квазистационарного и высокоскоростного нагрева. Показано, что формирование мелкозернистой структуры позволяет в условиях высокоскоростного нагрева обеспечить изменение доминирующего механизма диффузионного массопереноса (с диффузии в кристаллической решетке на механизм зернограничной диффузии) и, как следствие, обеспечить более высокую интенсивность диффузионного рас-

сасывания пор, располагающихся по границам зерен карбида вольфрама и межфазным границам WC-Co.

С использованием специально разработанных подходов, базирующихся на традиционных и современных моделях спекания было показано, что при ЭИПС температурная зависимость уплотнения мелкозернистых порошков WC-Co вне зависимости от содержания свободного углерода имеет двухстадийный характер: слабое уплотнение в области «низких» температур нагрева (Стадия I), интенсивное уплотнение в области «средних» температур ЭИПС (стадия II) и более медленное (менее интенсивное) уплотнение в области «высоких» температур спекания (стадия III).

Установлено, что механизмом уплотнения на первой стадии нагрева является процесс пластического течения, интенсивность которого лимитируется интенсивностью диффузионной ползучести кобальта. Показано, что на Стадии I и II варьирование свободного углерода в составе исходной смеси не оказывает влияния на интенсивность процесса уплотнения и, соответственно, на энергию активации ЭИПС ( $\sim 10 kT_m$ , где  $T_m$  – абсолютная температура плавления), которая близка к энергии активации зернограницной диффузии в кубическом кобальте [3].

Была применена модель Янга-Катлера для описания кинетики начальной стадии спекания. Было показано, что данная модель хорошо коррелирует со значениями энергий активаций, полученных с помощью уравнения степенной ползучести, тем самым избавляя ученого от необходимости проводить долгие энерго и ресурсозатратные эксперименты по ползучести.

С использованием ступенчатых и изотермических режимов нагрева установлено, что на Стадии III интенсивность уплотнения также лимитируется диффузионной ползучестью кобальта, однако энергия активации ЭИПС на данной стадии ( $20 kT_m$ ) оказывается намного больше, а также существенно зависит от содержания свободного углерода, температуры и времени спекания, а также скорости нагрева. С использованием методов рентгенофазового анализа и электронной микроскопии установлено, что в области температур 900-1000°C, соответствующих началу Стадии III, атомы вольфрама и углерода начинают растворяться в кубическом кобальте, что приводит к уменьшению коэффициента зернограницной диффузии и, как следствие, к повышению энергии активации ЭИПС.

Исследовано влияние роста зерен на механические свойства твердых сплавов, получаемых методом ЭИПС. Показано, что увеличение среднего размера зерна от 1 до 5-6 мкм в случае жидкофазного спекания приводит к уменьшению твердости  $H_v$  твердых сплавов от 16 до 10 ГПа, в то время как твердофазное спекание позволяет сформировать высокоплотную однородную мелкозернистую структуру (средний размер зерна 200-300 нм), твердость которой составляет 21 ГПа. Исследованы механизмы роста зерен в случае твердофазного и жидкофазного спекания. Определены оптимальные режимы нагрева, позволяющие обеспечить формирование мелкозернистой структуры с одновременно повышенной твердостью и трещиностойкостью ( $K_{Ic}$ ).

С использованием метода РФА проведены исследования влияния режимов ЭИПС на фазовый состав сплавов и, в частности, объемную долю частиц  $\eta$ -фазы. Показано, что использование высокоскоростного нагрева позволяет избежать образования  $\eta$ -фазы в твердых сплавах WC-Co с содержанием свободного углерода более 0.3 вес.%. Отмечено, что при жидкофазном ЭИПС отсутствие частиц  $\eta$ -фазы происходит при большем содержании свободного углерода в составе ис-

ходной смеси (по сравнению со случаем твердофазного спекания). Установлено, что с уменьшением содержания  $\eta$ -фазы  $H_v$  и  $K_{1c}$  твердых сплавов увеличиваются от 15 до 21 ГПа и от 4 до 6.3 МПа·м<sup>1/2</sup>, соответственно.

Образцы твердых сплавов, полученные по оптимальным режимам ЭИПС, испытаны на стойкость при резании. Показано, что стойкость полученных образцов при высокоскоростном резании углеродистых сталей соответствует стойкости лучших импортных образцов фирмы «Sandvik Coromant».

Работа выполнена при поддержке РФФИ №18-73-10177.

#### *Литература*

1. Курлов А.С. Физика и химия карбидов вольфрама / А.С. Курлов, А.И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2014. – 272 с.

2. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания / М.С. Болдин. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета, 2012. – 59 с.

3. Лариков Л.Н. Диффузия в металлах и сплавах. Справочник / Л.Н. Лариков, В.И. Исаичев. – Киев: Наукова думка, 1989. – 510 с.

#### *References*

1. Kurlov A.S., Gusev A.I. Fizika i khimiya karbidov volframa. – Moscow: Fizmatlit, 2014. – 272 p.

2. Boldin M.S. Fizicheskie osnovy tekhnologii elektroimpulsnogo plazmennogo spekaniya. – Nizhny Novgorod: State University of Nizhny Novgorod Press, 2012. – 59 p.

3. Larikov L.N., Isaichev V.I. Diffuziya v metallakh i splavakh. Spravochnik. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 510 p.

УДК 669.017

### **СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАННОГО СЛОЯ НА СТАЛИ Н13**

© <sup>1,2</sup>Б. Д. Лыгденов, <sup>1,3</sup>А. М. Гурьев, <sup>1</sup>Мэй Шунчи, <sup>1</sup>Чжен Чен, <sup>1</sup>Чжан Янвей, <sup>2</sup>Б. С. Цыдыпов

<sup>1</sup>Уханьский текстильный университет

No.1 Sunshine Avenue, Jiang Xia District, Wuhan, Hubei, 430200, China

<sup>2</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1

<sup>3</sup>Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
656038, Россия, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

E-mail: meishunqi@vip.sina.com

*В работе приведены экспериментальные данные по упрочнению штампа горячего деформирования из стали Н13 методом химико-термической обработки (ХТО). Показано влияние дополнительного введения диборида титана в состав поверхностно-активного вещества (ПАВ) на формирование диффузионного борированного слоя. Введение в состав дополнительно диборида титана благоприятно влияет на процесс формирования и свойства диффузионного боридного слоя. Увеличивается скорость формирования диффузионного слоя (за 1 час сформировался слой толщиной около 70 мкм), в переходной зоне наблюдаются частицы карбидов титана, которые предотвращают «продавливание» упрочненного слоя при динамических нагрузках.*

**Ключевые слова:** структура, диффузионный слой, микротвердость, сталь.

## STRUCTURAL-PHASE COMPOSITION of BORATED DIFFUSION LAYER OBTAINED ON STEEL H13

<sup>1,2</sup>B.D. Lygdenov, <sup>1,3</sup>A.M. Guriev, <sup>1</sup>Mei Shunqi, <sup>1</sup>Zheng Quan, <sup>1</sup>Zhang Yanwei, <sup>2</sup>B.S. Tsydypov

<sup>1</sup>Wuhan Textile University

No.1 Sunshine Avenue, Jiang Xia District, Wuhan, Hubei, 430200, China

<sup>2</sup>East Siberia State University of Technology and Management

40v building 1 Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, 670013, Russia

<sup>3</sup>I.I. Polzunov Altai State Technical University

46 Lenina Avenue, Barnaul, 656038, Russia

E-mail: meishunqi@vip.sina.com

*The paper presents experimental data on the hardening of the hot deformation die made of H13 steel. Shows the impact on the formation of the diffusion layer when administered in the composition of surface-active agents (SAA) optionally of titanium diboride. The addition of titanium diboride to the composition has a positive effect on the formation process and properties of the diffusion boride layer. The rate of formation of the diffusion layer increases (for 1 hour a layer with a thickness of about 70 microns was formed), titanium carbide particles are observed in the transition zone, which prevent the "pushing" of the hardened layer under dynamic loads.*

**Keywords:** structure, diffusion layer, microhardness, steel.

С развитием социально-экономического благосостояния населения Китая, все большее внимание уделяется увеличению объема продукции, удовлетворяющей все возрастающим потребностям.

В КНР стали этого класса достаточно эффективно используют для изготовления штампов горячего деформирования. Увеличение объема производства тормозится частой сменой инструментальной оснастки технологического оборудования, связанная с неизбежным износом. Повышению износостойкости посвящена настоящая работа.

Учитывая физико-механические свойства стали H13 (аналог российской стали марки 40X5MФ) была предложена химико-термическая обработка (ХТО), с целью получения на рабочей поверхности штампа износостойкого диффузионного слоя. В качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) использовали обмазку следующего состава:

1. В<sub>4</sub>С (карбид бора) – 50%
2. TiB<sub>2</sub> (диборид титана) – 27%
3. NaF (фторид натрия) – 5%
4. Г (графит) – 8%
5. Б (бентонит) – 10%

Присутствие диборида титана связано с необходимостью снижения хрупкости образующегося боридного слоя. Графит предотвращает припекание смеси к поверхности стали. Bentonit добавлен в качестве связующего материала.

Состав порошков смешивали жидким стеклом до сметанообразного состояния и наносили несколько слоев на поверхность детали. Общая толщина нанесенной обмазки составила около 2 мм.

После этого детали сушили при комнатной температуре в течение 24 часов. Далее обрабатывали в сушильной камере при температуре 200°C для полного удаления влаги из обмазки.

Режим химико-термической обработки: температура нагрева – 950<sup>0</sup>С; время выдержки – 1 час.

На рисунке 1 представлена микроструктура полученного диффузионного боридного слоя с переходной зоной. Видно, что боридный слой состоит из почти параллельных столбцов FeB и Fe<sub>2</sub>B. Толщина диффузионного боридного слоя достигает 70 мкм. Это достаточно много для выдержки в течение одного часа при температуре 950<sup>0</sup>С. Обычно боридные иглы имеют форму конуса, вершины которых направлены вглубь. В данном случае, такая форма боридных игл свидетельствуют о том, что борирование проходит в весьма интересном фазовом состоянии вблизи от температуры плавления. В то же время, оплавления ни одной из фаз не наблюдается. Т.е., борирование проходит в таких условиях, когда возникают неоднородные по концентрации кристаллические аморфные фазы и ускоренная диффузия при борировании обязана их существованию в кинетике процесса [1-6].



Рисунок 1 – Микроструктура диффузионного боридного слоя с переходной зоной. t=950<sup>0</sup>С; τ=1 час; толщина боридного слоя = 70 мкм

Также необходимо учесть наличие в составе насыщающей смеси диборида титана и отметить его влияние на процес формирования диффузионного слоя. Согласно литературным данным, атомы титана, в силу своей химической активности, достаточно глубоко диффундируют, особенно при образовании аморфной фазы, поскольку энергия активации диффузии в аморфных прослойках, как правило, не более 1/2 от энергии активации диффузии в кристаллической фазе. Существование таких прослоек ускоряет ход процесса. Атомы титана также играют роль в формировании боридных фаз, разрушая закономерный рост боридных игл классической формы. Наличие в переходной зоне частиц карбидов также указывает диффузионную активность титана [4,6-11].



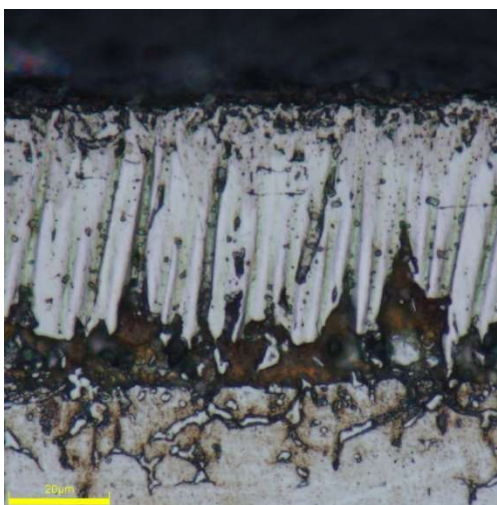
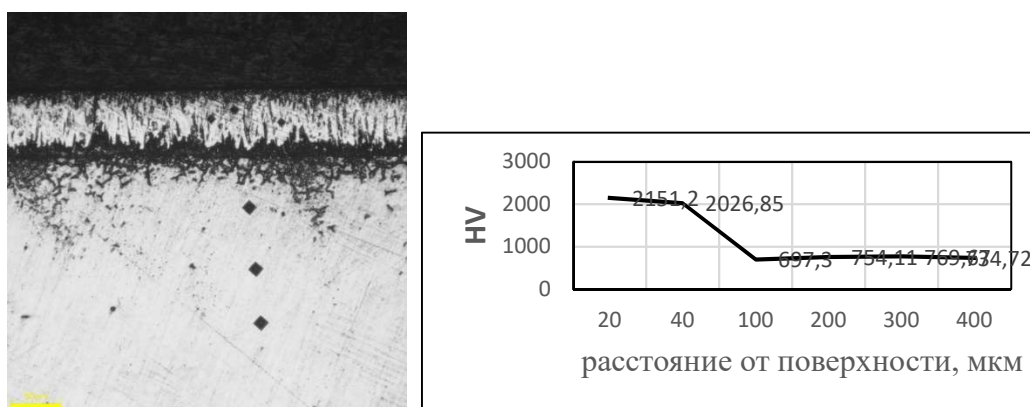


Рисунок 2 – Бориды сформированные в результате насыщения в смеси, содержащей диборид титана ( $\text{TiB}_2$ )

ДюрOMETрические исследования показали, что микротвердость боридного слоя находится в пределах стандартных значений. Расположение боридов под некоторым углом к поверхности указывает на рост по границам зерен, что подтверждает образование прослойки аморфной фазы. Такое расположение боридов благоприятно для адгезии с металлической основой [12-16].



а – отпечатки инденторов микротвердомера, б – распределение микротвердости в зависимости от расстояния до поверхности

Рисунок 3

Следует отметить, что химико-термическая обработка с помощью обмазок не зависит от габаритных размеров изделия, имеется возможность проводить местное упрочнение отдельных частей поверхности используя различные виды нагрева. Обмазка, изменяя свойства поверхности, также предотвращает окисление и обезуглероживание поверхности изделия [17-21]. Существенное повышение долговечности изделий из сплавов на основе железа упрочненных с помощью диффузионного насыщения из обмазок можно ожидать в случаях, когда основными

причинами их выхода из строя является: износ трением, разгар, поверхностное разрушение вследствие контакта с агрессивными средами.

Выводы:

1. Если в процессе изнашивания инструмент испытывает динамические воздействия (как в нашем случае), то для его упрочнения необходимы такие процессы ХТО, которые обеспечивают формирование диффузионных слоев, обладающих наряду с повышенной твердостью еще и достаточной прочностью, предотвращающей их хрупкое разрушение.

2. Введение в состав дополнительно диборида титана благоприятно влияет на процесс формирования и свойства диффузионного боридного слоя. Увеличивается скорость формирования диффузионного слоя (за 1 час сформировался слой толщиной около 70 мкм), в переходной зоне наблюдаются частицы карбидов титана, которые предотвращают «продавливание» упрочненного слоя при динамических нагрузках.

#### *Литература*

1. *Гурьев А.М.* Физические основы химико-термоциклической обработки сталей / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденев, Н.А. Попова, Э.В. Козлов. – Барнаул, 2008. – 250 с.
2. *Крукович М.Г.* Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – Москва: Физматлит, 2010. – 384 с.
3. *Лыгденев Б.Д.* Термоциклирование. Структура и свойства / Б.Д. Лыгденев, Ю.П. Хараев, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев. – Барнаул, 2014. – 252 с.
4. Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей / А.М. Гурьев [и др.] // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2005. – Т. 2. – № 3. – С. 37-45.
5. *Люборский Ф.Е.* Аморфные металлические сплавы / Ф.Е. Люборский. – Metallurgia, 1987. – 584 с.
6. *Лыгденев Б.Д.* Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Б.Д. Лыгденев. – Барнаул, 2009. – 355 с.
7. *Лыгденев Б.Д.* Перспективные диффузионные покрытия / Б.Д. Лыгденев, А.М. Гурьев, В.И. Мосоров, В.А. Бутуханов. – North Carolina: Raleigh, 2015. – 131 с.
8. Формирование диффузионного слоя на рабочей поверхности инструмента, работающего в условиях динамического износа / Б.Д. Лыгденев [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2015. – Т. 58. – № 2. – С. 117-120.
9. *Бутуханов В.А.* Влияние состава насыщающих порошковых сред на структуру и свойства диффузионных карбидных слоев / В.А. Бутуханов, Б.Д. Лыгденев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* – 2016. – № 2 (71). – С. 80-86.
10. Структура и свойства диффузионно упрочненных бором и титаном поверхностей горячештамповых сталей / А.М. Гурьев [и др.] // *Современные наукоемкие технологии.* – 2014. – № 4. – С. 60-62.
11. Высокоэффективный способ химико-термической обработки инструментальных сталей / А.М. Гурьев [и др.] // *Ползуновский альманах.* – 2004. – № 4. – С. 91-93.
12. Диффузионное упрочнение поверхности сталей бором совместно с хромом, вольфрамом и титаном / А.М. Гурьев [и др.] // *Ползуновский альманах.* – 2016. – № 4. – С. 23-28.
13. *Иванов С.Г.* Особенности диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности стали СТ3 / С.Г. Иванов, И.А. Гармаева, А.М. Гурьев // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 86-88.
14. Борирование малоуглеродистой стали / А.М. Гурьев [и др.]. – Raleigh, 2015. – 141 с.

15. *Лыгденев Б.Д.* Перспективные диффузионные покрытия / Б.Д. Лыгденев, А.М. Гурьев, В.И. Мосоров, В.А. Бутуханов // North Carolina: Raleigh, 2015. – 131 с.
16. Одновременное насыщение бором, хромом и титаном углеродистых и легированных сталей / И.А. Гармаева [и др.] // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 117-121.
17. *Аганаев Ю.П.* Оценка устойчивости формы межфазной границы при периодической кристаллизации сплавов в условиях воздействия высококонцентрированных источников тепла / Ю.П. Аганаев, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденев, Ш. Мэй // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 115-119.
18. *Мэй Ш.* Формирование фазового состава при многокомпонентном диффузионном насыщении в смесях на основе бора / Ш. Мэй, Б.Д. Лыгденев, А.М. Гурьев, В.А. Бутуханов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 123-127.
19. О кинетике формирования диффузионного слоя при борировании среднеуглеродистой и высокоуглеродистой сталей / И.А. Гармаева [и др.] // Ползуновский альманах. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 123-127.
20. *Шунчи М.* Термоциклическое карбоборирование стали 10: научно-методическое пособие для инженерных работников, аспирантов технического направления / М. Шунчи, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденев. – Саарбрюккен: 2016. – 75 с.
21. *Лыгденев Б.Д.* Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Б.Д. Лыгденев. – Новокузнецк, 2004. – 226 с.

#### References

1. *Guriev A.M., Lygdenov B.D., Popova N.A., Kozlov E.V.* Fizicheskie osnovy khimiko-termotsiklicheskoj obrabotki stali. – Barnaul, 2008. – 250 p.
2. *Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G.* Plastichnost borirovannykh sloyov. – Moscow: Fizmatlit, 2010. – 384 p.
3. *Lygdenov B.D., Kharaev Yu.P., Greshilov A.D., Guriev A.M.* Termotsiklirovaniye. Struktura i svoystva. – Barnaul, 2014. – 252 p.
4. *Guriev A.M. et al.* // Basic Problems of Material Science. – 2005. – V. 2. – No. 3. – P. 37-45.
5. *Lyuborskii F.E.* Amorfnye metallicheskie splavy. – Metallurgiya, 1987. – 584 p.
6. *Lygdenov B.D.* Intensifikatsiya protsessov formirovaniya struktury diffuzionnogo sloya pri khimiko-termicheskoj obrabotke stali;\_dissertation for the degree of doctor of technical sciences, – Barnaul, 2009. – 355 p.
7. *Lygdenov B.D., Guriev A.M., Mosorov V.I., Butukhanov V.A.* Perspektivnye diffuzionnye pokrytiya. – North Carolina: Raleigh, 2015. – 131 p.
8. *Lygdenov B.D. et al.* // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2015. – V. 58. – No. 2. – P. 117-120.
9. *Butukhanov V.A., Lygdenov B.D.* // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). – 2016. – No. 2 (71). – P. 80-86.
10. *Guriev A.M. et al.* // Modern high technologies. – 2014. – No. 4. – P. 60-62.
11. *Guriev A.M. et al.* // Polzunovskii almanakh. – 2004. – No. 4. – P. 91-93.
12. *Guriev A.M. et al.* // Polzunovskii almanakh. – 2016. – No. 4. – P. 23-28.
13. *Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guriev A.M.* // Basic Problems of Material Science. – 2012. – V. 9. – No. 1. – P. 86-88.
14. *Guriev A.M. et al.* Borirovaniye malouglerodistoi stali. – Raleigh, 2015. – 141 p.
15. *Lygdenov B.D., Guriev A.M., Mosorov V.I., Butukhanov V.A.* Perspektivnye dif-fuzionnye pokrytiya. – North Carolina: Raleigh, 2015. – 131 p.
16. *Garmaeva I.A. et al.* // Polzunovskii almanakh. – 2016. – No. 4. – P. 117-121.
17. *Aganaev Yu.P., Guriev A.M., Lygdenov B.D., Mei Sh.* // Basic Problems of Material Science. – 2014. – V. 11. – No. 1. – P. 115-119.

18. Mei Sh., Lygdenov B.D., Guriev A.M., Butukhanov V.A. // Basic Problems of Material Science. – 2018. – V. 15. – No. 1. – P. 123-127.

19. Garmaeva I.A. et al. // Polzunovskii almanakh. – 2017. – V. 5. – No. 4. – P. 123-127.

20. Shunchi M., Guriev A.M., Lygdenov B.D. Termotsiklicheskie karboborirovanie stali 10. – Saarbrücken: 2016. – 75 p.

21. Lygdenov B.D. Fazovye prevrashcheniya v stalyakh s gradientnymi strukturami, poluchennymi khimiko-termicheskoi i khimiko-termotsiklicheskoii obrabotkoi: dissertatsiya na stepen' kandidata tekhnicheskikh nauk. – Novokuznetsk, 2004. – 226 p.

УДК 669.017

### STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE DIFFUSION LAYER DURING THE PROCESS OF SURFACE SATURATION ON MEDIUM-CARBON STEEL IN THE AMORPHOUS BORON IN COMPOUND

© <sup>1</sup>Mei Shunqi, <sup>2</sup>I. Garmaeva, <sup>1</sup>Zheng Quan, <sup>1</sup>Zhang Yangwei, <sup>2</sup>B. Tsydygov, <sup>2</sup>J. Samaev, <sup>1,2</sup>B. Lygdenov, <sup>1,3</sup>A. Guriev

<sup>1</sup>Wuhan Textile University

No.1 Sunshine Avenue, Jiang Xia District, Wuhan, Hubei, 430200, China

<sup>2</sup>East Siberia State University of Technology and Management

40v building 1 Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, 670013, Russia

<sup>3</sup>I.I. Polzunov Altay State Technical University

46 Lenina Avenue, Barnaul, 656038, Russia

E-mail: lygdenov59@mail.ru

*This article presents the results of the thermochemical treatment of medium-carbon steel during the boriding in the compound with Amorphous Boron as diffusant. In the order to study the impact on microhardness of boride layers, on the one side of the sample of steel 45 was coated on with copper substrate. The results we received give us an evidence that morphology, structural composition and the properties of the boride layer are totally different in the end.*

**Keywords:** thermochemical treatment, diffusion, boriding, steel, adsorption.

It is well known that high value of microhardness of boride layers make the usage of it in alternating loads restricted. Due to such loads, there occurs partial staining that immediately leads to boride layer's destruction. Meanwhile, those unique properties of boride layers are widely acknowledged, generally accepted as useful in practice.

One of the main tasks at this point is the increase plasticity of boride coatings, which will cause the expansion of scope of details with diffusion boride layers. In literature, options to reduce the brittleness of boride layers are widely discussed. It is about infiltration the additional alloying elements in the compound for boriding (borochroming, boron-titanation, boron-nickel) as well as more complex multicomponent combinations in particular [1-4].

In the present work we considerate the formation process of boride layer on pre-coated with copper substrate steel 45. The copper substrate was coated on the one side of the sample of steel. The thickness of copper substrate is 2,4 μm. So, the impact of the copper substrate on the formation mechanism of the diffusion boride layer is quite obvious. The powder composition for boriding is



The samples were placed in heat-resistant steel containers, covered with a powder compound so that the distance between the container's bottom and the boride layer was 10 mm at least and the distance between the samples – 5 mm at least, between powder and the layers – around 15 mm. The next step is standard scheme of the fusible valve actions just to prevent any interactions between powder with an air oxygen.

The sample container packed this way was placed in a furnace pre-heated to 950 °C. The exposure time was 150 min.

Microstructure of the cross-section samples with boride layers on surface is presented on figure 1 and figure 2.

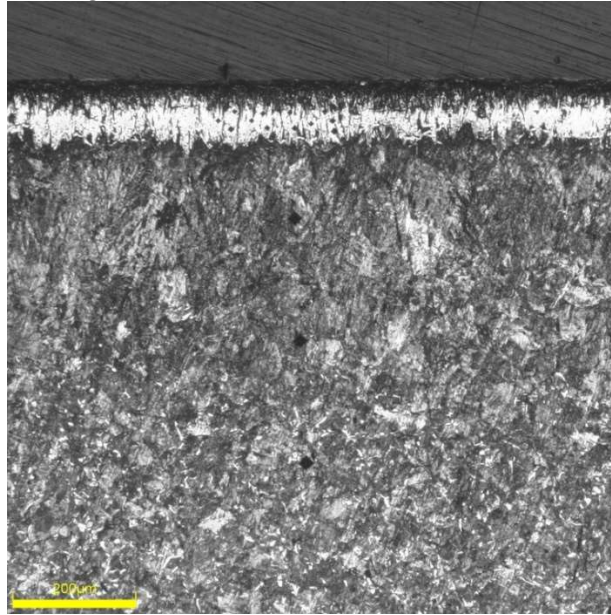


Figure 1 – Microstructures of the boride layer on pre-coated with copper substrate steel 45

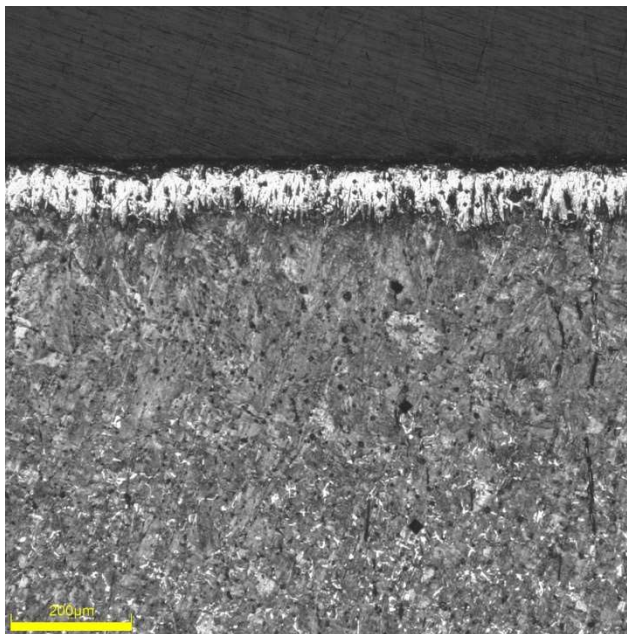
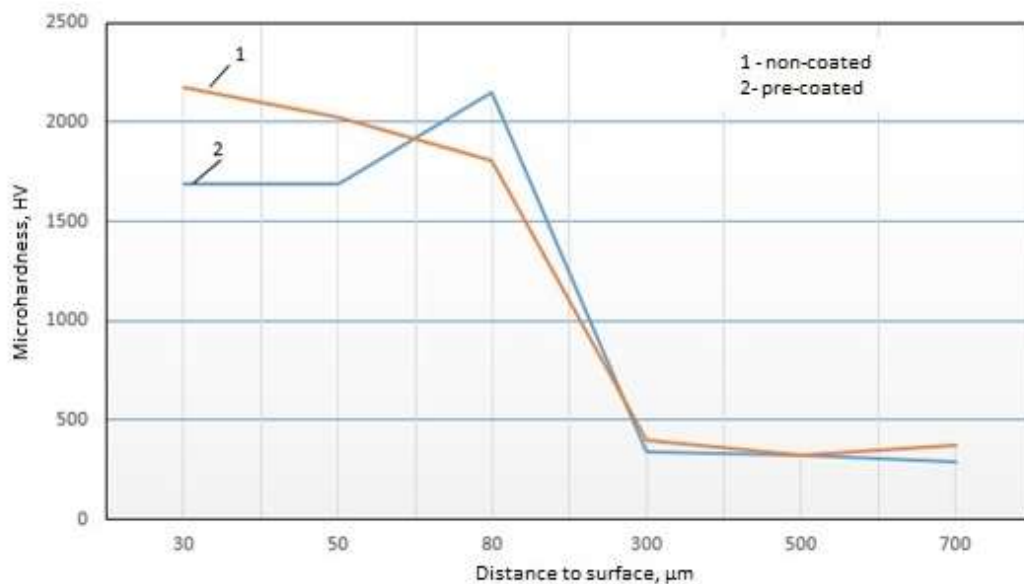


Figure 2 – Microstructures of the boride layer on non-coated steel 45

Microstructures of the diffusion layers (figure 1 and figure 2) are totally different from each other. Boride layers obtained from the non-coated surface (figure 2) have quiet small thickness and consist of boride needles with sharp ends. The arrangement of the needles is multidirectional and perpendicular to surface. This arrangement of needles enhances the adhesion of the diffusion layer to the metal matrix [5-10].

Boride layers obtained from the pre-coated with copper substrate surface (figure 1) have more rounded vertices of boride needles, better thickness of the diffusion layer and borides in tight. This form of the diffusion layer is more preferable in surface only for details that work in the aggressive surroundings.

Now it can be stated that copper substrate pre-coated on steel has a positive effect on the formation of structural composition of the diffusion layer.



1 – microhardness of the diffusion layer being non-coated; 2 – microhardness of the diffusion layer being pre-coated

Figure 3 – Microhardness distribution (depending on the distance to surface)

Those explorations show that microhardness of the diffusion layer being non-coated matches well with the standard values. The microhardness of the pre-coated diffusion layer (figure 3, graph 2) on surface is less hard and reach the maxima in the depth of boride needle.

The intensifying influence of the copper in the powder compound for the boriding was noted in works of Lyakhovich L., Voroshnin L., Kornopoltsev N., Shinkevich Y., Guriev A. etc. [1, 11-15].

In the process of heating to the temperature of thermochemical treatment, a liquid metal phase is formed, which facilitate the formation of the amorphous phase that leads to accelerated diffusion of boron and copper atoms.

It should be noted that the amorphous phase could be formed only in the dynamic process with high-level temperatures. This phase is metastable, its appearance is largely due to unequal thermodynamic compound in the heterogeneous solid solution Fe –

B – C. Conditions such this arise in the course of the diffusion process with the quick supply of boron and carbon on the diffusion main canals, the one with diffusion on the grain boundaries formed during the boriding in particular.

In conclusion:

1. Boride layer that is forming becomes less brittle due to pre-coating with copper substrate before the actual boriding.

2. Amorphous Boron combined with Aluminum Oxide shows a high rate of overall gas permeability. It is shown that diffusion layer's thickness is more than 80  $\mu\text{m}$  in only 2 hours.

#### References

1. *Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guriev A.M.* // Basic Problems of Material Science. – 2012. – V. 9. – No. 1. – P. 86-88.
2. *Ivanov S.G., Guriev A.M., Kosheleva E.A., Vlasova O.A., Guriev M.A.* // Modern High Technologies. – 2008. – No. 3. – P. 33.
3. *Guriev A.M., Lygdenov B.D., Vlasova O.A.* // Basic Research. – 2008. – No. 8. – P. 10.
4. *Guriev A.M., Lygdenov B.D., Vlasova O.A., Ivanov S.G., Kozlov E.V., Garmaeva I.A.* // Reinforcement techniques and coatings. – 2008. – No. 1 (37). – P. 20-27.
5. *Kosheleva E.A., Guriev A.M.* // International journal of applied and fundamental research. – 2009. – No. 5. – P. 76-77.
6. *Guriev A.M., Lygdenov B.D., Vlasova O.A.* // Metal Processing (technology, equipment, tools). – 2009. – № 1 (42). – P. 14-15.
7. *Garmaeva I.A., Lygdenov B.D., Vlasova O.A.* // Reinforcement techniques and coatings. – 2008. – № 10 (46). – P. 30-32.
8. *Guriev M.A., Kosheleva E.A., Guriev A.M., Lygdenov B.D., Galaa O.* Advanced methods for strengthening coatings. – Barnaul: Barnaul Press, 2016. – 182 p.
9. *Guriev A.M., Lygdenov B.D., Guriev M.A., Shunqi M., Vlasova O.A.* Boronizing of low carbon steel. – North Carolina: Raleigh, 2015.
10. *Lygdenov B.D., Guriev A.M., Mosorov V.I., Butukhanov V.A.* Progressive diffusion coatings. – North Carolina: Raleigh, 2015.
11. *Guriev A.M., Ivanov S.G., Guriev M.A., Chernykh E.V., Ivanova T.G.* // Steel in Translation. – 2015. – V. 45. – No. 8. – P. 555-558.
12. *Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guriev M.A., Guriev A.M., Starostenkov M.D.* // Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2015. – V. 22. – P. 49-53.
13. *Ivanov S.G., Guriev A.M., Chernykh E.V., Guriev M.A., Ivanova T.G., Garmaeva I.A., Zobnev V.V., Hong V.* // Basic Problems of Material Science. – 2014. – V. 11. – No. 1. – P. 13-16.
14. *Guriev M.A., Ivanov S.G., Alontseva D.L., Ivanova T.G., Guriev A.M.* // Letters on Materials. – 2014. – V. 4. – No. 3 (15). – P. 179-181.
15. *Garmaeva I.A., Guriev A.M., Ivanova T.G., Guriev M.A., Ivanov S.G.* // Letters on Materials. – 2016. – V. 6. – No. 4 (24). – P. 262-265.

УДК 678.67.02

#### ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТЕФЛОНСОДЕРЖАЩИХ ЧАСТИЦ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© М. А. Пнева<sup>1,a</sup>, магистр, В. Е. Рогов<sup>2,b</sup>, старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН

670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6  
E-mail: <sup>a</sup>mashapneva1997@gmail.com, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru

*В данной работе представлены некоторые аспекты образования покрытий из тефлонсодержащих частиц на поверхностях трения при использовании в двигателе автомобиля. Показаны изменения происходящие с полимерными частицами в процессе эксплуатации двигателя и их влияние на процесс трения и износа. Рассмотрены следующие этапы фиксации и трансформации тефлонсодержащих частиц на поверхностях зон трения. В зону сопряжений полимерные частицы доставляется смазочной жидкостью. Во время работы двигателя частицы, смешанные с маслом, находятся в системе смазки и принимают участие в создании покрытий.*

**Ключевые слова:** тефлонсодержащие частицы, двигатель, трение, покрытие, частицы износа.

#### FORMATION OF COATINGS FROM TEFLON-CONTAINING PARTICLES ON FRICTION SURFACES IN A CAR ENGINE

**M. A. Pnyova<sup>1,a</sup>**, master, **V. E. Rogov<sup>2,b</sup>**, Senior Researcher

<sup>1</sup>Irkutsk national research technical university  
664074, Russia, Irkutsk, 83 Lermontova St.

<sup>2</sup>Baikal Institute of Nature Management of Siberian branch of the Russian Academy of sciences  
670047, Russia, Ulan-Ude, 6 Sakhyanovoi St.

E-mail: <sup>a</sup>mashapneva1997@gmail.com, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru

*The paper considers some aspects of the formation of coatings from Teflon-containing particles on friction surfaces when used in a car engine. The changes occurring with polymer particles during engine operation and their influence on the process of friction and wear are shown. The main moments of the transformation and fixation of Teflon-containing particles on the surface of the friction zone are presented. In this case, lubricating fluids act as a supplier of polymer particles to the mating zone. Wear products during engine operation together with oil continue to circulate in the engine lubrication system and can participate in the formation of coatings.*

**Keywords:** teflon-containing particles, engine, friction, coating, wear particles.

Качество машиностроительной продукции определяется надежностью и долговечностью узлов трения. Противодействие износу определяется типом покрытия деталей, которые контактируют между собой, условиям трения и приспособления друг к другу слоев, находящихся на поверхности. При введении в смазки рассеянных частиц с содержанием тефлона в ходе эксплуатации из них образуются покрытия с высоким сопротивлением износу. В частности, такими свойствами обладают добавки «Slisk-50», «МикроХ-3», «Superline», «Slider», «Fogum» [1, 2]. В [3] рассмотрено влияние на интенсивность трения добавки «Fogum», однако не показана трансформация тефлоновых частиц данной добавки (рисунок 1) во фрикционном процессе. Частицы имеют сфероидную форму с характерным размером 0,5–2,5 мкм, что позволяет им свободно проходить через фильтры смазочной системы.



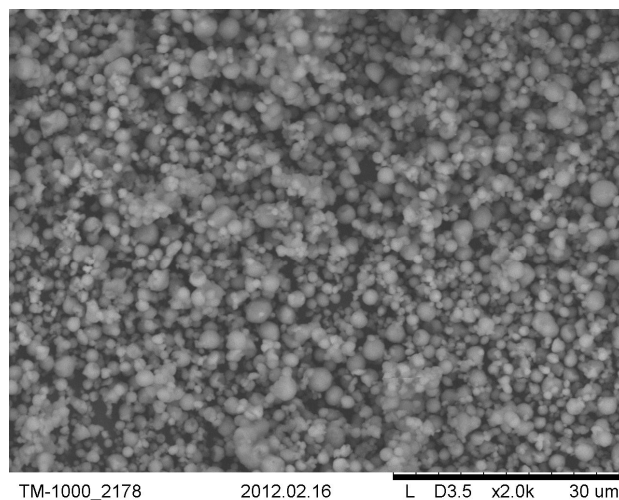


Рисунок 1 – Тефлоновые частицы «Forum»

Уменьшение изнашивания контактирующих поверхностей двигателя достигается путем возникновения на них полимерных покрытий. В [3] описывается покрытие, направленное вдоль движения. Оно распределяется не только по зоне контакта, но и по остальной поверхности вкладыша, изготовленного из бронзы при помощи порошковой металлургии. Покрытие сглаживает микрорельеф поверхности, закрывая впадины и выступы (рисунок 2).

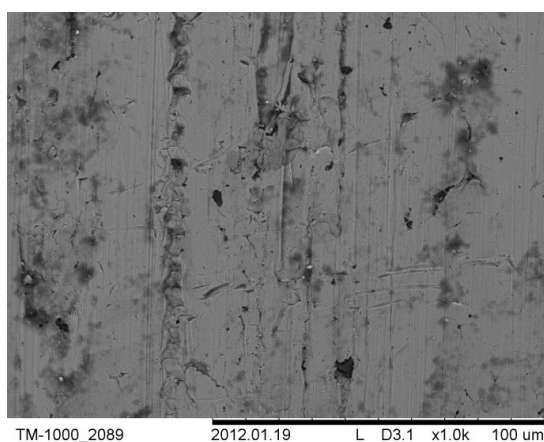


Рисунок 2 – Рабочая поверхность подшипника ведущего вала привода масляного насоса. Материал подшипника – бронза

Отметим, что покрытие можно заметить только на бронзовой поверхности [3]; на поверхностях, изготовленных из стали и алюминия, его увидеть невозможно, поскольку оно обладает высокой прозрачностью, а подложка имеет высокую чистоту обработки [4, 5]. При этом покрытие хорошо сцепляется с металлической подложкой [6]. Полимерные покрытия на бронзовой подложке способны выдерживать повышение температуры до  $280 \pm 5$  °C без видимых изменений в структуре материала.

Покрытие повышает ресурс деталей, поскольку в процессе трения сначала изнашивается оно, а лишь затем – основной металл. На рисунке 3 представлены частицы, возникшие в результате трения и осевшие на дно картера.

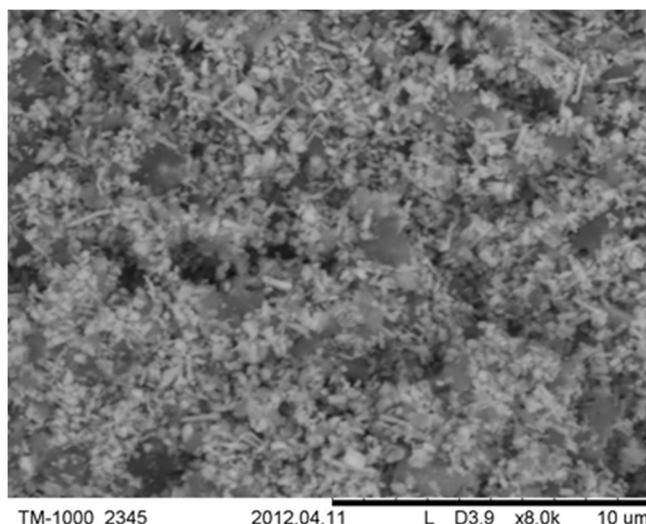


Рисунок 3 – Частицы, возникшие в результате изнашивания

Частицы, возникшие в результате изнашивания полимерного покрытия, имеют тонкую, вытянутую форму длиной, не превышающей 2 мкм, и поперечником в доли мкм. В порах масляных фильтров встречается некоторое число частиц с большей длиной, но в силу их небольшого количества они не оказывают значительного влияния на работу фильтров. Частицы сферической формы практически отсутствуют, что свидетельствует о том, что они полностью превратились в покрытие.

В данной работе представлены процессы трансформации тефлонсодержащих частиц в зоне трения; частицы переносятся в данную зону вместе со смазочными жидкостями.

Во время работы двигателя частицы, возникшие при трении, перемещаются с маслом в системе смазки двигателя и, таким образом, могут вторично образовывать покрытия, то есть можно говорить о самоорганизующейся трибосистеме.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект № 9.7667.2017/БЧ, проект № 9.11221.2018/11.12.

#### Литература

1. Исхакова Е.П. Использование антифрикционных препаратов в промышленности / Е.П. Исхакова // Вестник машиностроения. – 2008. – № 12. – С. 30–34.
2. Раднатаров В.Ц. Исследование работы двигателя легкового автомобиля при применении антифрикционной добавки / В.Ц. Раднатаров, В.Е. Рогов, Л.А. Бохоева, Д.В. Лобанов // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 4. – С. 38–42.
3. Radnatarov V.G. Influence of forum antifrictional additive on engine wear in light vehicles / V.G. Radnatarov, L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov // Russian Engineering Research. – 2015. Т. 35. – № 6. – С. 407–410.
4. Балабанов В.И. Трение, износ, смазка и самоорганизация в машинах / В.И. Балабанов, В.И. Бешлемышев, И.И. Махонин. – Москва: Изумруд, 2004. – 192 с.

5. Захаров П.С. Экструзионные пленки из фторполимеров / П.С. Захаров, В.Д. Митичук, П.В. Митин, Б.Н. Максимов // Фторные заметки. – 2012. – № 6 (85). – С. 67.

6. Rogov V.E. Reducing the wear of motor components by polymer additions / V.E. Rogov, L. A. Bokhoeva, V. Ts. Radnatarov // Russian Engineering Research. – 2017. – Т. 37. – № 1. – С. 32–34.

#### References

1. Iskhakova E.P. // Vestnik mashinostroeniya. – 2008. – No. 12. – P. 30-34.

2. Radnatarov V.G., Rogov V.E., Bokhoeva L.A., Lobanov D.V. // Systems. Methods. Technologies. – 2014. – No. 4. – P. 38–42.

3. Radnatarov V. G., Bokhoeva L. A., Rogov V. E. // Russian Engineering Research. – 2015. – V. 35. – No. 6. – P. 407–410.

4. Balabanov V.I., Beshlemyshev V.I., Makhonin I.I. Trenie, iznos, smazka i samoorganizatsiya v mashinakh. – Moscow: Izumrud, 2004. – 192 p.

5. Zakharov P.S., Mitichuk V.D., Mitin P.V., Maksimov B.N. // Fluorine Notes. – 2012. – No. 6 (85). – P. 67.

6. Rogov V.E., Bokhoeva L. A., Radnatarov V. Ts. // Russian Engineering Research. – 2017. – V. 37. – No. 1. – P. 32–34.

УДК 669-179

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХРУПКОСТИ БОРОАЛИТИРОВАННЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

© И. П. Полянский<sup>1</sup>, И. Г. Сизов<sup>2</sup>, О. В. Лазарева<sup>3</sup>, А. С. Волков<sup>4</sup>,  
Б. А. Максимов<sup>5</sup>, Е. С. Алхимова<sup>6</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, +7(3012)431415

E-mail: <sup>1</sup>i.polyansky@mail.ru, <sup>2</sup>sigperlit@mail.ru, <sup>3</sup>olga1991kfpfhtdf@mail.ru,

<sup>4</sup>alex.volkov170399@mail.ru, <sup>5</sup>rafaelmcray@mail.ru, <sup>6</sup>alximova87@mail.ru

*В работе проведены исследования по влиянию электронно-лучевого нагрева на хрупкость бороалитированных слоев, полученных в порошковых смесях в контейнерах с плавким затвором. Хрупкость бороалитированных слоев определена методами величины пластической деформации и напряжения скола.*

*Показано, что электронно-лучевой нагрев существенно позволяет снизить хрупкость по сравнению с традиционным способом бороалитирования.*

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, электронно-лучевая обработка, бороалитирование, хрупкость.

### STUDY OF THE BRITTLINESS OF BOROALUMINIZED LAYERS, RECEIVED WITH THE APPLICATION OF ELECTRON-BEAM HEATING

I. P. Polyansky<sup>1</sup>, I. G. Sizov<sup>2</sup>, O. V. Lazareva<sup>3</sup>, A. S. Volkov<sup>4</sup>,  
B. A. Maksimov<sup>5</sup>, E. S. Alhimova<sup>6</sup>

East Siberia State University of Technology and Management

670013, Russia, Ulan-Ude, Kluchevskaya Street 40V, +7(3012)431415

E-mail: <sup>1</sup>i.polyansky@mail.ru, <sup>2</sup>sigperlit@mail.ru, <sup>3</sup>olga1991kfpfhtdf@mail.ru,

<sup>4</sup>alex.volkov170399@mail.ru, <sup>5</sup>rafaelmcray@mail.ru, <sup>6</sup>alximova87@mail.ru

*In this paper, studies have been conducted on the effect of electron beam heating on the brittleness of boroaluminized layers obtained in powder mixtures in containers with a fusible gate. The brittleness of the boroaluminized layers is determined by the methods of the amount of plastic deformation and the cleavage stress.*

*It is shown that electron beam heating can significantly reduce brittleness compared with the traditional method of boroaluminized.*

**Keywords:** *chemical heat treatment, electron beam treatment, boroaluminized, brittleness.*

Механические свойства диффузионных слоев весьма разнообразны. Уникальными свойствами обладают борированные и многокомпонентные слои. В большинстве случаев такие слои используют для повышения износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости деталей машин, инструмента и технологической оснастки [1]. Как известно двухфазные борированные слои обладают высокой твердостью, но при этом имеют существенный недостаток – низкую пластичность [2]. Поэтому предпочтительнее получать однофазные боридные слои или слои, полученные на основе бора с другими элементами, например С, Cr, Cu, Al и др.

Двухкомпонентные слои могут обладать комплексом свойств. Так, например, слои на основе бора и алюминия, полученные традиционным способом обладают высокой износо- и жаростойкостью [3-7].

В настоящее время традиционные методы ХТО достаточно изучены, поэтому в последнее время все чаще для упрочнения поверхности металлов используют другие виды источников нагрева (лазерное и электронно-лучевое излучение) [8-11].

Преимущества такой обработки заключаются в высокой технологичности и упрочнении локальных участков, кроме того, такая обработка позволяет получать на поверхности свойства, ранее не доступные при традиционных способах нагрева.

Учитывая то, что традиционные способы бороалитирования достаточно хорошо изучены, то актуальными являются исследования с использованием в этих процессах электронно-лучевого нагрева.

Бороалитирование проводили на стали 60 в контейнере с плавким затвором в порошковой смеси состава 98% (70%  $Al_2O_3$  + 10%  $B_2O_3$  + 20% Al) + 2% NaF при  $T=950$  °С в течение 4 часов [12, 13]. После чего проводили нагрев бороалитированных образцов электронным пучком. Электронно-лучевой нагрев осуществляли с помощью установки ЭЛУ-5 в Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН).

Электронно-лучевой нагрев бороалитированных слоев проводили двумя способами:

а) Воздействовали на образец электронным пучком изменяя ток пучка и время обработки. Диаметр пучка составлял 15 мм.

б) Сканировали образцы электронным пучком, где изменяли ток пучка. Скорость сканирования и диаметр пучка в этом случае составляли 3 мм/с и 1 мм соответственно.

Ускоряющее напряжение в обоих случаях было постоянным и составляло  $W=27$  kV. Давление в камере составляло  $P=2 \times 10^{-3}$  Па. Указанное давление в вакуумной камере установки достигалось применением стандартных средств откачки.

Параметры электронно-лучевого нагрева приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры электронно-лучевого нагрева, используемые для обработки бороалитированных образцов

№ образца	Ускоряющее напряжение (U), kV	Сила тока (I), mA	Время воздействия (t), s	Скорость сканирования (V), mm/s	Диаметр электронного луча (d), mm
1	27	20	50	-	15
2			110		
3			120		
4		60	15		
5			20		
6			25		
7		30	-	3	1
8		40			
9		50			

Для оценки хрупкости использовали величину предельной пластической деформации  $\varepsilon_{\text{пред}}$  (1) и напряжение скола  $\sigma_{\text{ск}}$  (2) [14, 15].

$$\varepsilon = d_{\text{отп.}} / l_{\text{тр.}}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{отп.}}$  – диагональ отпечатка, мкм;

$l_{\text{тр.}}$  – длина трещины, мкм;

$L$  – расстояние между отпечатками;  $L_1 > L_2 > l_{\text{тр.1}} > l_{\text{тр.2}}$

$$\sigma_{\text{ск}} = 0,147P / (2L^2 + CL), \quad (2)$$

где  $P$  – нагрузка на индентор при измерении микротвердости;

$L$  – минимальное расстояние от центра отпечатка до края образца;

$C$  – диагональ отпечатка.

Анализ результатов исследования хрупкости бороалитированных слоев показал, что слои, полученные комбинированным способом, обладают высокой пластичностью по сравнению со слоями, полученными твердофазным бороалитированием (таблица 2).

Таблица 2 – Хрупкость бороалитированных слоев

№ образца	$\varepsilon_{\text{пред}}$	$\sigma_{\text{ск}}$ МПа	Балл хрупкости	
Твердофазное бороалитирование	1.315	6.3	3	
Комбинированная обработка	1	1.92	12.7	2
	2	нет трещины	нет скола	0
	3	нет трещины	нет скола	0
	4	нет трещины	нет скола	0
	5	нет трещины	нет скола	0
	6	нет трещины	нет скола	0
	7	1.28	11	3
	8	нет трещины	нет скола	0
	9	нет трещины	нет скола	0

На образцах, подвергнутых электронно-лучевому нагреву (образцы 2-6,8,9) не было обнаружено трещин между отпечатками и сколов слоя. Отпечатки имели ровную ромбическую форму без явных признаков искажения, возникновения трещин в вершинах отпечатка и изменения микроструктуры слоя вокруг отпечатка.

### **Заключение**

Электронно-лучевой нагрев является перспективным способом обработки поверхности материалов. Его преимуществами перед другими видами нагрева концентрированными потоками энергии является то, что электронный пучок позволяет инициировать диффузионные процессы в металле. Это приводит к формированию слоев с использованием диффузионных процессов. Кроме того, изменяя параметры электронно-лучевого нагрева, можно формировать слои по диффузионному, диффузионно-кристаллизационному механизму или из жидкой фазы.

Полученные результаты позволяют рекомендовать электронно-лучевой нагрев для улучшения свойств бороалитированных слоев.

### *Литература*

1. *Ворошин Л.Г.* Теория и технология химико-термической обработки / Л.Г. Ворошин, О.Л. Менделеева, В.А. Сметкин. – Москва: Новое знание, 2010. – 304 с.
2. *Krukovich M.G.* Plasticity of Boronized Layers / M.G. Krukovich, V.A. Prusakov, I.G. Sizov. – Springer, 2010. – 364 с.
3. *Мишигдоржийн У.Л.* Формирование покрытий на основе бора и алюминия на поверхности углеродистых сталей электронно-лучевым легированием / У.Л. Мишигдоржийн, И.Г. Сизов, И.П. Полянский // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – Т. 20. – № 2. – С. 87-99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99.
4. Boron-aluminide coatings applied by pack cementation method on low-alloy steels / N.E. Maragoudakis [и др.] // *Materials Letters*. – 2002. – Т. 53. – С. 406-410. – DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00515-8.
5. *Cho J.H.* Aluminizing and boroaluminizing treatments of Mar-M247 and their effect on hot corrosion resistance in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl molten salt / J.H. Cho // *Metals and Materials International*. – 2003. – Т. 9 (3). – С. 303-310.
6. *Omar H.* Boro-aluminizing of P91 steel by pack cementation for protection against steam oxidation / H. Omar, S.A. Tsipas, N. Maragoudakis, N. Michailidis // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2011. – Т. 46 (6). – С. 697-700.
7. Thermocyclic Boroaluminizing of Low Carbon Steels in Pastes / U. Mishigdorzhijn [и др.] // *Materials. Performance and Characterization*. – 2017. – Т. 6. – С. 531-545. – DOI: 10.1520/MPC20160082.
8. *Чудина О.В.* Комбинированное поверхностное упрочнение углеродистых сталей методами химико-термической обработки / О.В. Чудина, А.А. Брежнев // *Вестник ХНАДУ*. – 2010. – Вып. 51. – С. 14-19.
9. *Полетика И.М.* Использование электронно-лучевой обработки для создания упрочняющих покрытий / И.М. Полетика, Т.А. Крылова, С.А. Макаров // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 2. – С. 94-98.
10. *Теплых А.М.* Использование электронно-лучевого нагрева для формирования на сталях износостойких поверхностных слоев / А.М. Теплых // *Обработка металлов*. – 2011. – № 3 (52). – С. 91-94.
11. *Węglowski M.St., Blacha S., Phillips A.* // *Electron beam welding – Techniques and trends – Review*. *Vacuum*. – 2016. – Vol. 130. – P. 72–92. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004.
12. *Сизов И.Г.* Способ термоциклического бороалитирования изделий из углеродистых сталей / И.Г. Сизов, У.Л. Мишигдоржийн, Д.М. Махаров, Ю.Б. Дашиев. – Патент России № 2401319. – 10.10.2010.

13. *Sizov I.G.* Boroaluminized Carbon Steel / I.G. Sizov, U.L. Mishigdorzhijn, I.P. Polyansky // Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. – New York: Taylor and Francis, 2016. – С. 346-357. – DOI:10.1081/E-EISA-120049887.

14. *Скуднов В.А.* Способ оценки пластичности упрочненного металла / В.А. Скуднов, И.Н. Григорьев, С.В. Евдокимов, Л.А. Гаврилов. – Патент России № 2085902.

15. *Григорьев П.К.* Методика исследования хрупкости борированного слоя / П.К. Григорьев, Б.Б. Катанов // Труды НИИТМ. – 1972. – Вып. XVI. – С. 97-99.

#### References

1. *Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A.* Teoriya i tekhnologiya himiko-termicheskoj obrabotki. – Moscow: Novoe znanie, 2010. – 304 p.

2. *Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G.* Plasticity of Boronized Layers. – Springer, 2010. – 364 p.

3. *Mishigdorzhijn U.L., Sizov I.G., Polyanskij I.P.* // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty). – 2018. – V. 20. – No. 2. – P. 87-99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99.

4. *Maragoudakis N.E., Stergioudis G., Omar H., Paulidou H., Tsipas D.N.* // Materials Letters. – 2002. – V. 53. – P. 406-410. – DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00515-8.

5. *Cho J.H.* // Metals and Materials International. – 2003. – Vol. 9 (3). – P. 303-310.

6. *Omar H., Tsipas S.A., Maragoudakis N., Michailidis N.* // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2011. – V. 46 (6). – P. 697-700.

7. *Mishigdorzhijn U., Polyansky I., Sizov I., Vetter B., Schlieter A, Heinze S., Leyens C.* // Materials. Performance and Characterization. – 2017. – V. 6. – P. 531-545. – DOI:10.1520/MPC20160082.

8. *Chudina O.V., Brezhnev A.A.* // Vestnik HNADU. – 2010. – Issue 51. – P. 14-19.

9. *Poletika I.M., Krylova T.A., Makarov S.A.* // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2011. – V. 319. – No. 2. – P. 94-98.

10. *Teplyh A.M.* // Obrabotka metallov. – 2011. – No. 3 (52). – P. 91-94.

11. *Węglowski M.St., Błacha S., Phillips A.* // Electron beam welding – Techniques and trends – Review. Vacuum. – 2016. – V. 130. – P. 72–92. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004.

12. *Sizov I.G., Mishigdorzhijn U.L., Maharov D.M., Dashiev Yu.B.* Sposob termociklicheskogo boroalitirovaniya izdelij iz uglerodistykh stalej. – RU Patent 2401319. – 10.10.2010.

13. *Sizov I.G., Mishigdorzhijn U.L., Polyansky I.P.* // Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. – New York: Taylor and Francis, 2016. – P. 346-357. – DOI:10.1081/E-EISA-120049887.

14. *Skudnov V.A., Grigor'ev I.N., Evdokimov S.V., Gavrilov L.A.* Sposob ocenki plastichnosti uprochnennogo metalla. – RU Patent 2085902.

15. *Григорьев П.К., Катанов В.В.* // Труды НИИТМ. – 1972. – Issue XVI. – P. 97 – 99.

УДК 504.062.2, 67.08

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

© С. А. Пронин<sup>1</sup>, А. В. Кочнева<sup>2</sup>, Е. В. Зелинская<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет

664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83

E-mail: <sup>1</sup>79501256379@yandex.ru, <sup>2</sup>koch.alex061@mail.ru, <sup>3</sup>zelinskaelena@mail.ru

*В работе представлены результаты разработки принципиально новых композиций на основе поливинилхлорида, золы уноса и ряда других наполнителей, в том числе отходов промышленности. Материалы служат основой для производства широкого спектра изделий, таких как террасная доска, лага, фасадная панель, трубы и т.д. В ходе работы возникла потребность в выявлении дефектов, которые могут негативно сказаться на физико-механических характеристиках конечного продукта. Для выявления взаимосвязи между свойствами изделий из новых композитов и дефектами поверхности и структуры, возникающими в процессе производства, проведены комплексные испытания прочностных характеристик продукции.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, утилизация отходов, прочность, контроль качества.

## QUALITY CONTROL OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYVINYL CHLORIDE AND INDUSTRIAL WASTE OF THE IRKUTSK REGION

S. A. Pronin<sup>1</sup>, A. V. Kochneva<sup>2</sup>, E. V. Zelinskaia<sup>3</sup>

Irkutsk National Research Technical University

664074, Russia, Irkutsk, Lermontova St., 83

E-mail: <sup>1</sup>79501256379@yandex.ru, <sup>2</sup>koch.alex061@mail.ru, <sup>3</sup>zelinskaelena@mail.ru

*The paper presents the results of the development of fundamentally new compositions based on polyvinyl chloride, fly ash and a number of other fillers, including industrial wastes. Materials serve as the basis for the production of a wide range of products, such as decking, log, facade panel, pipes, etc. During the work, the need arose to identify defects that may adversely affect the physical and mechanical characteristics of the final product. To identify the relationship between the properties of products made of new composites and surface and structure defects arising during the production process, comprehensive tests of the strength characteristics of products were carried out.*

**Keywords:** composite materials, waste management, strength, quality control.

### Актуальность исследований

В современном мире ввиду уменьшения количества первичных ресурсов и из-за огромного накопления отходов, стала острой проблемой необходимость утилизации либо повторного использования отходов в качестве вторсырья. Основными направлениями в данной области являются производство из них бумаги, одежды и обуви, строительных и теплоизоляционных материалов.

Проблема использования отходов остро стоит и в Иркутской области. Здесь существует множество предприятий, которые не могут утилизировать отходы своей деятельности и просто вывозят их на полигоны и шламохранилища, которые на сегодняшний момент переполнены.

Одним из таких предприятий является ТЭЦ. Основные отходы данного производства – это зола уноса и шлаки. Зола уноса является одним из негативных факторов, влияющих на экологию города. Существует также значительное число других минеральных отходов, которые могут использоваться в качестве дисперсных наполнителей, улучшающих свойства строительных композитных материалов.

### Результаты и обсуждение

Для решения проблемы накопления минеральных отходов, образующихся на ТЭЦ и других предприятиях, в Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработаны принципиально новые композиции на основе поливинилхлорида, золы уноса и ряда других наполнителей. Материалы



получили название Винизол, Микрозол, Мрамозол и т.п. (в зависимости от наполнителей) и служат основой для производства широкого спектра изделий, таких как террасная доска, лага, фасадная панель трубы и т.д.

Композиции, используемые для производства данных материалов, состоят из суспензионного ПВХ марки СИ-64 производства Саянскхимпласт и набора аддитивов, модифицирующих свойства матрицы, повышающих их перерабатываемость и защищающих оборудование от износа. Суммарное количество добавок составляло 11 масс. ч. на 100 масс. ч. ПВХ. Отходы, вводимые в состав композиции: зола уноса ТЭЦ от сжигания углей Азейского месторождения, алюмосиликатные микросферы, наночастицы в виде углеродных нанотрубок, вспученный вермикулит, дисперсные отходы добычи и переработки мрамора.

Разработанная композиция перерабатывается методом экструзии с получением погонажных строительных изделий отделочно-конструкционного назначения (рисунок 1).



Рисунок 1 – Образцы изделий из Винизола

В ходе пробного запуска возникла необходимость исследования дефектов, которые могут повлиять на дальнейшее корректное использование готовой продукции. Оценка качества продукции производилась наиболее распространенным визуальным методом [1-2].

При контроле продукции были выявлены следующие дефекты:

- волнообразная поверхность;
- трещины;
- пузырьки воздуха различной крупности на поверхности и в структуре материала;
- скручивание;
- разрывы.

Также возникало такое явление, как смятие материала, которое происходит вследствие высокой скорости выхода материала из экструдера [3]. Материал не успевает принять нужную форму, остыть и, наталкиваясь на препятствия (например, перегородки охлаждающей ванны), деформируется и образует складки.

Стояла задача выяснить какие из данных дефектов и каким образом могут повлиять на эксплуатационные характеристики нашего материала. Так же необходимо было максимально уменьшить количество данных дефектов при производстве.

#### *Параметры процесса*

В ходе получения материала при первоначально заданных температурах переработки в пределах от 184-187 °С было обнаружено переполнение шнеков, в

результате переплава сырьевой смеси. Для приведения процесса в норму были установлены более низкие температуры зон экструдера, фильеры и адаптера до 170 °С. С этой же целью были снижены обороты шнека экструдера с 14 до 6 и обороты дозирующего устройства экструдера с 18 до 6. В результате давление расплава приняло значение 15 МПа. Очевидно, что чем больше давление внутри головки экструдера и чем меньше вязкость расплава, тем выше производительность процесса в целом. По этой причине мы стремились к увеличению давления в головке экструдера, так и к ведению процесса при предельно высокой температуре (не достигая, однако, деструкции полимерного расплава), обеспечивающей минимальную вязкость расплава. Вода для охлаждения профиля удовлетворяла требованиям ГОСТ 23732-79, предъявляемым к воде, используемой для промышленных нужд, и имела температуру в пределах 12-14 °С.

Таким образом, для исключения описанных дефектов мы корректировали скорость подачи смеси при выходе из экструдера, изменяли температуру охлаждения, модифицировали компаунд введением различных химических составов, корректировали скорость тянущего устройства [3].

Материалы, которые были получены с дефектами, используются повторно в дальнейшем производстве путем его измельчения и последующего добавления в состав композиции. Данные композиты прошли успешные испытания прочностных характеристик при деформации растяжения, сжатия и изгиба.

В ходе исследования материалов были определены максимальные нагрузки, которые выдерживают данные материалы без разрушения [4-6]. Исследования проводили на материалах различных составов, данные о которых представлены в таблице 1. Для сравнения приведен прототипный материал Винизол на основе аналогичной полимерной композиции и золы уноса ТЭЦ (40 % масс.).

Таблица 1 – Свойства минерально-композиционных материалов различного состава

№	Состав (название) материала	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел прочности на разрыв, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа
1	Вермикулит	42,28 ± 0,46	21,81 ± 1,41	49,29 ± 3,04
2	Мраморная пыль 75 масс. ч.	45,51 ± 0,42	18,14 ± 1,57	48,21 ± 3,03
3	Мраморная пыль 110 масс. ч.	46,31 ± 0,3	19,61 ± 0,51	34,78 ± 1,27
4	Углеродные наночастицы 0,0016 масс. ч. + Зола уноса 65 масс. ч.	42,34 ± 0,83	16,31 ± 0,35	27,13 ± 1,93
5	Алюмосиликатные микросферы 48 масс. ч. + Зола уноса 30 масс. ч.	35,09 ± 0,72	11,54 ± 0,87	24,02 ± 2,5
6	Алюмосиликатные микросферы 23 масс. ч. + Зола уноса 50 масс. ч.	40,1 ± 0,65	13,69 ± 0,48	35,78 ± 0,52
7	Алюмосиликатные микросферы 48 масс. ч.	35,67 ± 0,39	12,55 ± 1,21	34,24 ± 0,68
8	Алюмосиликатные микросферы 23 масс. ч.	30,88 ± 0,52	5,91 ± 0,55	15,62 ± 6,48
9	Винизол	-	18,9	35,93

Исследования показали, что внешние дефекты, проявляющиеся при контроле качества готовой продукции, не оказывают значительного негативного влияния

на физико-механические характеристики. И изделия могут быть использованы по прямому назначению.

#### **Выводы**

В результате исследований получены новые композиции, в состав которых включены минеральные отходы различного состава, содержащие микро и наночастицы. Данные композиции использованы для получения строительных погонажных материалов высокой прочности. Установлены изменения свойств получаемых композиционных материалов от количества и вида присутствующих в составе отходов (которые являются элементов полимерно-минеральной композиции) частиц, в том числе наноразмерных частиц, микросфер и крупнотоннажных отходов, таких как зола уноса. Показано, что наличие минерального наполнителя способствует получению высокопрочных изделий. При этом визуальные дефекты изделий с одной стороны свидетельствуют о необходимости корректирования технологического режима переработки композиции, но с другой стороны мелкие неровности, трещины и поры не оказывают значительного влияния на физико-механические характеристики изделий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ: проекты в рамках государственного задания: №№ 11.8090.2017/8.9 и 5.11496.2018/11.12

#### *Литература*

1. *Теличенко В.И.* Технология строительных процессов. / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лapidус. – Москва: Высшая школа, 2005. – Часть 2. – 392 с.
2. *Новиков В.У.* Полимерные материалы для строительства: справочник / В.У. Новиков. – Москва: Высшая школа, 1995. – 448 с.
3. *Пахомов С.И.* Поливинилхлоридные композиции: учебное пособие / С.И. Пахомов, И.П. Трифонова, В.А. Бурмистров. – Иваново: Издательство Ивановского государственного химико-технологического университета, 2010. – 104 с.
4. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 9 с. – Введен 01.07.1981.
5. ГОСТ 25.602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 13 с. – Введен 01.07.1981.
6. ГОСТ 25.604-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2004. – 6 с. – Введен 01.01.1984.

#### *References*

1. *Telichenko V.I., Terentiev O.M., Lapidus A.A.* Tekhnologiya stroitelnykh protsessov. – Moscow: Vysshaya shkola, 2005. – Part 2. – 392 p.
2. *Novikov V.U.* Polimernye materialy dlya stroitelstva. – Moscow: Vysshaya shkola, 1995. – 448 p.
3. *Pakhomov S.I., Trifonova I.P., Burmistrov V.A.* Polivinilkhlорidnye kompozitsii. – Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry and Technology Press, 2010. – 104 p.
4. GOST 25.601-80. Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials test for tensile properties on plane specimens at normal,

elevated and low temperatures. – Moscow: FSUE «Standartinform», 2005. – 9 p. – Introduced 01.07.1981.

5. GOST 25.602-80. Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials. Test for compression properties at normal, elevated and low temperatures. – Moscow: FSUE «Standartinform», 2005. – 13 p. – Introduced 01.07.1981.

6. GOST 25.604-82. Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials. Test for bending properties at normal, elevated and low temperatures. – Moscow: FSUE «Standartinform», 2004. – 6 p. – Introduced 01.01.1984.

УДК 669.3:539.25:6

### ОКИСЛЕНИЕ ЛЕНТОЧНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПОДЛОЖЕК ИЗ УПРОЧНЕННЫХ СПЛАВОВ CU-ME И (CU+NI)-ME

© Т. Р. Суаридзе, Ю. В. Хлебникова, Д. П. Родионов, Л. Ю. Егорова

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН  
620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 18  
E-mail: Teona\_S@imp.uran.ru

*В настоящей работе проведено исследование структуры лент-подложек из сплавов Cu-Me и (Cu+Ni)-Me после различных стадий окисления. Определены преимущественные места зарождения очагов коррозии на поверхности текстурованных лент. Также с использованием метода термогравиметрии проведен анализ антиокислительных свойств сплавов. В результате испытаний было установлено, что минимальной стойкостью к окислению среди всех исследованных сплавов обладает сплав Cu-1.6% Fe.*

*Показано, что текстурованные ленты-подложки из тройных сплавов Cu-40% Ni-1.2% Cr и Cu-40% Ni-1.4% Fe, помимо совершенной кубической текстуры (более 99% зерен с ориентацией  $\{100\} \langle 001 \rangle$ ) и высоких прочностных свойств, обладают максимальными антиокислительными свойствами среди всех исследованных сплавов, и они могут быть использованы в качестве подложек для эпитаксиального нанесения функциональных слоев при повышенных температурах 600-700 °C.*

**Ключевые слова:** медные сплавы, окисление; структура поверхности, термогравиметрия.

### THE OXIDATION OF STRIP EPITAXIAL SUBSTRATES OF HARDENED CU-ME AND (CU+NI)-ME ALLOYS

T. R. Suaridze, Yu. V. Khlebnikova, D. P. Rodionov, L. Yu. Egorova

M.N. Miheev Institute of Metal Physics of UB RAS  
620108, Russia, Ekaterinburg, Sofyi Kovalevskoy str., 18  
E-mail: Teona\_S@imp.uran.ru

*In the present work, we studied the structure of substrate tapes of Cu-Me and (Cu + Ni) -Me alloys after various stages of oxidation. The primary places of origin of corrosion centers on the surface of textured tapes were determined. Also, using the method of thermogravimetry, the analysis of the antioxygenic properties of alloys was carried out. As a result of the tests, it was found that Cu – 1.6% Fe has the minimum oxidation resistance among all the studied alloys.*

*It has been shown, that textured tape substrates from ternary alloys Cu-40% Ni-1.2% Cr and Cu – 40% Ni – 1.4% Fe, in addition to a perfect cubic texture (more than 99% of grains with  $\{100\} \langle 001 \rangle$  orientation) and high strength properties, have the maximum antioxygenic*

*properties among all investigated alloys, and they can be used as substrates for the epitaxial deposition of functional layers at elevated temperatures of 600-700°C.*

**Keywords:** *copper alloys, oxidation, structure of surface, thermogravimetry.*

Тонкие металлические ленты из меди и сплавов на ее основе, полученные по технологии RABiTS, т.е. путем холодной деформации прокаткой ( $\geq 98\%$ ) и последующего рекристаллизационного отжига, находят применение в качестве подложек при разработке высокотемпературных сверхпроводящих материалов 2-го поколения (ВСТП 2-го поколения). Выбор медных сплавов в качестве материала для лент-подложек связан с тем, что в них возможно формирование острой биаксиальной кубической текстуры, близкой к монокристалльной  $\{100\}\langle 001\rangle$ , а так же с их лучшими немагнитными свойствами и меньшей стоимостью по сравнению с используемыми в настоящее время никелевыми сплавами [1]. Легирование меди и медно-никелевой базы такими элементами как Cr и Fe направлено на повышение механических свойств тонких металлических лент, несмотря на их крайне ограниченную растворимость в меди. Согласно данным [2-4] упрочнение в сплавах Cu-Fe и Cu-Cr достигается за счет выделения дисперсных частиц чистого легирующего элемента, в сплаве Cu-Ni – за счет твердорастворного упрочнения, в сплавах (Cu+Ni)-Fe и (Cu+Ni)-Cr – за счет аддитивного вклада в твердорастворное упрочнение никеля и 3d-металла.

Важно отметить, что помимо того, что лента-подложка из медного сплава, должна обладать высокой степенью текстурированности, немагнитностью при 77 К и высокими прочностными свойствами, необходимо, чтобы лента также обладала и достаточной стойкостью к окислению, особенно при температурах нанесения буферных и сверхпроводящих слоев, которые как правило составляют 600-700°C [5, 6]. В связи с этим, цель настоящей работы заключалась в структурном анализе поверхности текстурированных лент-подложек из бинарных и тройных медных сплавов до и после окисления. Исследования тонких лент приводились после различных стадий окисления – 5, 30 и 250 мин. выдержки образцов при температуре 700°C. Содержание легирующих элементов и кислорода на поверхности образцов до и после окисления определялось методом рентгеноспектрального микроанализа. До проведения дополнительных отжигов на поверхности текстурированных лент из всех исследованных сплавов наличие кислорода не наблюдалось. Также в ходе работы в результате термогравиметрических испытаний была произведена оценка стойкости к окислению тонких лент.

Для исследований были выплавлены бинарные и тройные медные сплавы, следующих составов: Cu-1.6% Fe, Cu-0.4% Cr, Cu-40% Ni, Cu-40% Ni-1.4% Fe, Cu-40% Ni-1.2% Cr. Технология создания металлических лент-подложек, т.е. все операции по выплавке лабораторных сплавов Cu-Me и (Cu+Ni)-Me, холодной деформации заготовок до толщины 100 – 80 мкм, рекристаллизационным отжигам деформированных лент для получения острой биаксиальной кубической текстуры подробно описаны в работах [2-4]. Доля кубических зерен на поверхности текстурированных лент из бинарных и тройных сплавов составляла не менее 95% (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Химический состав, температура начала первичной рекристаллизации, предел текучести при комнатной температуре (при 20°C) и параметры кубической текстуры лент-подложек из бинарных и тройных сплавов [2-4]

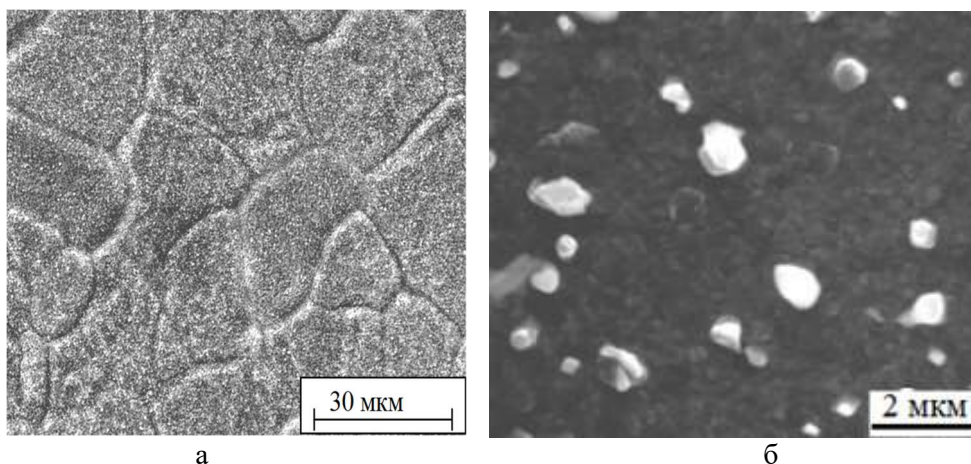
Состав сплава, вес.%	Температура начала рекристаллизации, °C	Предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа*	Параметры текстуры после оптимального отжига	
			Температура оптимального отжига, °C	Доля кубической ориентировки в текстуре отжига, %
Cu-0.4 Cr	330	65	700	95
Cu-1.6 Fe	260	78	850	98
Cu-40 Ni	535	82	1100	100
Cu-40 Ni-1.4 Fe	685	96	1000-1050	99
Cu-40 Ni-1.2 Cr	570	98	1000-1050	99

\* Приведено среднее значение по результатам измерений трех образцов

В ходе проведённых термогравиметрических испытаний было установлено, что по своим антиокислительным свойствам сплавы Cu-Ме и Cu-Ni-Ме располагаются в следующем порядке: Cu-40% Ni-1.2% Cr, Cu-40% Ni-1.4% Fe, Cu-40% Ni, Cu-0.4% Cr, Cu-1.6% Fe. Добавка в медно-никелевую базу (Cu-40% Ni) таких легирующих элементов как железо и хром, привела к тому, что текстурированные ленты-подложки из сплавов Cu-40% Ni-1.4% Fe и Cu-40% Ni-1.2% Cr демонстрируют наименьшие значения прироста массы на единицу площади образца, следовательно, при температуре 700°C данные сплавы обладают наибольшей стойкостью к окислению.

Анализ структуры лент-подложек из бинарных сплавов показал, что окисление поверхности сплавов Cu-0.4% Cr и Cu-1.6% Fe на ранних стадиях (выдержка 30 мин при 700°C) происходит более интенсивно на выделившихся включениях чистого хрома и железа, соответственно. Согласно данным рентгеноспектрального микроанализа на частицах легирующего элемента регистрируется большее содержание кислорода, чем в медной матрице. Со временем отдельные очаги коррозии растут и на поверхности постепенно формируется сплошная оксидная пленка. В медно-никелевом сплаве при этом происходит однородное изменение поверхности в виде небольшого рельефа. На рисунке 1а в качестве примера приведено изображение окисленной поверхности ленты из сплава Cu-40% Ni после дополнительного отжига в течение 250 мин при 700°C.

Предположительно, более высокие антикоррозионные свойства ленты из сплава Cu-Cr, по сравнению с лентой из сплава Cu-Fe, связаны с большей степенью дисперсности выделившихся включений хрома, по сравнению с включениями железа. Размер выделившихся частиц в структуре сплавов до проведения термогравиметрических исследований составлял: от 20 до 100 нм – в сплаве Cu-0.4% Cr, от 50 до 200 нм – в сплаве Cu-1.6% Fe [2].



а – Cu–40% Ni после выдержки в течение 250 мин при 700 °С, б – Cu–40%Ni–1.4%Fe после выдержки в течение 5 мин при 700 °С

Рисунок 1 – Электронные микрофотографии поверхности лент из сплавов

Исследование текстурованных лент-подложек из сплавов (Cu+Ni)-Me показало, что окисление поверхности в данных сплавах на ранних стадиях происходит не равномерно, как это было в случае ленты из сплава Cu–40% Ni. Согласно полученным данным, процесс коррозии в сплавах Cu–40% Ni–1.2% Cr и Cu–40% Ni–1.4% Fe идет более интенсивно в отдельно взятых областях, имеющих сферическую форму (рис. 1,б). Средний размер таких локализованных очагов коррозии в среднем составляет ~0.3 мкм и микроанализ регистрирует в них большее содержание легирующего элемента и кислорода, чем в матрице. После дополнительного отжига образцов при 700°С в течение 250 мин, на поверхности лент из тройных сплавов также сформировалась плотная окисная пленка, по своему составу близкая к стехиометрическому составу  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

В результате выполненной работы было установлено, что в лентах из двойных сплавов Cu–0.4% Cr, Cu–1.6% Fe, содержащих дисперсные частицы второй фазы с отличным от матрицы типом кристаллической решетки, окисление на начальных стадиях происходит более интенсивно на выделившихся частицах. В лентах из сплавов Cu–40% Ni происходит однородное окисление поверхности. В тройных сплавах на медно-никелевой основе процесс коррозии более интенсивно проходит в отдельно взятых областях с повышенным содержанием легирующего элемента.

Установлено, что наиболее перспективными в качестве подложек для ВСТП 2-го поколения являются текстурованные ленты из сплавов Cu–40% Ni–1.2% Cr и Cu–40% Ni–1.4% Fe, обладающие помимо острой кубической текстуры, наилучшими комплексом физических свойств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00309 мол\_а.

#### *Литература*

1. Родионов Д.П. Текстурованные подложки из никелевых сплавов / Д.П. Родионов, И.В. Гervасьева, Ю.В. Хлебникова. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 112 с.

2. Ленточные эпитаксиальные подложки из перспективных тройных сплавов на медно-никелевой основе для сверхпроводящих кабелей / Ю.В. Хлебникова [и др.] // Письма о материалах. – 2016. – Т. 6. – № 3. – С. 205-210.

3. Создание лент-подложек с острой кубической текстурой из тройных сплавов Cu–40%Ni–Me (Me=Fe, Cr, V) для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения / Ю.В. Хлебникова [и др.] // Физика Металлов и Металловедение. – 2016. – Т. 117. – №. 11. – С. 1171-1180.

4. Совершенная кубическая текстура, структура и механические свойства лент-подложек из немагнитных сплавов на основе меди / Ю.В. Хлебникова [и др.] // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – Вып. 3. – С. 73-83.

5. High Tc YBCO superconductor deposited on biaxially textured Ni substrate / J.D. Budai [и др.]. – Патент США № 5968877. – 1999.

6. Norton D.P. Buffer architecture for biaxially textured structures and method of fabricating same / D.P. Norton, C. Park, A. Goyal. – Патент США № 6716795. – 2004.

#### References

1. Rodionov D.P., Gervasieva I.V., Khlebnikova Yu.V. Teksturirovannye podlozhki iz nikelovykh splavov. – Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Press, 2012. – 112 p.

2. Khlebnikova Yu.V., Gervasieva I.V., Suaridze T.P., Rodionov D.P., Egorova L. Yu. // Letters on Materials. – 2016. – V. 6. – No. 3. – P. 205-210.

3. Khlebnikova Yu.V., Rodionov D.P., Gervasieva I.V., Suaridze T.P., Egorova L. Yu. // The Physics of Metals and Metallography. – 2016. – V. 117. – No. 11. – P. 1171-1180.

4. Khlebnikova Yu.V., Rodionov D.P., Gervasieva I.V., Egorova L. Yu., Suaridze T.P. // Technical Physics. – 2015. – V. 85. – Issue 3. – P. 73-83.

5. Budai J.D., Christen D.K., Goyal A., He Q., Kroeger D.M., Lee D.F., List F.A., Norton D.P., Paranthaman M., Sales B.C., Specht E.D. High Tc YBCO superconductor deposited on biaxially textured Ni substrate. – US Patent No. 5968877. – 1999.

6. Norton D.P., Park C., Goyal A. Buffer architecture for biaxially textured structures and method of fabricating same. – US Patent No. 6716795. – 2004.

УДК 691.168

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК НА АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА БИТУМА

© Л. А. Урханова<sup>1,a</sup>, Н. И. Шестаков<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1

<sup>2</sup>Московский государственный строительный университет  
129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26  
E-mail: <sup>a</sup>urkhanova@mail.ru, <sup>b</sup>ShestakovNI@mgsu.ru

*Качество работы асфальтобетонного покрытия определяется многими факторами, среди них одним из важнейших является адгезия вяжущих веществ, в частности битума к минеральному материалу. Так как стандартные методики оценки сцепления битума с минеральным материалом не позволяют дать количественную оценку адгезии битума, в данной работе были определены краевой угол смачивания и сила поверхностного натяжения битума с добавками углеродных наномодификаторов, полученных разными способами.*

*При измерении изменений краевого угла смачивания использовался оптический прибор и идеализированная модель, отражающая самые тяжелые условия работы битумной пленки на твердом минеральном основании. Определение адгезионных характери-*



стик модифицированного битума проводилось при температурах 120°C, 140°C, которые подразумевают границы интервала работы битума БНД 90/130 при образовании пленок вяжущего в процессе производства асфальтобетонных смесей. Выявлено, что фуллерен-содержащие добавки достаточно активно влияют на увеличение работы адгезии, что связано с их высокой поверхностной энергией.

**Ключевые слова:** адгезия битума, асфальтобетон, фуллеренсодержащая сажа, фуллеренсодержащий модификатор.

## RESEARCH OF THE IMPACT OF FULLER-CONTAINING ADDITIVES ON ADHESION PROPERTIES OF BITUMEN

L. A. Urkhanova<sup>1,a</sup>, N. I. Shestakov<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>East Siberia State University of Technology and Management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40V Klyuchevskaya str.

<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering  
129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26  
E-mail: <sup>a</sup>urkhanova@mail.ru, <sup>b</sup>SHestakovNI@mgsu.ru

*The quality of asphalt concrete pavement performance is determined by many factors, among which one of the most important is the adhesion of binders, in particular bitumen to mineral material. Since the standard methods of evaluation of bitumen bonding with mineral material do not allow to give a quantitative assessment of bitumen adhesion, this paper determined the edge angle of wetting and the strength of surface tension of bitumen with the addition of carbon nanomodifiers, obtained in different ways.*

*In measuring the changes in the edge angle of wetting, an optical device and an idealized model were used, reflecting the most difficult conditions of bitumen film operation on a solid mineral base. Determination of the adhesive characteristics of modified bitumen was carried out at temperatures of 120°C, 140°C, which imply the boundaries of the work interval of bitumen BND 90/130 in the formation of binder films in the production of asphalt concrete mixtures. It has been revealed that fullerene-containing additives actively influence the increase of adhesion work, which is connected with their high surface energy.*

**Keywords:** adhesion of bitumen, asphalt concrete, fullerene-containing soot, fullerene-containing modifier.

Сорбционные процессы, возникающие на границе «битум-минеральный заполнитель» оказывают значительное влияние на физико-механические характеристики асфальтобетона, как при его производстве, так и при дальнейшей эксплуатации [1-7]. Основой для адгезионного взаимодействия, в результате которого должен быть получен прочный композиционный материал является полное смачивание битумом минеральной подложки. Для количественного оценивания смачивания применяют краевой угол смачивания  $\theta$  между поверхностью минеральной подложки и поверхностью битумной жидкости. Краевой угол смачивания связывается уравнением Юнга [7, 8] с удельными свободными поверхностными энергиями взаимодействующих фаз  $\sigma_{тв}$ ,  $\sigma_{ж}$ ,  $\sigma_{тв.ж}$ .

$$\cos \theta = (\sigma_{тв} - \sigma_{тв.ж}) / \sigma_{ж}.$$

Таблица 1 – Определение краевого угла смачивания битумов

№	Состав вяжущего	Адгезионные характеристики при температуре 120 °С		Адгезионные характеристики при температуре 140 °С	
		Средний угол смачивания, °	Поверхностное натяжение, дин/см	Средний угол смачивания, °	Поверхностное натяжение, дин/см
1	Битум БНД 90/130	98,5	318	88	332
2	Битум + 0,05% ФСМ	78	319	96	269
3	Битум + 0,1% ФСМ	85	306	97	264
4	Битум + 0,25% ФСМ	78,5	274	77	266
5	Битум + 0,05% ФСС	78	286	86	267
6	Битум + 0,1% ФСС	77	293	95,5	266
7	Битум + 0,25% ФСС	76	292	96	315

Как видно по данным таблицы 1 чем выше температура, тем ниже поверхностное натяжение битума, что характерно для вязких жидкостей [8]. Также можно видеть, что поверхностное натяжение тем ниже, чем больше содержание углеродных наномодификаторов, выступающих для битума поверхностно-активным веществом.

На основании полученных значений  $\theta$  и  $\sigma_{жс}$  были рассчитаны энергия смачивания (адгезионное напряжение) [7]:

$$W_{\sigma} = \sigma_{жс} \cdot \cos \theta .$$

Адгезия жидкости к твердому телу может быть описана уравнением Дюпре [9]:

$$W_a = \sigma_{тв} + \sigma_{жс} - \sigma_{тв.жс} .$$

Уравнение Дюпре в сочетании с уравнением Юнга позволяет по известным значениям  $\cos \theta$  и  $\sigma_{жс}$  рассчитать работу адгезии:

$$W_a = \sigma_{жс} (1 + \cos \theta) . \quad (1)$$

Для определения сил взаимодействий между компонентами модифицированного битума, была вычислена работа когезии, определяемой как работу обратного разрушения тела. Так как при разрушении тела по сечению, образуется поверхность равной двум единицам площади, то в этом случае работа когезии составит:

$$W_k = 2 \cdot \sigma_{жс} . \quad (2)$$

Для характеристики процесса смачивания используется коэффициент растекания  $S$  – разность между работой адгезии  $W_a$  и работой когезии  $W_k$  [10].

При полном смачивании  $S \rightarrow 0$ .

$$S = W_a - W_k = \sigma_{жк} (\cos \theta - 1).$$

Связь между работой адгезии и когезии может быть выражена через относительную величину:

$$Z_a = W_a / W_k,$$

где  $Z_a$  – относительная работа адгезии жидкости.

Если  $W_a$  и  $W_k$  выразить через величины, определенные в уравнениях (1) и (2), то:

$$Z_a = (\cos \theta + 1) / 2.$$

Результаты проведенных расчетов определения физико-химических свойств системы «твердое тело – битум» представлены на графиках, при температуре 120 °С (рисунок 1, а) и 140 °С (рисунок 1, б).

В результате проведенных исследований было выявлено следующее: введение углеродного наномодификатора повышает полное смачивание поверхности минеральной подложки битумом, что приводит к росту работы адгезии. Это позволяет получить материал с более однородной структурой, чему способствуют силы взаимодействия между битумом и твердым основанием, которые приближаются к силам сцепления молекул битумного вяжущего [10].

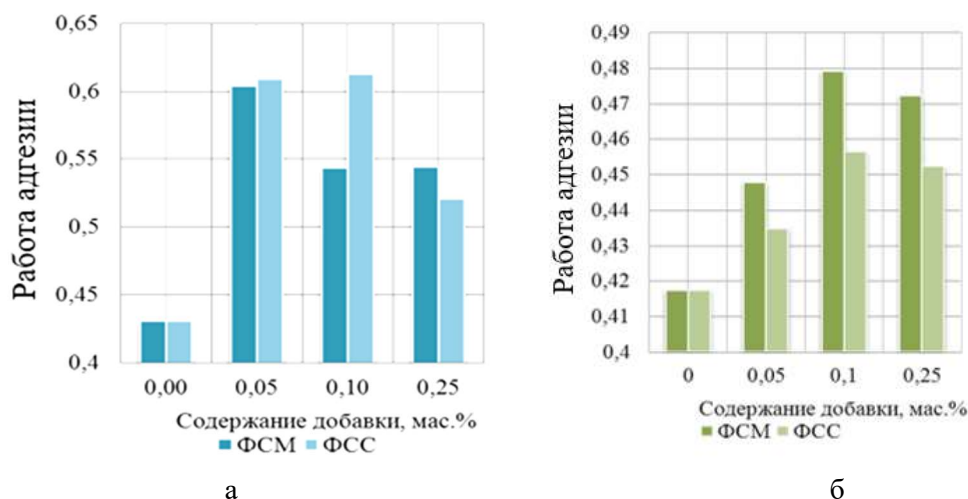


Рисунок 1 – Относительная работа адгезии при температурах: а – 120°С; б – 140°С.

#### Литература

1. Круть В.В. Адгезионная добавка для битумов полифункционального действия / В.В. Круть [и др.] – Патент России № 2130954. – 27.05.1999.
2. Шемонаева Д.С. Влияние концентрации ПАВ в битумах на свойства битумо-минеральных смесей / Д.С. Шемонаева // Повышение качества дорожных битумов. – 1975. – Выпуск 80. – 162 с.

3. Павлов А.П. Способ модификации отходов производства изопрена / А.П. Павлов, В.В. Дегтярев, А.В. Бакланов. – Патент России № 2263120. – 27.10.2005.
4. Пантелеев Е.В. Способ получения пластификатора / Е.В. Пантелеев. – Патент России № 2235716. – 10.09.2004.
5. Янсон Е.Ф. Способ получения пластификатора для резиновых смесей / Е.Ф. Янсон [и др.]. – Патент России № 2072384. – 27.01.1997.
6. Круть В.В. Адгезионная добавка к битуму для повышения сцепления с кислыми горными породами / В.В. Круть [и др.]. – Патент России № 2090580. – 20.09.1997.
7. Кольшева Е.О. Нефтяные битумы с поверхностно-активными добавками, полученными на основе низкомолекулярного полиэтилена / Е.О. Кольшева, Н.Г. Евдокимова, Р.Н. Гайнанова, В.Ф. Нигматуллин // Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2012.
8. Горюнов Ю.В. Смачивание / Ю.В. Горюнов, Б.Д. Сумм. – Москва, 1972. – 54 с.
9. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю.Г. Фролов. – Москва, 1982. – 400 с.
10. Киселев В.П. Модификация поверхностного натяжения дорожных битумов смолами пиролиза растительного сырья: химия растительного сырья / В.П. Киселев, А.А. Ефремов, К.Б. Толстихин. – 2002. – 39 с.

#### References

1. Krut V.V. Adgezionnaya dobavka dlya bitumov polifunktsionalnogo deistviya. – Russia patent no. 2130954. – 27.05.1999.
2. Shemonaeva D.S. // Povyshenie kachestva dorozhnykh bitumov. – 1975. – Issue 80. – 162 p.
3. Pavlov A.P., Degtyaryov V.V., Baklanov A.V. Sposob modifikatsii otkhodov proizvodstva izoprena. – Russia patent no. 2263120. – 27.10.2005.
4. Panteleev E.V. Sposob polucheniya plastifikatora. – Russia patent no. 2235716. – 10.09.2004.
5. Yanson E.F. et al. Sposob polucheniya plastifikatora dlya rezinovykh smesei. – Russia patent no. 2072384. – 27.01.1997.
6. Krut V.V. et al. Adgezionnaya dobavka k bitumu dlya povysheniya stsepleniya s kislymi gornymi porodami. – Russia patent no. 2090580. – 20.09.1997.
7. Kolyшева E.O., Evdokimova N.G., Gainanova R.N., Nigmatullin V.F. Neftyanye bitumy s poverkhnostno-aktivnymi dobavkami, poluchennymi na osnove nizkomolekulyarnogo polietilena // Proceedings of interuniversity scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. – Ufa: USPTU Press, 2012.
8. Goryunov Yu.V., Summ B.D. Smachivanie. – Moscow, 1972. – 54 p.
9. Frolov Yu.G. Kurs kolloidnoi khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy. – Moscow, 1982. – 400 p.
10. Kiselyov V.P., Efremov A.A., Tolstikhin K.B. Modifikatsiya poverkhnostnogo natyazheniya dorozhnykh bitumov smolami piroliza rastitelnogo syria: khimiya rastitelnogo syria. – 2002. – 39 p.

УДК 539.8, 534.2

### СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ОБЪЕМНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА ZrCuAl

© Р. М. Хуснутдинов<sup>1,2</sup>, А. В. Мокшин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет  
420008, Россия, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

<sup>2</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН  
426068, Россия, г. Ижевск, ул. Барышникова, 53  
E-mail: khrm@mail.ru

*Изучены структурные и молекулярно-динамические свойства системы ZrCuAl при температурах  $T = [250; 3000]$  К. Критическая температура стеклования системы определена по параметрам зависимостей. Анализ модельных данных определяет, что в аморфных металлических сплавах имеются икосаэдральные кластеры. Чтобы изучить способы возникновения атомных возбуждений, производится расчет продольного и поперечного спектра волновых чисел. Продольный спектр может быть описан тремя линейными зависимостями Гаусса. Поперечный спектр в аморфном сплаве может быть описан как минимум четырьмя вкладами.*

**Ключевые слова:** аморфные металлические сплавы, коллективные возбуждения, квази-икосаэдральные кластера.

## STRUCTURAL FEATURES AND MICROSCOPIC DYNAMICS OF ZrCuAl BULK METALLIC GLASS

R. M. Khusnutdinoff<sup>1,2</sup>, A. V. Mokshin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan Federal University

Kremyevskaya str., 18, Kazan 420008, Russia

<sup>2</sup>Udmurt Federal Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Baryshnikov str., 53, Izhevsk 426068, Russia

E-mail: khrm@mail.ru

*The structural and dynamic properties of the ZrCuAl system are subjected to a molecular dynamics simulation in the temperature range  $T = [250; 3000]$  K. The temperature dependences of the order parameters are used to determine the glass transition temperature in the system. Cluster analysis of configuration simulation data, reveals the existence of quasi-icosahedral clusters in amorphous metallic alloys. The current spectra are calculated in a wide wave-number range in order to study the mechanisms of formation of atomic collective excitations in the system. It was found that a linear combination of three Gaussian functions is sufficient to reproduce the longitudinal current spectra, whereas at least four Gaussian contributions are necessary to exactly describe the transverse current spectra of the amorphous metallic alloy.*

**Keywords:** amorphous metal alloys, collective excitations, quasi-icosahedral clusters.

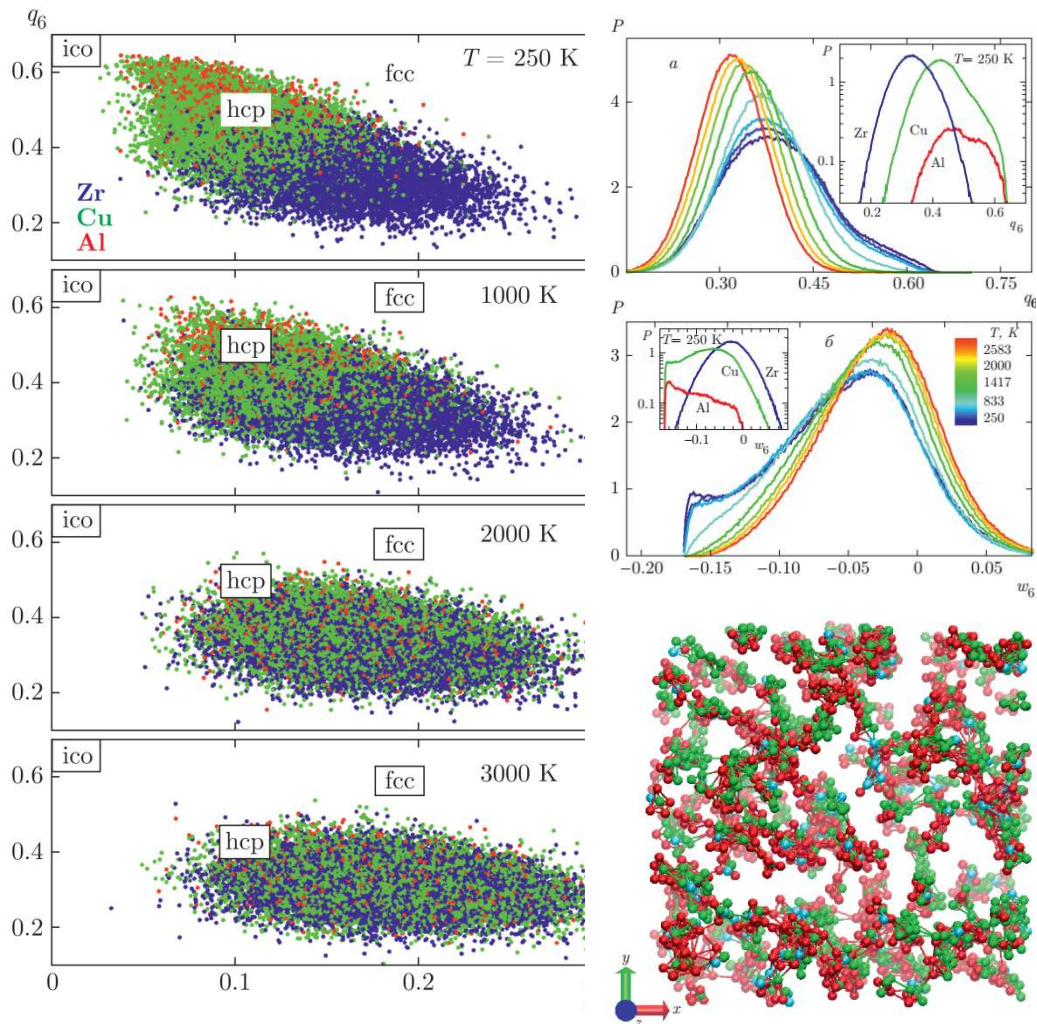
**Введение.** Аморфные металлические сплавы имеют свойства, отличающие их от кристаллических аналогов – например, высокие значения прочности и упругости, пластичности при больших деформациях, что вызывает интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Подобные сплавы являются системами из множества компонентов с высокими способностями к стеклообразованию. Их неупорядоченная фаза получается при заморозке расплава в состоянии равновесия со скоростью заморозки  $\gamma = [10^4; 10^7]$  К/с. Способы определения расплавов, имеющих возможность образовывать трехмерные металлические стекла, приведены в [1]. В [2] доказывается, что Cu-Zr расплавы имеют наибольшую способность к стеклообразованию по сравнению с аналогами. Выявлено, что способность к стеклообразованию Cu-Zr расплавов возрастает при введении менее 10 ат. % атомарного алюминия, а добавление 5-7 ат. % Al увеличивает пластичность Cu-Zr сплава [1]. Cu-Zr-Al сплавы являются основой трехмерных стекол с особыми свойствами [1, 2].

**Моделирование.** Моделируется динамика атомов  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$  в большом диапазоне температур, чтобы изучить перемены в строении и движении атомных частиц в процессе аморфизации металлического расплава, состоящего из трех компонентов. Система включает в себе  $N = 32000$  атомов, которые размещаются в ячейке в форме куба с периодическими условиями на границе, при этом контактирование атомов происходит при помощи потенциала «погруженного атома» (ЕАМ-потенциала) [3]. Приготовление сплава  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$  и переохлаждение расплава осуществлялись при помощи быстрого охлаждения при температуре  $T = 3000$  К и скорости охлаждения  $\gamma = 10^{12}$  К/с.

**Результаты и выводы.** Рисунок 1 (левая колонка) для выборки температур демонстрирует плоскостные атомные распределения на плоскости вращательных инвариантов второго рода  $q_4$ – $q_6$  [4]. Жидкая фаза (при температурах  $T \geq 2000$  К) имеет хаотически расположенные атомы; с уменьшением температуры образуются ГПУ-кластеры (hcp-like), базирующиеся на атомарном цирконии и алюминии. Далее возникает деформированная икосаэдрическая фаза (ico-like), где атомарный цирконий и алюминий располагаются в основе кластеров. Отметим, что атомарная медь хаотически расположена в любом диапазоне температур. Изменения, подобные описанным выше, происходят и в системе Cu–Zr.

Правая верхняя колонка рисунка 1 демонстрирует расположение частиц  $P(q_6)$  и  $P(w_6)$  в соответствии с их вращательными инвариантами  $q_6(i)$  и  $w_6(i)$  для диапазона температур. Отметим, что с уменьшением температуры в системе образуются частицы с  $q_6 > 0.6$  и  $w_6 < -0.15$ , что является обычным для икосаэдрической симметрии. Правильный икосаэдр имеет  $q_{6ico} \approx 0,66$  и  $w_{6ico} \approx -0,17$ , поэтому икосаэдры, наблюдаемые в системе, сильно искажены (тем не менее, они сохраняют структуру с 5 лучами). В переохлажденном расплаве и аморфном сплаве имеются группы частиц с икосаэдрической симметрией; в равновесном расплаве такие скопления не наблюдаются.

Упорядоченные группы частиц являются равномерно распределенными в пространстве частями и фрагментами икосаэдров. Правая нижняя колонка рисунка 1 представляет атомы сплава  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$  при температуре  $T = 250$  К, которые являются частью групп с икосаэдрической симметрией. Демонстрируемая структура состоит из 1894 атомов с долями Zr, Cu и Al, равными 49, 43, и 8 ат. % соответственно.



(Левая колонка): расположение атомарного циркония (синие точки), меди (зеленые) и алюминия (красные) на плоскости вращательных инвариантов  $q_4 - q_6$ ; положение частиц определено для 12 ближайших соседей. Размещение прямоугольников *ico*, *hcp* и *fcc* определяется идеальной кристаллической структурой с икосаэдрической, ГПУ- и ГЦК-симметриями. (Правая верхняя колонка): распределение  $P(q_6)$  и  $P(w_6)$  для фазы стекла при  $T = 250$  К. Видно, формирование кластеров атомарного циркония и алюминия; медь располагается хаотически. (Правая нижняя колонка): применение кластерного анализа к атомарному движению аморфного сплава при температуре  $T = 250$  К. Изображены частицы, составляющие квазиикосаэдрическую структуру. Красные точки являются частицами Zr (49 ат.%), зеленые — Cu (43 ат.%), синие — Al (8 ат.%).

Рисунок 1 – Ближний ориентационный порядок в системе  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$  в диапазоне температур

Рисунок 2 показывает продольные и поперечные спектры частот равновесного расплава при температуре  $T = 3000$  К, переохлажденного расплава ( $T = 1000$  К) и аморфного металлического сплава  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$  ( $T = 250$  К) при значении  $k = k_m/2 \approx 1.30 \text{ \AA}^{-1}$ , которое соответствует граничному значению первой псевдозоны Бриллюэна [ $k_m$  — расположение главного максимума в факторе  $S(k)$ ] и их со-

поставление с приближением, выполненным при помощи линейной комбинации функций Гаусса.

При уменьшении температуры происходит усложнение спектров с возникновением особых участков при высоких частотах  $\omega \geq 50 \text{ ps}^{-1}$ .

Чтобы учитывать особенности продольных спектров всех трех сплавов, достаточно использования линейной комбинации трех вкладов Гаусса; для поперечных спектров – четырех. Максимумы спектральных плотностей продольных и поперечных корреляционных функций являются следствием коллективных возбуждений продольной и поперечной поляризации системы  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$ .

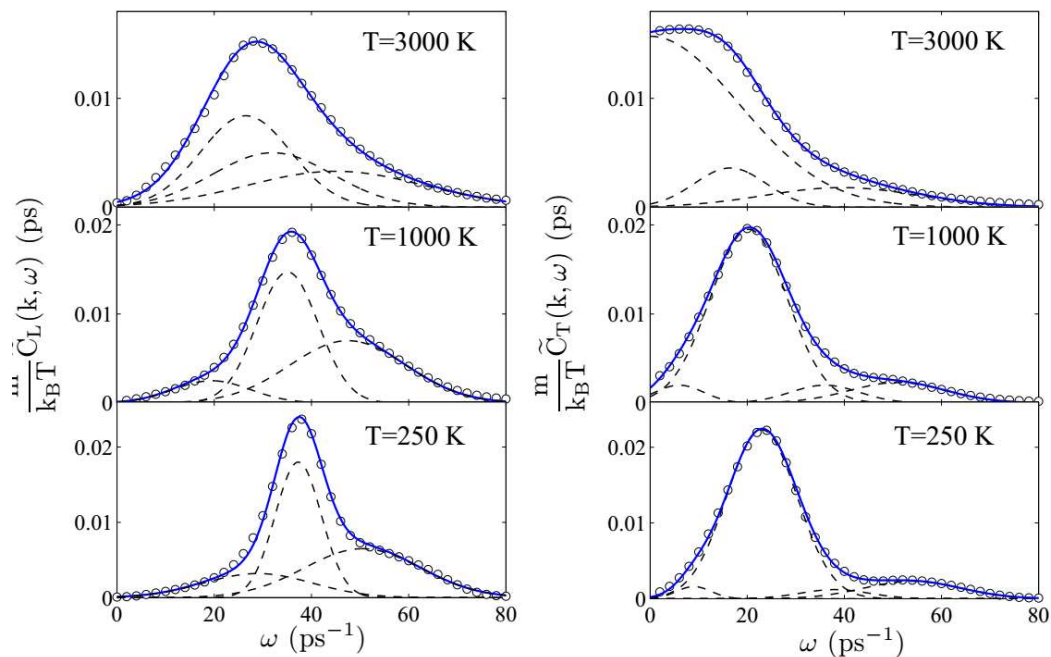


Рисунок 2 – Продольный (левая колонка) и поперечный (правая колонка) спектр для расплавов: равновесного ( $T = 3000 \text{ K}$ ), переохлажденного ( $T = 1000 \text{ K}$ ), аморфного металлического  $Zr_{47}Cu_{46}Al_7$  ( $T = 250 \text{ K}$ ) при  $k \approx 1.30 \text{ \AA}^{-1}$ : кружки — моделирование атомного движения; синие линии — приближение, выполненное при помощи линейной комбинации функций Гаусса; черные прерывистые линии — индивидуальные вклады

Работа поддержана Российским Научным Фондом (проект 19-12-00022). Вычислительная часть работы, связанная с моделированием молекулярной динамики, выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№18-02-00407-а).

#### Литература

1. Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys / A. Inoue // Acta Mater. – 2000. – № 48(1). – С. 279-306.
2. Wu W.F. Bulk metallic glass formation near intermetallic composition through liquid quenching / W.F. Wu, Y. Li // Appl. Phys. Lett. – 2009. – № 95. – С. 011906(1)-011906(3).
3. Cheng Y.Q. Atomic Level Structure in Multicomponent Bulk Metallic Glass / Y.Q. Cheng, E. Ma, H. W. Sheng // Phys. Rev. Lett. – 2009. – № 102. – С. 245501(1)-245501(4).
4. Steinhardt P.J. Bond-orientational order in liquids and glasses / P.J. Steinhardt, D.R. Nelson, M. Ronchetti // Phys. Rev. B. – 1983. – № 28(2). – С. 784-805.



### References

1. Inoue A. // Acta Mater. – 2000. – No. 48(1). – P. 279-306.
2. Wu W.F., Li Y. // Appl. Phys. Lett. – 2009. – No. 95. – P. 011906(1)-011906(3).
3. Cheng Y.Q., Ma E., Sheng H. W. // Phys. Rev. Lett. – 2009. – No. 102. – P. 245501(1)-245501(4).
4. Steinhardt P.J., Nelson D.R., Ronchetti M. // Phys. Rev. B. – 1983. – No. 28(2). – P. 784-805.

УДК 691.32

## ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ

© А. В. Шаранова, М. А. Дмитриева, А. А. Захаров  
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта  
236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14  
E-mail: a.sharanova@gmail.com

*Наномодифицированный бетон получается из многокомпонентных сухих строительных смесей на основе портландцемента, содержащих наноразмерные частицы заполнителя. В качестве наномодификатора в данной работе исследуется активированная в высокоэнергетической мельнице цементно-песчаная смесь. Результатом является увеличение прочности бетона в начальные сроки твердения. Анализируется влияние фракционных характеристик песка на процесс активации. Исследованы 3 пробы песка различных месторождений Калининградской области, характеризующихся различной крупностью и содержанием пылевидных и глинистых частиц. Приведены результаты испытаний образцов мелкозернистого бетона с активированными и неактивированными компонентами на начальную прочность при сжатии в возрасте 0-90 минут после приготовления смеси. Отмечается, что механическая активация цементно-песчаной смеси наиболее эффективна, когда в активированном песке присутствуют крупные фракции.*

**Ключевые слова:** наномодифицированный бетон, механическая активация, цемент, песок, наномодификатор.

## FORMATION OF THE PROPERTIES OF NANO-MODIFIED CONCRETES

A. V. Sharanova, M. A. Dmitrieva, A. A. Zakharov  
Immanuel Kant Baltic Federal University  
Aleksandra Nevskogo str., 14, Kaliningrad 236041, Russia  
E-mail: a.sharanova@gmail.com

*Nano-modified concrete is obtained from multicomponent dry construction mixtures based on Portland cement, containing nanoscale aggregate particles. In this work, the cement-sand mixture activated in a high-energy mill is investigated as a nano-modifier. The increase in concrete strength in the early stages of hardening is the result of the introduction of such a nano-modifier. The influence of sand fractional characteristics on the activation process is analyzed. Three samples of sand from various locations of the Kaliningrad region, characterized by different size and content of dust and clay particles, were investigated. The results of testing samples of fine-grained concrete with activated and non-activated components for initial compressive strength at the age of 0-90 minutes after preparation of the mixture are given. It is noted that the mechanical activation of the cement-sand mixture is most effective when large fractions are present in the activated sand.*

**Keywords:** nano-modified concrete, mechanical activation, cement, sand, nano-modifier

## 1. Введение

Современные строительные композиционные материалы – это многокомпонентные и полидисперсные системы, включающие в себя различные модифицирующие добавки, ультрадисперсные компоненты и т.д. Одним из ключевых факторов применения нанотехнологий в строительном материаловедении должно быть достижение требуемого или максимального качества материала при минимальных затратах ресурса. В качестве первичного наноматериала в данной работе рассматривается тонкомолотая смесь портландцемента и песка, полученная путем совместной механической активации в высокоскоростной шаровой мельнице. Механическая активация обеспечивает увеличение скорости схватывания бетонов и более полное использование вяжущих свойств цемента [1]. По результатам проведенных ранее работ было доказано, что такой вид активации является наиболее эффективным [2]. Бетонная смесь, содержащая тонкомолотую цементно-песчаную смесь, быстрее схватывается и показывает существенный прирост прочности на начальных сроках твердения. Такая смесь может быть использована в строительной 3D печати бетоном, так как отвечает требованиям по прочности для выдерживания веса вышенапечатанных слоев [3-6].

## 2. Материалы и методы

В качестве исследуемых компонентов для активации используются пески с различных месторождений Калининградской области: песок морской средней крупности (ПМ); песок с карьера пос. Синявино (ПС), мелкий; песок с карьера Рыбачье (ПР), очень мелкий. Крупность песка определялась по ГОСТ 8735-88 через модуль крупности. Была проведена совместная механическая активация цемента и песка в высокоскоростной шаровой мельнице Retsch EMax, измерена начальная прочность образцов. По результатам ранее проведенных работ по подбору состава для аддитивных технологий в строительстве, был определен оптимальный состав, отвечающий требованиям 3D печати бетоном [7]. Из этого состава изготовлены смеси мелкозернистого бетона с активированными и неактивированными компонентами.

### 2.1 Материалы

Используемые материалы: Цемент: портландцемент Евроцем 500 супер, ЦЕМ I 42,5Н, ООО «Петербург цемент»; Песок: для состава №1: морской песок с берега пос. Янтарный, Калининградская область; для состава №2: песок с карьера пос. Синявино, Калининградская область; для состава №3: песок с карьера Рыбачье, Калининградская область; Микрокремнезем (МКР): отходы металлургической промышленности, производство Польша; Метакраолин (ВМК): высокоактивный (ВМК-45), белый, производство ООО «СИНЕРГО», Челябинская обл., Полипропиленовое фиброволокно: длина волокон 10-12 мм, толщина 12 мкм, производитель Россия; Stachement 1267: гиперпластификатор на основе полакарбоксилатов, производитель Stachema, Польша.

Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Расход материалов на 1 м<sup>3</sup>

В/Ц	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Вода, л/м <sup>3</sup>	МКР, кг/м <sup>3</sup>	ВМК, кг/м <sup>3</sup>	Фиброволокно, кг/м <sup>3</sup>	St. 1267, л/м <sup>3</sup>
0,66	545	1168	360	156	78	1,2	11,7

Характеристики песков по ГОСТ 8735-88 [8] представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики используемых песков

№	Месторождение	Усл. обозначение	Мк	Класс песка	Группа	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пустотность, %
1	пляж пос. Янтарный	ПМ	2,1	-	Средний	-	2612	1474	43,6
2	карьер пос. Синявино	ПС	2	II	Мелкий	2,2	2642,5	1330	49,7
3	карьер Рыбачье	ПР	1,34	II	Очень мелкий	3,6	2551	1500,8	41,2

Внешний вид песков представлен на рисунке 1.



Рисунок 1: а – песок морской (ПМ), б – песок карьер пос. Синявино (ПС), в – песок карьер Рыбачье (ПР)

## 2.2 Методы

Совместная механическая активация цемента и песка выполнялась в высокоскоростной шаровой мельнице Retsch EMax при скорости 1000 об/мин в течение 5 минут, так как такой режим активации является наиболее эффективным [1]. В качестве мелющих тел были использованы корундовые шары диаметром 6 и 10 мм в пропорции 1:1 по массе. Отношение измельчаемая смесь/мелющие тела равно 1:2.

Рассмотрены 6 составов исходных строительных смесей: 1. – ЦПМ – на неактивированной смеси с использованием песка ПМ; 2 – ЦПМА – на активированной смеси с использованием песка ПМ; 3 – ЦПС – на неактивированной смеси с использованием песка ПС; 4 – ЦПСА – на активированной смеси с использованием песка ПС; 5 – ЦПР – на неактивированной смеси с использованием песка ПР; 6 – ЦПРА – на активированной смеси с использованием песка ПР.

Далее были изготовлены образцы-кубы размером 20×20×20 мм с активированными и неактивированными компонентами в соответствии с расходом материалов, представленным в Таблице 1.

Образцы были испытаны на прочность при сжатии в начальные сроки схватывания (0-90 минут с шагом 15 минут) на испытательной машине Instron Electropuls E1000.

### 3. Результаты

Результаты испытаний образцов на прочность в начальные сроки схватывания представлены на графике (рисунок 2). На графике сплошными линиями обозначен рост прочности образцов с неактивированными компонентами, набор прочности образцов с активированными компонентами обозначен пунктирной линией.

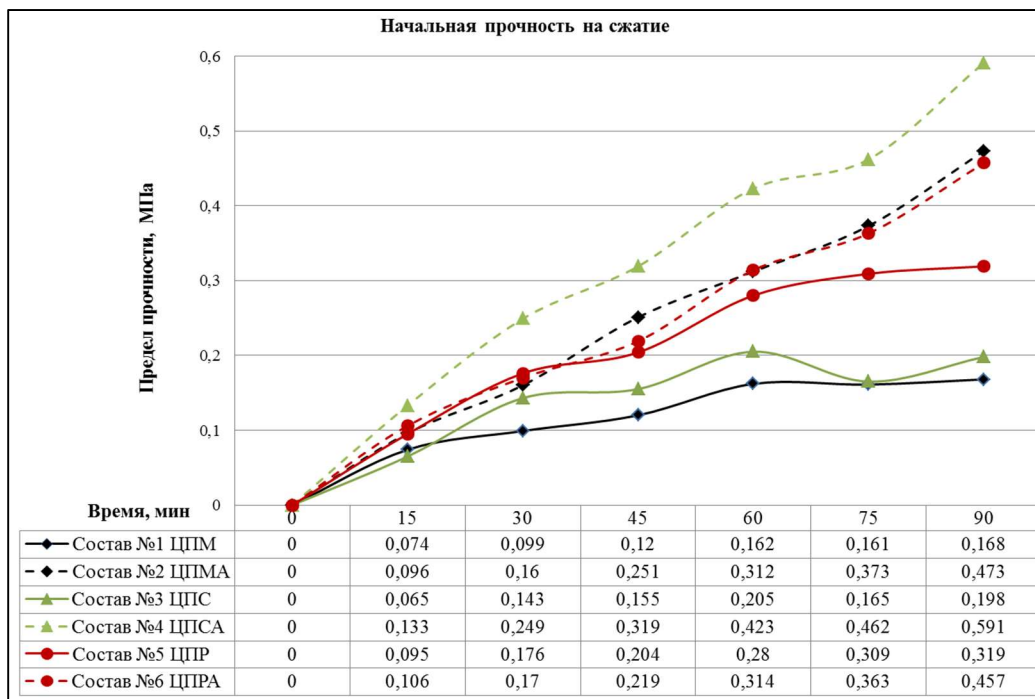


Рисунок 2 – Результаты испытания на прочность

Отмечается зависимость начальной прочности образцов с неактивированными компонентами (составы № 1, 3, 5) от крупности песка. Образцы состава № 1 с морским песком средней крупности показывают наименьший набор прочности в первые 90 минут твердения, образцы состава №5 с очень мелким песком карьера Рыбачье обладают наибольшей прочностью. Образцы состава №3 с мелким песком показывают среднюю прочность.

Составы с совместной активацией цемента и песка (№ 2, 4, 6) показывают прирост прочности по сравнению с соответствующими образцами без активации (№ 1, 3, 5). Наблюдается существенное повышение прочности у составов №2 и №4. Так, прочность в возрасте 90 минут у состава №2 повышается в 2,81 раза или на 181% относительно состава №1. Прочность состава №4 в возрасте 90 минут повышается в 2,98 раза или на 198,4% относительно состава №3. В то же время, практически не наблюдается разницы в прочности образцов составов № 5 и 6: в возрасте 90 минут прочность состава №6 повышается в 1,43 раза или на 43,3%. Следовательно, механическая активация песков, относящихся к группе очень мелких, неэффективна. Результаты испытаний показывают, что совместная активация цемента и песка дает существенный набор прочности в начальные сроки схватывания только в том случае, когда в активированном песке присутствуют крупные фракции.

#### 4. Заключение

Использование наномодифицированных добавок, полученных в результате совместной активации цемента и песка на энергонасыщенных шаровых мельницах, приводит к увеличению прочности бетона в начальные сроки твердения. Анализ влияния исходных характеристик песка на процесс активации показал, что механическая активация цементно-песчаной смеси наиболее эффективна, когда в активируемом песке присутствуют крупные фракции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390001 "Многокомпонентные наномодификаторы бетонных смесей".

#### *Литература*

1. *Андреева А. В.* Совместная активация минеральной части мелкозернистого бетона / А. В. Андреева, Н. Н. Давыдова, О. Н. Буренина // Новые материалы и технологии в условиях Арктики. – 2014. – С. 222–225.
2. *Шаранова А.В.* Влияние механической активации исходных компонентов на механические свойства бетонной смеси / А.В. Шаранова, Д.А. Ленкова, А.Д. Панфилова // Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, 2018. – Ч. 2. – С. 108-114.
3. *Buswell R.A.* 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R.A. Buswell, W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger // Cement and Concrete Research. – 2018. – № 112. – С. 37-49.
4. *Panda B.* Investigation of the rheology and strength of geopolymers for extrusion-based 3D printing / Biranchi Panda, Cise Unluer, Ming Jen Tan // Cement and Concrete Composites. – 2018. – № 94. – С. 307-314.
5. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink / Yu Zhang [и др.] // Construction and Building Materials. – 2018. – № 174. – С. 263-271.
6. *Panda B.* Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing / Biranchi Panda, Ming Jen Tan // Ceramics International. – 2018. – № 44(9). – С. 10258-10265.
7. *Шаранова А.В.* Подбор композиций, пригодных для реализации аддитивных технологий в строительстве / А.В. Шаранова, М.А. Дмитриева // Современные строительные материалы и технологии: сб. науч. тр.; под ред. М.А. Дмитриевой. – Калининград: Издательство Балтийского федерального университета, 2019. – С. 51-72.
8. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. — Москва: Стандартинформ, 2018.— 34 с. – Введен 01.07.1989.

#### *References*

1. *Andreeva A.V., Davydova N.N., Burenina O.N.* // Novye materialy i tekhnologii v usloviyakh Arktiki. – 2014. – P. 222–225.
2. *Sharanova A.V., Lenkova D.A., Panfilova A.D.* // Aktualnye problemy stroitelstva: proceedings of 71<sup>st</sup> All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists in 3 parts. – Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering Press, 2018. – Part 2. – P. 108-114.
3. *Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J.* // Cement and Concrete Research. – 2018. – V. 112. – P. 37-49.
4. *Biranchi Panda, Cise Unluer, Ming Jen Tan* // Cement and Concrete Composites. – 2018. – No. 94. – P. 307-314.

5. Yu Zhang, Yunsheng Zhang, Guojian Liu, Yonggan Yang, Meng Wu, Bo Pang // Construction and Building Materials. – 2018. – No. 174. – P. 263-271.

6. Biranchi Panda, Ming Jen Tan // Ceramics International. – 2018. – No. 44(9). – P.10258-10265.

7. Sharanova A.V., Dmitrieva M.A. // Modern Building Materials and Technologies: collection of scientific papers. – Kaliningrad: Baltic Federal University Press, 2019. – P. 51-72.

8. GOST 8735-88. Sand for construction work. Testing methods. – Moscow: Standardinform, 2018. – 34 p. – Introduced 01.07.1989.

УДК 544.47, 546.92, 546.97

## STUDY OF PLATINUM AND RHODIUM CATALYSTS SUPPORTED ON ALUMINA FOR THE REACTION OF PARTIAL OXIDATION OF HYDROCARBONS

© K. I. Shefer<sup>1,2,a</sup>, L. M. Kovtunova<sup>1,2,b</sup>, V. N. Rogozhnikov<sup>1,c</sup>, O. A. Stonkus<sup>1,2,d</sup>, I. A. Chetyrin<sup>1,e</sup>, T. V. Larina<sup>1,f</sup>, E. A. Suprun<sup>1,g</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center Boreskov Institute of Catalysis  
630090, ak. Lavrentieva Avenue, 5, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, 630090, Pirogova St., 2, Novosibirsk, Russia

E-mail: <sup>a</sup>shefer@catalysis.ru, <sup>b</sup>kovtunova@catalysis.ru, <sup>c</sup>rvn@catalysis.ru, <sup>d</sup>stonkus@catalysis.ru, <sup>e</sup>chetyrin@catalysis.ru, <sup>f</sup>larina@catalysis.ru, <sup>g</sup>suprun@catalysis.ru

*The work is devoted to the preparation and characterization of catalysts for the reaction of partial oxidation of hydrocarbons based on platinum and rhodium supported by  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. First of all, we characterized the supports and their precursors: Pt(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>PtCl<sub>4</sub>, [Pt(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Cl<sub>2</sub>, [Pt(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> for platinum, Rh(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, RhCl<sub>3</sub> for rhodium. Then we obtained catalysts by wetness impregnation from various precursors of active components for platinum and for rhodium. We studied the phase composition, structural features and catalyst properties using different physicochemical methods. The sizes of the platinum particles and the unit cell parameters vary depending on the precursor type. For rhodium-containing samples, the ratio of metallic to trivalent rhodium changes.*

**Keywords:** alumina, platinum, rhodium, partial oxidation of hydrocarbons, supported catalysts.

The reaction of partial oxidation of hydrocarbons is of great importance for industry, including the production of synthesis gas and hydrogen and for the afterburning of waste gases. These processes promote more complete use of resources and a reduction of the negative impact of anthropogenic factors on the environment. They are extremely important in the areas of environmental safety and resource-saving energy. The search for an affordable, stable and effective catalyst for this reaction is still relevant.

In this work, we considered catalysts with platinum and rhodium as active component. A modification of aluminum oxide  $\theta$ , obtained by calcining bayerite hydroxide, was used as catalyst support. This alumina modification is less studied than the carriers  $\alpha$  and  $\gamma$ , for example, but they also have great prospects for use [1, 2]. We used a new aluminate method to obtain aluminum hydroxides and oxides [3].

Since the preparation method of the catalyst and the physicochemical properties of the support affect the state of the active component, the objective of this work is to study this effect. A detailed structural study of platinum and rhodium catalysts on the proposed supports has not yet been conducted.

We considered the process of the support and its precursor transformation during the process of catalyst preparation. Aluminum hydroxide (bayerite) was obtained by crystallization from supersaturated aluminate solutions of metallic aluminum. Calcination of this hydroxide at 600 °C leads to the formation of  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Next, the sample was treated at 800 °C. As a result, the formation of  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> began. The oxide obtained at this temperature can be called undisturbed  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, since the transition of  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> begins but does not complete (figure 1). Next, the support was sequentially treated with NaOH and HNO<sub>3</sub>, which was necessary to remove the iron impurities contained in the initial metallic aluminum. According to elemental chemical analysis, as a result we reduced the iron content from 0,5% to 0,1%.

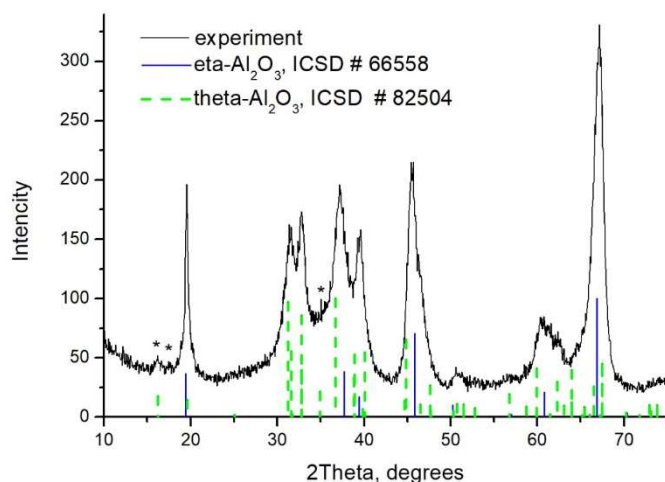


Figure 1 – Experimental diffraction pattern of the support and the bar graphs of  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Asterisks indicate peaks of iron oxide

We obtained catalysts from different precursors of the active component: Pt (NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>PtCl<sub>4</sub>, [Pt (NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Cl<sub>2</sub>, [Pt(NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> in the case of platinum and Rh(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, RhCl<sub>3</sub> in the case of rhodium. The method of preparation of the Pt/ $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts consists of impregnating alumina with an aqueous solution of the precursor followed by calcining at 800°C in air. After that, the samples were recovered in a stream of H<sub>2</sub> at 330°C.

We obtained difference intensity curves to perform the phase analysis of supported catalysts. The characteristics of deposited platinum and rhodium change for samples obtained from different precursors.

As confirmed by XPS data, the samples of rhodium catalysts consist of a mixture of rhodium oxide and metallic rhodium, both before and after the recovery of catalyst samples. According to X-ray phase analysis, when we use rhodium chloride as the precursor, a rhodium metal phase forms with a particle size of 150 Å and unit cell parameters of 3,804 Å.

The characteristics of the platinum catalysts also differ depending on the type of precursor. Before recovery, the samples contain platinum oxide phases. According to the X-ray diffraction and XPS data, metallic platinum is formed in all the recovered samples. The results of the X-ray diffraction data of the recovered catalyst samples are presented in Table 1. The table shows that in the case of dispersed platinum, the values

of the unit cell parameter decrease, and in the case of platinum with large particle sizes, the values of the unit cell parameter increase.

Table 1 – Plation characteristics from diffraction data

Precursor	Particle size, Å	Unit cell parameters, Å
[Pt(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> ]Cl <sub>2</sub>	30	3,910
Pt(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	25	3,906
[Pt(NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ]	400	3,920
K <sub>2</sub> PtCl <sub>4</sub>	85	3,927
H <sub>2</sub> PtCl <sub>6</sub>	30, 380	–

The UV-Vis diffuse reflection spectroscopy data confirmed the conclusion about the samples' phase composition and the active component's state.

According to electron microscopy data, the sample obtained using H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> has the narrowest size distribution of platinum particles (0,8-1,5 nm) and the most uniform distribution of these particles over the surface of aluminum oxide (figure 2). In the rest of the samples, apart from individual platinum particles, there are aggregates of particles (figure 3) and a strong particle size distribution. The UV-Vis diffuse reflection spectroscopy data confirms the presence of aggregates in the samples. The ESDO data confirmed the conclusion about the phase composition of the samples and the state of the active component.

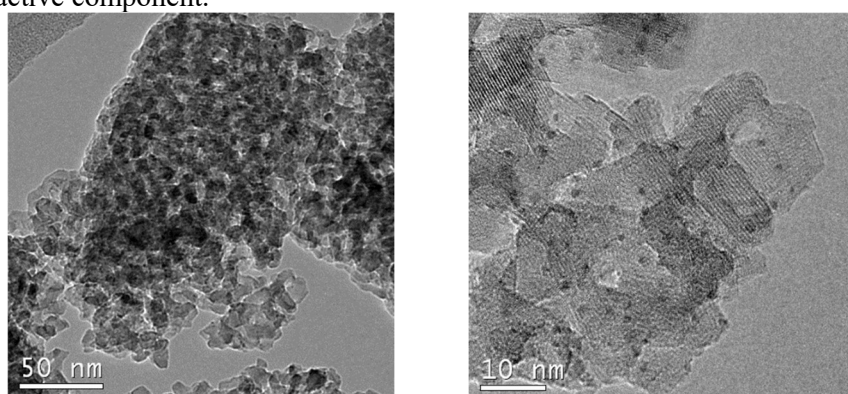


Figure 2 – Microphotography for Pt/θ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample obtained from H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>

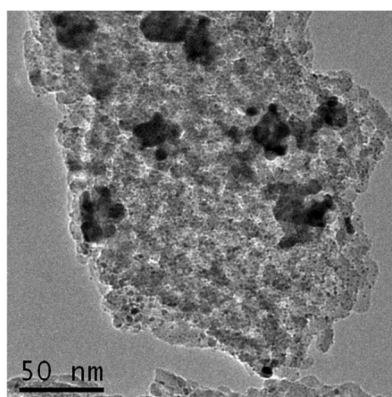


Figure 3 – Microphotography for Pt/θ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample obtained from [Pt(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]Cl<sub>2</sub>



Thus, we analyzed the samples of supports and catalysts with platinum and rhodium active components. After the reduction in hydrogen current, platinum metal is formed. In samples with rhodium, in addition to metallic rhodium, trivalent rhodium is present. Depending on the precursor, the forming platinum has different particle sizes and unit cell parameters. The use of  $H_2PtCl_6$  as the precursor leads to the most evenly distributed platinum over aluminum oxide. In samples with rhodium obtained from different precursors, the ratio of different phases of rhodium changes.

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-03-00595.

#### References

1. Della Gatta G., Fubini B., Ghiotti G., Morterra C. // J. Catal. – 1976. – V. 43. – P. 90–98.
2. Bolis V., Cerrato G., Magnacca G., Morterra C. // Thermochem. Acta. – 1998. – V. 312. – P. 63–77.
3. Porsin A.V., Kulikov A.V., Rogozhnikov V.N., Serkova A.N., Salanov A.N., Shefer K.I. // Catalysis Today. – 2016. – V. 273. – P. 213–220.

УДК 621.785.539

### COMPLEX SATURATION OF CORROSION RESISTANT STEELS AISI 430 AND AISI 303 WITH BORON AND CARBON

© Mei Shunqi<sup>1</sup>, A. M. Guriev<sup>1,2,a</sup>, S. G. Ivanov<sup>3,b</sup>, M. A. Guriev<sup>2,c</sup>, B. D. Lygdenov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wuhan Textile University, 430200, China, Hubei, Wuhan, Sunshine Avenue No.1

<sup>2</sup>Altay State Technical University, 656038, Russia, Barnaul, Lenina str., 46

<sup>3</sup>LLC «Hardening Technology», 656063, Russia, Barnaul, Turinogorskaya str., 39A

E-mail: <sup>a</sup>gurievam@mail.ru, <sup>b</sup>serg225582@mail.ru, <sup>c</sup>gurievma@mail.ru

*Studies have been conducted on the effect of the degree of doping with chromium and nickel on the formation of boride coatings on steels 12X17 (AISI 430) and 12X18H9 (AISI 303). The saturation was carried out in a SNOL-type chamber furnace equipped with a PID controller from a powder saturating medium in an unsealed crucible. A mixture of boron carbide powders (70 wt.%), potassium tetraborate  $KBF_4$  (7 wt.%) and graphite – up to 100% was used as a saturating medium. The process temperature was 900°C, the saturation time was 2.5 hours. Upon completion of the high-temperature exposure, the crucibles were removed from the furnace and cooled in air to a temperature of 50–60 °C. Diffusion coatings with a total thickness of 120 μm were formed on steel 12X17 and 75–85 μm on steel 12X18H9. The thickness of the boride layer for both steels was 45–50 μm.*

**Keywords:** hardening, diffusion, chemical heat treatment, boron.

Corrosion-resistant high-chromium steels are highly resistant to corrosion in aggressive environments. Therefore, they are used for the production of parts operating in corrosive environments. Since the high-alloyed steels containing a large number of alloying elements, the main of which are chromium and nickel, they also belong to expensive steels.

These factors are fundamental for maximizing the service life of parts manufactured from high-chromium corrosion-resistant steels. One of the probable ways to increase the service life of parts in the conditions of complex wear in aggressive environments

containing a large number of abrasive particles is the method of boronizing. However, with an increase in the degree of doping, diffusion processes of the formation of coatings are significantly inhibited. One of the ways to intensify the formation of diffusion boride coatings is the simultaneous complex saturation of boron together with other elements [1-3].

In the present work, studies were conducted on the effect of the degree of doping with chromium and nickel on the formation of boride coatings on steels AISI 430 and AISI 303. The elemental composition of the heats of steel is presented in table 1. As can be seen from this table, the elemental composition of these steels is almost the same, with the exception of nickel. The saturation was carried out in a SNOL-type chamber furnace equipped with a PID controller from a powder saturating medium in an unsealed crucible. A mixture of boron carbide powders (70 wt.%), potassium tetraborate  $KBF_4$  (7 wt.%) and graphite — up to 100% [3–5] was used as a saturating medium. All components of the saturating medium were ground in a ball mill to a fraction of 80–100  $\mu m$ . The process temperature was 900  $^{\circ}C$ , the saturation time was 2.5 hours. Upon completion of the high-temperature exposure, the crucibles were removed from the furnace and cooled in air to a temperature of 50–60  $^{\circ}C$ . Then the samples were removed from the saturating medium and washed in a warm soap-soda solution. The study of transverse microsections was carried out according to the procedures given in [6, 7].

Table 1 – The elemental composition of the heats of steels involved in the work

Steel	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr
AISI 430	0,092	0,637	0,781	0,012	0,016	0,117	17,356
AISI 303	0,098	0,722	0,877	0,013	0,011	9,863	17,981

The microstructure of the diffusion coatings obtained is shown in figure 1.



Figure 1 – The microstructure of the diffusion coating, obtained by simultaneous saturation of boron and carbon on steels: a – AISI 430, b – AISI 303

As can be seen from the presented in figure 1 microstructures, diffusion coatings formed on both steels with total thickness: 120  $\mu m$  on AISI 430 steel and 75–85  $\mu m$  on AISI 303 steel. The thickness of the boride layer for both steels was 45–50  $\mu m$ .

Since AISI 430 steel has a ferrite structure, and AISI 303 steel has an austenite structure and both phases are not etched, etching makes it possible to reveal the diffusion paths of boron and carbon along the corresponding phases, which are formed with their participation. According to [1, 3, 5], boronizing of high-chromium steels, chro-

mium does not form its own borides, but dopes iron borides. Similar data are given for nickel. In the case of simultaneous saturation with boron and carbon, it is logical to assume that, along with borides, the formation of carbides and carboborides of complex composition is also possible. The main way of diffusion of active atoms of boron and carbon are the grain boundaries, this is especially visible in figure 1b. The layer of borides in the steels AISI 430 and AISI 303 does not have a needle-like morphology characteristic of boride layers, but the interface is not smooth – there is a smooth transition from one zone to another, typical of diffusion coatings.

The distribution of microhardness over the cross section of diffusion coatings is shown in figure 2. As can be seen from the graphs presented, the diffusion coating on AISI 303 steel has a lower microhardness compared to AISI 430 steel due to the effect of nickel.

Presented in figure 2 graphs are the result of statistical data processing – each point of the main graph is an average of 15 measurements, each point on the incut is the result of 10 measurements.

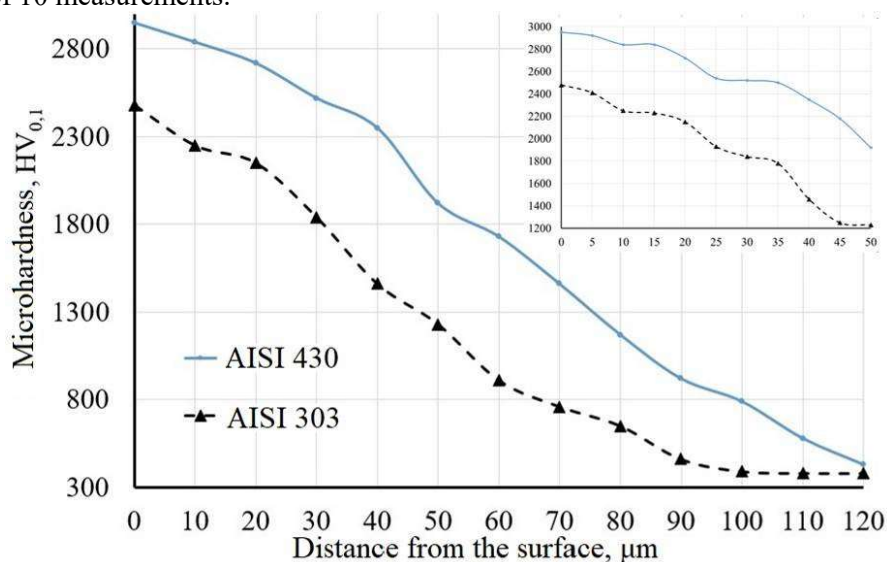


Figure 2 – Distribution of microhardness over the cross section of diffusion coating on AISI 430 and AISI 303 steels after combined diffusion saturation with boron and carbon

#### References

1. *Kayali Y.* // Phys. Metals Metallogr. – 2013. – No. 114. – P. 1061. – DOI: 10.1134/S0031918X1322002X.
2. *Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guriev M.A., Guriev A.M., Starostenkov M.D.* Features of Multicomponent Saturation Alloyed by Steels. – Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2015.
3. *Dybkov V.* // Powder Metall Met Ceram. – 2017. – No. 55. – P. 650. – DOI: 10.1007/s11106-017-9852-1.
4. *Gur'ev A.M., Ivanov S.G., Gur'ev M.A. et al.* // Steel Transl. – 2015. – No. 45. – P. 555. – DOI: 10.3103/S0967091215080057.
5. *Garmaeva I.A., Guriev A.M., Ivanova T.G., Guriev M.A., Ivanov S.G.* // Lett. Mater. – 2016. – No. 6(4). – P. 262-265.
6. *Vander Voort G., Pakhomova O., Kazakov A.* // Materials Performance and Characterization. – 2016. – No. 5. – P. 521-534.
7. *Kazakov A., Kiselev D.* // Microsc. Microanal. – 2015. – No. 21. – Suppl. 3. – P. 457-458.

# МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

---

---

УДК 539.4

## ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО ПРОЧНОСТИ

© В. Митрофанов

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)  
125993, Россия, г. Москва, ул. Волоколамское шоссе, д. 9  
E-mail: Oleg1Mitrofanov@yandex.ru

*Представлен обзор некоторых современных инженерных задач обеспечения несущей способности и проектирования панелей из композитных материалов авиационных конструкций. Отмечено, что в современных условиях при проектировании несущих панелей используется идеология допустимости повреждений и дефектов. С учетом действующих нормативных документов при проектировании необходимо учитывать ограничения по остаточной прочности, остаточной устойчивости несущих композитных панелей с дефектами и повреждениями, а также исследовать закритическое поведение тонких панелей с учетом геометрической нелинейности при нагрузках выше эксплуатационного уровня.*

**Ключевые слова:** инженерные задачи, панели, проектирование, остаточная прочность, остаточная устойчивость, закритическое поведение.

## AIRCRAFT COMPOSITE PANELS LOAD-BEARING CAPACITY APPLIED PROBLEMS SUBJECT TO STRENGTH CONSTRAINTS

O.V. Mitrofanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
9 Volokolamskoye Shosse, Moscow 125993, Russia  
E-mail: Oleg1Mitrofanov@yandex.ru

*A review of modern design and load-bearing capacity engineering problems of aircraft composite panels is shown. It is noted that in the modern context damage and defects tolerance philosophy is used when designing load-bearing panels. Taking into account current regulations it is necessary to account for defected and damaged load-bearing composite panels residual strength and residual stability constraints in design and to examine thin panels post-buckling behavior taking into account geometrical non-linearity when loaded above limit level.*

**Keywords:** engineering problems, panels, design residual strength, residual stability, post-buckling behavior.

Рассмотрен вопрос обеспечения ресурса и прочности несущих панелей пассажирских самолетов. При внедрении композитов (КМ) в конструкции российских самолетов необходимо проведение исследований прочностных свойств композитных конструкций.

### **Остаточная прочность панелей при наличии дефектов.**

Расчеты остаточной прочности необходимы для выполнения требований п.25.571 ("Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкций") авиационных правил АП-25. Вопросы проектирования бездефектных композитных конструкций обсуждаются на ранних этапах проектирования. Дефекты допустимы при проектировании тонкостенных композитных конструкций [1]. В соответствии с циркуляром АС20 [1] прочность конструкции должна быть обеспечена при расчетных нагрузках с учетом возможности возникновения микроскопических дефектов (BVID). Задача определения требуемого уровня прочности при наличии дефектов разных категорий и при разных значениях прикладываемой нагрузки является актуальной. Кроме того, необходимо рассмотреть вопрос обеспечения остаточной прочности при наличии дефектов 2 и 3 категории и нагрузках, превышающих эксплуатационные на 20%. Данное ограничение вносит значительный вклад в усложнение задачи оптимального проектирования, которая подразумевает задействование трех уровней нагружения при нескольких разновидностях имеющихся дефектов. Кроме того, характеристики дефектов не приведены в нормативных документах, поэтому разработчик должен определять их самостоятельно и впоследствии согласовывать с авиационными властями. Таких исследований на сегодняшний момент недостаточно.

Остаточная прочность композитов рассчитывается по модели с двумя параметрами, для чего необходимо значительное число испытаний [2]. В наши дни метод конечных элементов, учитывающий развивающееся разрушение, используется в авиаконструкторских бюро для расчетов остаточной прочности с I и II категориями разрушения. В этом случае модель с двумя параметрами выдает относительно точные результаты, в прочих случаях накапливается большая погрешность. Что касается III и IV категорий, то в этом случае необходимо использование численных методов механики разрушения композитов. Отметим, что все указанные расчеты основаны на предположении прочностного характера разрушения панелей и не учитывают напряжений от изгиба, вследствие которых в панелях возникают большие поперечные деформации.

### **Остаточная прочность и устойчивость панелей с дефектами**

В [3] предлагаются расчеты остаточной прочности и устойчивости после ударного взаимодействия, что является дальнейшим развитием численных методов для расчетов композитных конструкций и включает определение остаточной прочности (при развивающемся разрушении) и устойчивости (геометрически нелинейная задача), а также предлагает решение с использованием результатов со ссылкой на испытания панелей образцов, имеющих повреждения после ударов. Особенность заключается в учете механизма потери устойчивости и закритического поведения, а не простого прочностного разрушения обшивки. В [3] отмечено: происходила потеря устойчивости панелей после снятия нагрузки, и они переходили в плоское состояние, близкое исходному – так, что без просмотра видеозаписей испытаний можно было сделать вывод о плоском деформировании образца. Максимальная амплитуда деформирования панелей превышала их толщину, что требует применения нелинейной геометрии в прочностном расчете. Термин “остаточная устойчивость” введен в 2012 г. в [4]. Разрушение носит смешанный характер с учетом механики разрушения панелей при ударных повреждениях с учетом закритического поведения.

Эксперименты показали, что проектирование панелей должно осуществляться с учетом остаточной устойчивости, нелинейной геометрии и возможных повреждений. Проведено уточнение постановки задачи: определение несущей способности панелей с учетом закритического поведения, геометрической нелинейности с использованием гипотезы прогрессирующего разрушения в зоне дефекта.

#### **Усталость композитных элементов конструкций.**

Для композитных крыльев сжатие верхних панелей определяет ресурс. Ресурс соединений с учетом допустимых дефектов решающим образом определяет усталостный расчет композитных элементов конструкций.

Усталость композитных конструкций обсуждается в [5], где рассмотрены пошаговые методики расчетов. Данная работа является единственной в своем роде за истекшие 20 лет. Кроме того, заслуживают упоминания труды Трунина Ю.П. [2], чьи гипотезы насчет допускаемых напряжений композитных конструкций нашли практическое подтверждение. Автор данной статьи исследует композитные образцы более 40 лет.

Основные возникающие проблемы при определении усталостных характеристик:

- отсутствие накопленных статистических данных по усталостным характеристикам с усталостным механизмом разрушения;
- при проведении усталостных расчетов накапливается значительная погрешность вследствие недостоверных результатов испытаний элементарных образцов;
- неработающие гипотезы о суммировании повреждений;
- отсутствие научно обоснованных критериев усталостного разрушения в случае комбинированного нагружения композитных изделий.

#### **Расслоения композитных элементов конструкций.**

Основной проблемой здесь является расслоение и разрушение слоистых изделий. Можно выделить работы [4, 6, 7], где для определения закритического поведения панелей используется нелинейная геометрия. Необходимо принимать во внимание несимметричность и анизотропию расслоения, возникающие при различных видах граничных условий, а также начальные погибы расслаивающихся дефектов на начальных стадиях разрушения. Перечисленные задачи требуют дальнейших аналитических, численных и экспериментальных исследований.

#### **Допускаемые напряжения и эффективность композитных конструкций**

На ранних стадиях проектирования композитного крыла допускаемые напряжения были небольшими. Фактические напряжения можно оценить по результатам испытаний образцов, что является объектом изложения в [8] на примере самолета МС-21. При одноосном сжатии значение разрушающих напряжений несущих трехпролетных плоских панелей равно  $\sigma = 27,5$  кг/мм<sup>2</sup>. При этом расчетный уровень напряжений должен составлять  $\sigma \approx 20 \dots 22$  кг/мм<sup>2</sup> при статическом нагружении для композитов при разбросе расчетных характеристик. Можно сделать вывод: композиты менее эффективны в сравнении с металлами. В будущем необходимо рассмотреть прочие варианты конструкции крыла. В [8] описана зависимость разрушающих напряжений от энергии ударного воздействия. При энергии 140...240 Дж предельные напряжения составляют  $\sigma = 27$  кг/мм<sup>2</sup>. “Черное” композитное крыло является неэффективным по сравнению с металлическим. Согласно [8], необходимо провести дополнительные исследования.

ния перед началом рабочего проектирования новых композиционных конструкций в сегменте самолетов типа SSJ-NEW и CRJ-929.

#### *Литература*

1. Рекомендательный циркуляр AC20 – 107V. Конструкция из композиционных материалов. – Введен 08.09.2009.
2. Трунин Ю.П. Усталость и живучесть типовых мест конструкций из полимерных композиционных материалов / Ю.П. Трунин // Техника воздушного флота. – 1999. – № 6. – С. 26-38.
3. Митрофанов О.В. Особенности методологии определения остаточной прочности и остаточной устойчивости трехслойных панелей из композитных материалов при сжатии после повреждений от ударных воздействий / О.В. Митрофанов // Естественные и технические науки. – 2017. – № 4. – С. 95-98.
4. Митрофанов О.В. Проектирование несущих панелей авиационных тонкостенных конструкций по закритическому состоянию с учетом ограничений по ресурсу / О.В. Митрофанов. – Москва: Спутник +, 2012. – 231 с.
5. Стрижиус В.Е. Методы оценки усталостной прочности элементов композитных авиаконструкций / В.Е. Стрижиус. – Москва: Машиностроение; Инновационное машиностроение, 2015. – 270 с.
6. Бохоева Л.А. Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами / Л.А. Бохоева. – Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ, 2007. – 192 с.
7. Серенсен С.В. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами / С.В. Серенсен, Г.П. Зайцев. – Киев: Наукова думка, 1982. – 296 с.
8. Смотрова С.А. Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / С.А. Смотрова, С.М. Наумов, А.В. Сморов. – Москва: Техносфера, 2015. – 216 с.

#### *References*

1. Recommended circular AS20 – 107V. Konstruktsiya iz kompozitsionnykh materialov. – Introduced 08.09.2009.
2. Trunin Yu.P. // Tekhnika vozdušnogo flota. – 1999. – No. 6. – P. 26-38.
3. Mitrofanov O.V. // Natural and technical sciences. – 2017. – No. 4. – P. 95-98.
4. Mitrofanov O.V. Proektirovanie nesushchikh panelei aviatsionnykh tonkostennykh konstruksii po zakriticheskomu sostoyaniyu s uchyotom ogranichenii po resursu. – Moscow: Sputnik +, 2012. – 231 p.
5. Strizhius V.E. Metody otsenki ustalostnoi prochnosti elementov kompozitnykh aviakonstruksii. – Moscow: Mashinostroenie; Innovatsionnoe mashinostroenie, 2015. – 270 p.
6. Bokhoeva L.A. Osobennosti raschyota na prochnost elementov konstruksii iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami. – Ulan-Ude: ESSTU Press, 2007. – 192 p.
7. Serensen S.V., Zaitsev G.P. Nesushchaya sposobnost tonkostennykh konstruksii iz armirovannykh plastikov s defektami. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 296 p.
8. Smotrova S.A., Naumov S.M., Smorov A.V. Tekhnologii izgotovleniya silovykh agregatov aviatsionnykh konstruksii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. – Moscow: Tekhnosfera, 2015. – 216 p.

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И ТОЧНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ  
МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ**

© С. А. Воронов, профессор, И. А. Киселев, доцент, И. С. Воронова, ст. преподаватель  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия, 105005, 2-я Бауманская ул., д.5  
E-mail: voronovsa@yahoo.com

*Целью данной работы является исследование влияния динамики плоского шлифования на погрешности формы и качество образуемой поверхности. Модель разработана с учетом динамических характеристик деформируемой технологической системы, которые влияют на перемещение заготовки в процессе шлифования. Инструмент моделируется как вращающийся диск при случайном распределении абразивных зерен со случайными геометрическими характеристиками. Возбуждение вибраций существенным образом влияет на точность обработки и качество поверхности, что особенно актуально при обработке сложных деталей типа лопаток турбин. В статье в результате моделирования дана оценка влияния параметров системы и режимов на погрешности образованной поверхности после обработки. Построены их спектральные характеристики. Показано, что в системе возбуждаются вибрации как на частотах вращения (частота прохождения зубьев), так и на частотах собственных колебаний упругой динамической системы, характерных для регенеративного источника возбуждения.*

**Ключевые слова:** динамика, шлифование, генерация поверхности, вибрации, моделирование.

**ESTIMATION OF QUALITY AND ACCURACY OF FLEXIBLE PARTS  
GRINDING CONSIDERING THE DYNAMICS OF PROCESS**

S.A. Voronov, professor, I.A. Kiselev, assistant professor, I.S. Voronova, senior teacher  
Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia, 105005, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya st., 5  
E-mail: voronovsa@yahoo.com

*The object of the present study is to investigate the dynamic of plane grinding by the tool with random distribution of abrasive grains, owning random geometric characteristics, and estimate its effect on quality and accuracy of the machined surface. The model is based on the consideration of machining system's dynamical deformable characteristics, which have influence on the workpiece's displacement under grinding process. The excitation of vibrations has significant effects on precision and surface quality, which is especially important in machining spatial parts, such as turbine blades. The estimation of system parameters and cutting conditions influence on the machined surface errors generated while processing. The spectral characteristics have been constructed. It was shown that system vibration is excited with the frequencies of grain pass (rotation frequency) and with the eigenfrequencies of the elastic dynamical system also, which are typical for the regenerative mechanism of excitation.*

**Keywords:** dynamics, grinding, new surface generation, vibration, modeling.

**Введение**

При шлифовании мало жестких деталей типа лопаток турбин при обработке неизбежно возникают вибрации, которые приводят в некоторых случаях к погрешностям формы и потере качества поверхности. Кроме того, имеют место упругие отжатия за счёт сил резания, а также возникают остаточные напряжения,



которые могут привести к короблению детали и потере эксплуатационных характеристик. Следовательно, точность и качество обработанной поверхности, характер динамического поведения системы должны быть подробно исследованы, в зависимости от жёсткости крепления, геометрии детали и инструмента, режимов обработки.

### Модель плоского шлифования

При моделировании шлифования можно рассматривать отдельное абразивное зерно как элементарную режущую кромку, взаимодействующую с материалом заготовки [1, 2]. Представим модель плоского шлифования в виде системы, показанной на рисунке 1 [3], с учетом следующих предположений: (1) Заготовка закреплена в упруго-демпфированных опорах; (2) Шлифовальный круг вращается с заданной скоростью  $\omega$  и движением подачи  $V_k$ ; (3) Абразивные зерна равномерно распределены по окружной поверхности инструмента, по ширине круга зерна распределены по нескольким дорожкам смещенными друг относительно друга (см. рисунок 1).  $T/N$ . (4) Все зерна обладают случайными геометрическими характеристиками (высота зерен  $h_0$ , конусный угол  $\theta$ , угол рыскания  $\alpha$ ); (5) Опоры круга жестко закреплены и вибрации круга в плоскости отсутствуют; (6) Заготовка моделируется как твердое тело, способное перемещаться в плоскости в 2-х взаимно перпендикулярных направлениях  $X$  и  $Z$ .

Для моделирования процесса шлифования с учетом податливости детали, процесс шлифования маложестких деталей моделируется как плоская система, имеющая две ортогональные степени свободы, как показано на рисунке 1, где  $m$  – масса детали.  $C_x, C_z$  – коэффициенты демпфирования крепления детали,  $K_x, K_z$  – жёсткости детали в направлении осей  $X$  и  $Z$ , приведенные к точке контакта.

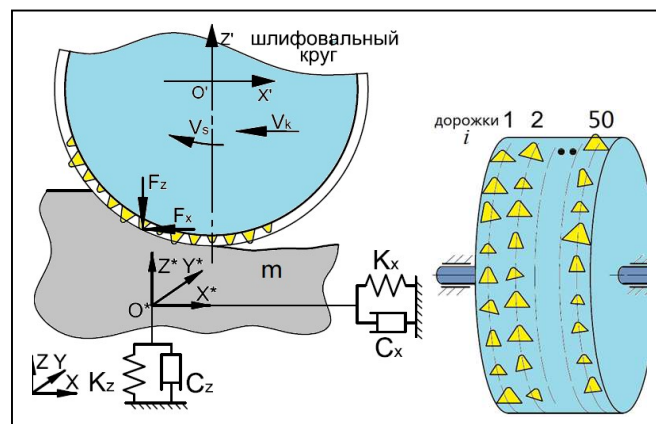


Рисунок 1 – Динамическая схема упрощенной модели шлифования податливой детали кругом с зернами, имеющие случайные геометрические характеристики

Предполагаем, что шлифовальный круг вращается относительно жестко закрепленных осей и совершает движение подачи со скоростью  $V_k$ . Силы резания, которые возникают при врезании в материал заготовки, представим в виде составляющих по направлению подачи ( $X$ ) и по нормали ( $Z$ ). Введем еще одну систему координат  $O^*X^*Y^*Z^*$ , находящуюся на заготовке в зоне контакта, которая движется вместе с заготовкой. Исходные данные показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные упрощенной модели плоского шлифования

Угловая скорость круга $\omega$	150 рад/с
Скорость падачи $s$	250 мм/с
Радиус шлифовального круга $r_s$	105 мм
Глубина резания $a_e$	0,2 мм
Ширина шлифовального круга $b$	5 мм
Количество дорожек $N^*$	50
Количество зерен на одной дорожке $N$	5000
Количество зерен в зоне контакта на одной дорожке	49

При моделировании динамики, подробная информация по распределению абразивных зерен и их стохастическим геометрическим характеристикам, и система уравнений, описывающих формирование новой поверхности, такие же, как представлены в работе [3]. Для моделирования процесса шлифования с учетом податливости детали, разница заключается в том, что здесь для интерполяции новой поверхности  $P(t)$  необходимо учитывать динамическое смещение заготовки. Таким образом, в системе уравнений, описывающих формирование новых поверхностей изменяется только одно уравнение:

$$P(t) = Trend [ P_j |_{t-T/N} - h_{cu,j}(t) + \Delta x \cdot \sin(\varphi_j(t)) + \Delta z \cdot \cos(\varphi_j(t)) ],$$

где  $T/N$  – период прохождения зерна;  $P(t)$  – координаты поверхности, записанные в информационном банке данных в ПО «Matlab»;  $P_j |_{t-T/N}$  – положение точки пересечения между осью  $j$ -ого зерна в момент времени  $t$ , и поверхностью заготовки в момент времени  $t-T/N$  в полярной системе координат;  $\Delta x, \Delta z$  – проекции динамического смещения на оси  $X, Z$ ;  $\varphi_j(t)$  – мгновенное угловое погружение  $j$ -ого зерна на  $i$ -ой дорожке, измеряется по часовой стрелке от нормальной оси ( $Z$ ), при вращении круга со скоростью  $\omega$ .

После определения толщины срезаемого слоя  $h_{cu,ij}$  каждого из зерен в зоне контакта, определяются силы резания согласно эмпирическим зависимостям, приведенным в публикации [4], по которым можно вычислить результирующие сил резания по направлениям  $x$  и  $z$  по всем дорожкам и подставить их в уравнения движения заготовки в текущий момент времени.

#### Генерация поверхности при нескольких проходах шлифовального круга

Геометрия поверхности заготовки описывается дискретно по каждой  $i$ -ой дорожке с шагом по времени, кратным времени прохождения одного зерна. Таким образом, координаты поверхности заготовки представляются в виде сетки точек, между которыми координаты поверхности интерполируются и хранятся в базе данных для каждого момента времени  $P(t)$ . Перекрытия врезания возникают при нескольких проходах шлифовального круга. Таким образом, обработанная поверхность полученная при предыдущем проходе круга  $P(t-T^*)$ , остается необработанной поверхностью при настоящем проходе круга  $P(t)$ , как показана на рисунке 2, где  $T^*$  – время между последовательными проходами круга. В данной работе предполагаем, что  $T^*=0.01$ с.

Введем следующие предположения: при  $t=0$ , координаты центра шлифовального круга в системе координат  $OXYZ$ ,  $(X_{o'}(0), Z_{o'}(0)) = (200, 155.8)$  (мм). В случае большой жесткости упругой системы инструмент-деталь смещениями за счет вибраций можно пренебречь. Решение системы уравнений получим при условиях  $\Delta x = 0, \Delta z = 0$ .

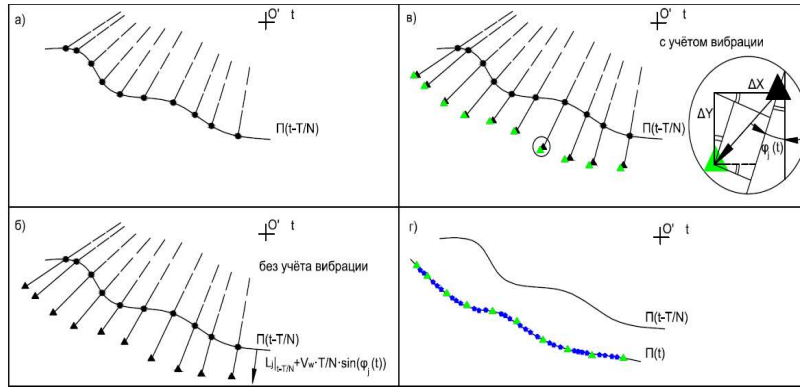
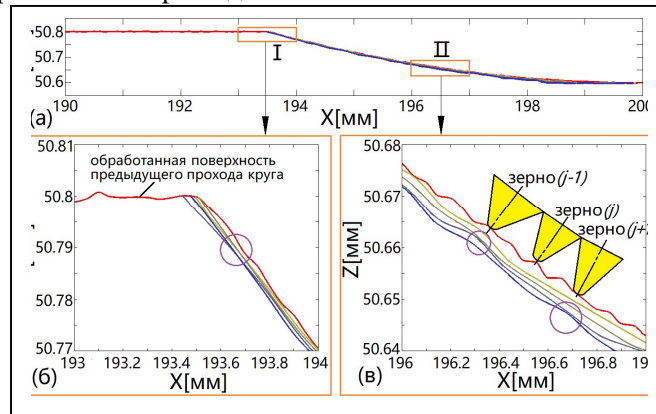


Рисунок 2 – Схема процесса формирования поверхности  $\Pi(t)$  для одного зерна по заданной поверхности  $\Pi(t-T/N)$

Результаты без учёта смещения за счет вибрации показаны на рисунке 3. Увеличенные участки формирования поверхности вблизи выделенных зон I и II, видно, что существует несколько зон (выделены фиолетовыми окружностями), где смежные поверхности пересекаются. Это означает, что  $h_{cuj} = 0$ , т.е. текущее зерно не внедряется в материал детали.



а – конфигурации поверхности заготовки без учёта вибрации в интервале времени  $5 \cdot T/N$  при втором проходе круга, б – увеличенное изображение I, в – увеличенное изображение II

Рисунок 3

### Динамика инструмента с учетом вибраций

В работе предполагается, что деталь упруго закреплена и может совершать вибрации поступательно в плоскости  $XOZ$ , а шлифовальный круг жестко закреплен. Суммируя силы резания, действующие на все зерна в зоне контакта круга и заготовки, получаем равнодействующие сил шлифования, действующие на инструмент  $(F_x, F_z)$ . Система дифференциальных уравнений, описывающих движение детали, имеет вид:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} + C_x \cdot \dot{x} + K_x \cdot x = F_x \\ m \cdot \ddot{z} + C_z \cdot \dot{z} + K_z \cdot z = F_z \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  – масса детали ( $m=0.5\text{кг}$ ).  $x$  и  $z$  перемещения детали в направлении осей  $X, Z$ . Введем следующие безразмерные переменные и обозначения, также как в работе [1]:

$$\xi = \frac{x}{h_0}, \eta = \frac{z}{h_0}, t = T \cdot \tau, f_x = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{K_x}{m}}, f_z = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{K_z}{m}},$$

$$\zeta_x = \frac{C_x}{2\sqrt{K_x \cdot m}}, \zeta_z = \frac{C_z}{2\sqrt{K_z \cdot m}}, \bar{F}_x = \frac{F_x}{m \cdot h_0}, \bar{F}_z = \frac{F_z}{m \cdot h_0}.$$

Уравнения движения детали (1) в безразмерной форме примут вид:

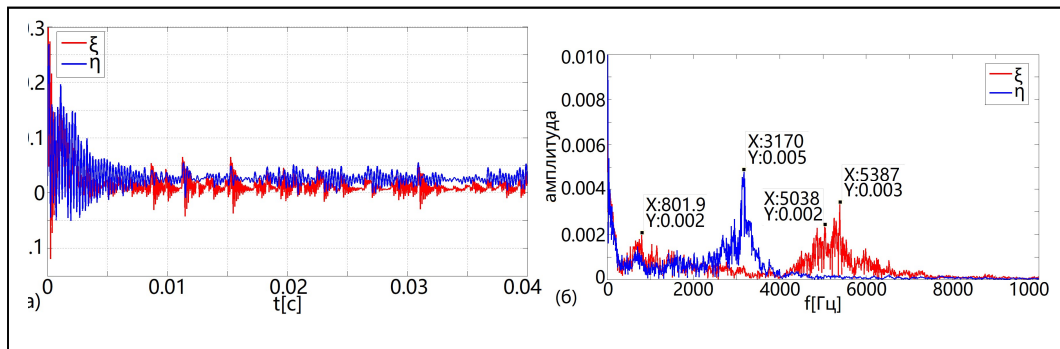
$$\begin{cases} \ddot{\xi} + 4\pi\zeta_x f_x \dot{\xi} + 4\pi^2 f_x^2 \xi = \bar{F}_x \\ \ddot{\eta} + 4\pi\zeta_z f_z \dot{\eta} + 4\pi^2 f_z^2 \eta = \bar{F}_z \end{cases} \quad (2)$$

где собственные частоты детали:  $f_{nx} = \sqrt{K_x/m} / 2\pi$ ,  $f_{nz} = \sqrt{K_z/m} / 2\pi$ , коэффициенты демпфирования примем:  $\zeta_x=0.05$ ,  $\zeta_z=0.02$ . Дифференциальные уравнения (2) численно интегрируются при начальных условиях: при  $t=0$ ,  $\xi(0)=0$ ,  $\dot{\xi}(0)=0$ ,  $\eta(0)=0$ ,  $\dot{\eta}(0)=0$ . При этом в каждый момент времени фиксируется обработанная поверхность в базе данных.

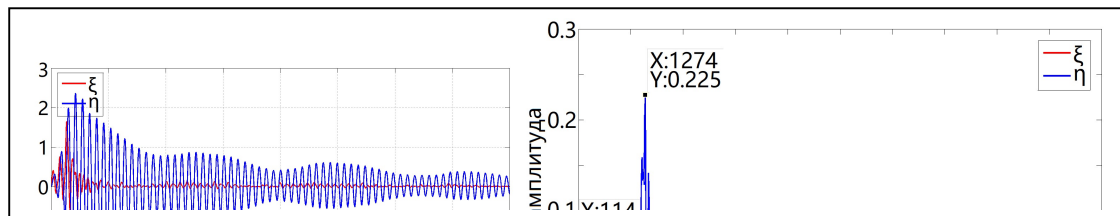
#### Результаты моделирования тестового примера

При обработке маложестких деталей типа лопаток турбин, соотношение между жесткостями крепления в направлениях  $X$  и  $Z$  может составлять значение  $K_x/K_z \approx 3 \div 4$  [5]. Ниже на рисунках 4-6 представлены результаты интегрирования при  $K_x/K_z=4$ .

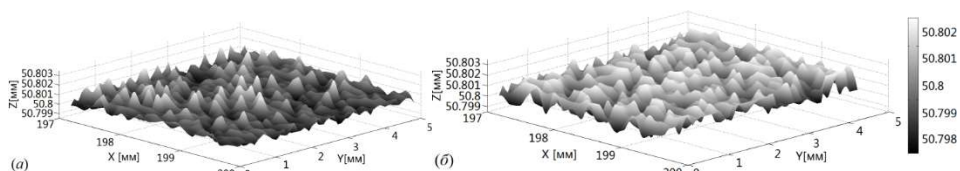
На рисунке 4 показано изменение безразмерных смещений инструмента  $\xi$ ,  $\eta$  при различных жесткостях крепления инструмента. Источником возбуждения являются и периодические врезания зубьев, а также регенеративный механизм. Видно, что для случая  $K_x=60\text{кН/мм}$  (рисунок 5) колебания в системе затухают, поведение стабильное, такие режимы дают хорошее качество поверхности. Для случая  $K_x=30\text{кН/мм}$ , после переходного процесса, система выходит на установившийся режим. Данный режим можно считать удовлетворительным. Для случая  $K_x=15\text{кН/мм}$  наблюдаются колебания с большой амплитудой, величина которых превосходит размер зерен, что говорит о неработоспособности таких режимов. Кроме того, изменение спектров Фурье безразмерных перемещений показало, что для случая  $K_x$  с большими значениями ( $K_x > 45 \text{ кН/мм}$ ) спектр колебаний системы распределен в широкой полосе частот. При уменьшении значений жесткости  $K_x$ , спектр имеет более дискретный характер с ярко выраженными пиками на отдельных частотах, связанных кратными числами с частотой собственных колебаний. Таким образом, можно зафиксировать появление регенеративных колебаний типа «chatter», в этом случае частота «chatter» является доминирующей в спектре.



а – зависимость безразмерных смещений детали  $\xi, \eta$  от времени  $t$ , б – их спектр ( $t \geq 0,006$  с) при  $K_x/K_z=4, K_x=60$  кН/мм  
Рисунок 4



а – зависимость безразмерных смещений детали  $\xi, \eta$  от времени  $t$ , б – их спектр ( $t \geq 0,006$  с) при  $K_x/K_z=4, K_x=30$  кН/мм  
Рисунок 5

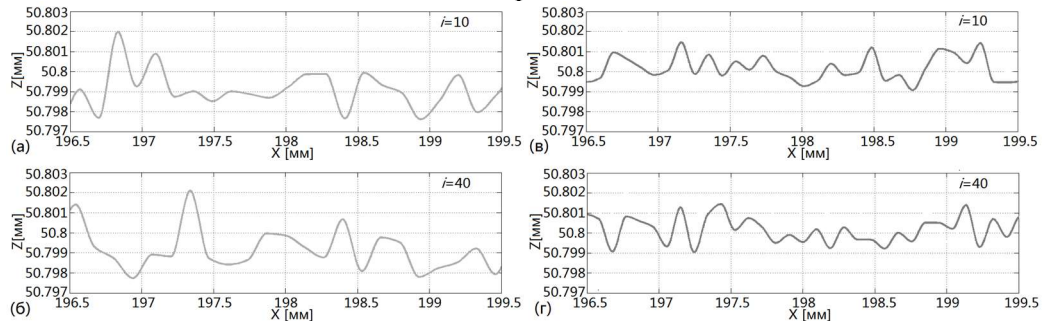


а – текстура обработанной поверхности заготовки при моделировании без учета вибрации инструмента, б – с учётом вибрации инструмента в момент времени  $t=100 \cdot T/N$   
Рисунок 6

На рисунке 6 представлены текстуры обработанной поверхности без учета и с учётом вибрации инструмента. Приведены следующие параметры для оценки волнистости поверхности:  $Mean$  – среднее значение координаты ( $Z$ ) поверхности, которое определяет среднюю линию профиля;  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля, которое определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля  $z$  в пределах базовой длины  $l$ .

На рисунке 7 представлены увеличенные изображения обработанной поверхности при моделировании без учёта и с учётом вибрации круга. При сравнении параметров волнистости поверхности полученных без учета вибрации и с учётом вибрации видно что, среднее значение  $Mean$  увеличивается ( $Mean_{б.в} = 50,7989$  мм,  $Mean_{с.в} = 50,8006$  мм). Это объясняется наличием упругого отжатия в системе с учетом податливости крепления инструмента.  $R_a$  уменьшается ( $R_{a_{б.в}} = 0,6437$  мкм,  $R_{a_{с.в}} = 0,5264$  мкм), что подтверждает влияние жесткости

инструмента на волнистость обработанной поверхности.  $S$  также уменьшается ( $\overline{S}_{b,e} = 0,4115$  мм,  $\overline{S}_{c,e} = 0,3421$  мм), однако, на поверхности, полученной с учетом динамики количество пиков на интервале становится больше.



а – изменения геометрии обработанной поверхности заготовки после прохождения зерен без учета вибрации круга, б – с учётом вибрации круга

Рисунок 7

### Заключение (Выводы)

В работе представлена стохастическая модель, позволяющая исследовать динамику процесса плоского шлифования. Исследованы спектральные характеристики динамических систем при различных соотношениях жесткостей крепления детали  $K_x/K_z$ . Результаты моделирования показали, что при значениях параметров, когда система устойчива амплитуды смещений небольшие, тогда шлифование можно рассматривать как процесс фрезерования с большим количеством режущих кромок. По рассчитанным значениям отклонений построена геометрия обработанной поверхности, и определены параметры, характеризующие точность и качество обработки. Построены их спектральные характеристики. Показано, что в системе возбуждаются вибрации как на частотах вращения (частота прохождения зубьев), так и на частотах собственных колебаний упругой динамической системы, характерных для регенеративного источника возбуждения. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании технологических операций финишной обработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-01421.

### Литература

1. Воронов С.А. Математическое моделирование процесса плоского шлифования / С.А. Воронов, Вэйдун Ма // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 4. – С. 85-94.
2. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел / В.Н. Кащеев // Москва: Наука, 1970. – 245 с.
3. Воронов С.А. Стохастическая модель процесса абразивной обработки. Кинематика плоского шлифования / С.А. Воронов, Вэйдун Ма, И.С. Воронова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 11. – С. 68-78.
4. Воронов С.А. Влияние геометрии абразивного зерна на силы резания при шлифовании / С.А. Воронов, Вэйдун Ма // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2017. – № 5. – С. 52-63.

5. *Erhan Budak*. Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling / Budak Erhan, Tunc L.Taner, Alan Salih // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2012. – Т. 61. – С. 339-342.

6. *Altintas Y.* Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design / Y. Altintas. – Cambridge University Press, 2000. – 286 с.

7. *Altintas Y.* Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain / Y. Altintas, G. Stepan, D. Merdol, Z. Dombovari // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Т. 1. – С. 35-44.

8. *Anderson R.O.* Detecting and eliminating collisions in NC 345 machining / R.O. Anderson // Computer-Aided Design. – 1978. – № 10 (2). – С. 231-237.

9. *Brecher C.* Interaction of manufacturing process and machine tool / C. Brecher, M. Esser, S. Witt // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2009. – Т. 58. – С. 588-607.

#### References

1. *Voronov S.A., Ma Veidun* // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2017. – No. 4. – P. 85-94.

2. *Kashcheev V.N.* Abrazivnoe razrushenie tvordykh tel. – Moscow: Nauka, 1970. – 245 p.

3. *Voronov S.A., Ma Veidun, Voronova I.S.* // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. – 2017. – No. 11. – P. 68-78.

4. *Voronov S.A., Ma Veidun* // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering. – 2017. – No. 5. – P. 52-63.

5. *Erhan Budak, L.Taner Tunc, Salih Alan* // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2012. – V. 61. – P. 339-342.

6. *Altintas Y.* Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. – Cambridge University Press, 2000. – 286 p.

7. *Altintas Y., Stepan G., Merdol D., Dombovari Z.* // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – V. 1. – P. 35-44.

8. *Anderson R.O.* Detecting and eliminating collisions in NC 345 machining // Computer-Aided Design. – 1978. – No. 10 (2). – P. 231-237.

9. *Brecher C., Esser M., Witt S.* Interaction of manufacturing process and machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2009. – V. 58. – P. 588-607.

УДК 620.187:577.322:539.25

### ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ РОСТА УСТАЛОСТНОГО ДЕФЕКТА ДЛЯ ОЦЕНКИ СРОКА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С КОРРОЗИОННЫМ ДЕФЕКТОМ

© **И. П. Аистов**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор кафедры  
"Промышленная экология и безопасность"

© **К. А. Вансович**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент кафедры  
"Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология"

© **А. А. Нахлесткин**<sup>3</sup>, магистр 2 курса кафедры  
"Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология"

Омский государственный технический университет  
644050, Россия, г. Омск, просп. Мира, д. 11, +7(3812)65-34-07

E-mail: <sup>1</sup>aistov\_i@mail.ru, <sup>2</sup>vansovichka@mail.ru, <sup>3</sup>nakhlestkin95@mail.ru

*В статье предложена модель роста усталостных дефектов, полученная на основе анализа трехмерного напряженного состояния в вершине коррозионного дефекта. Для исследования напряженно-деформированного состояния моделировались реальные экс-*

платационные нагрузки трубопровода методом конечных элементов. Научная новизна исследования заключается в том, что при разработке модели роста усталостных дефектов предполагается, что рост дефекта, развивающийся по типу нормального отрыва, контролируется только нормальными напряжениями. За один цикл нагружения интенсивность процесса разрушения определяется как максимальными растягивающими напряжениями в период нагрузки, так и максимальными сжимающими напряжениями в период разгрузки.

На основании сделанных предположений установлено, что скорость роста усталостных дефектов коррозионного происхождения зависит от величины размаха коэффициента изменения средних напряжений впереди фронта трещины за полный цикл нагружения.

**Ключевые слова:** коррозионный дефект, поверхностная трещина, метод конечных элементов, кольцевые напряжения.

### THE APPLICATION OF THE DISCRETE GROWTH MODEL FOR FATIGUE DEFECT ASSESSMENT OF THE SAFE OPERATION LIFE OF THE SITE OF THE MAIN PIPELINE WITH CORROSION DEFECT

**I. P. Aistov**<sup>1</sup>, doctor of technical sciences, professor of the department of industrial ecology and safety

**K. A. Vansovich**<sup>2</sup>, candidate of technical sciences, associate professor of «Oil and gas business, standardization and metrology» department

**A. A. Nahlestkin**<sup>3</sup>, 2<sup>nd</sup> course master of

**B.** «Oil and gas business, standardization and metrology» department  
Omsk state technical university

644050, Russia, Omsk, 11 Mira Avenue, +7(3812)65-34-07

E-mail: <sup>1</sup>aistov\_i@mail.ru, <sup>2</sup>vansovichka@mail.ru, <sup>3</sup>nakhlestkin95@mail.ru

*In the article the model of growth of fatigue defects obtained on the basis of the analysis of three-dimensional stress state at the top of corrosion defect is offered. To study the stress-strain state, the actual operational loads of the pipeline were simulated by the finite element method. The scientific novelty of the study lies in the fact that in the development of the fatigue defect growth model it is assumed that the defect growth developing by the type of normal separation is controlled only by normal stresses. In one loading cycle, the intensity of the fracture process is determined by both the maximum tensile stresses during the loading period and the maximum compressive stresses during the unloading period.*

*On the basis of the made assumptions it is established that the growth rate of fatigue defects of corrosion origin depends on the magnitude of the magnitude of the coefficient of change of average stresses ahead of the crack front for the full loading cycle*

**Keywords:** corona discharge, current pulse, modeling, recombination.

Для обеспечения безостановочной работы магистральных трубопроводов необходимо эффективно оценивать остаточный ресурс трубопроводов. В процессе эксплуатации трубопроводных систем происходят структурные изменения трубных сталей [1]. Это обусловлено тем, что металл труб находится под нагрузкой: статической и циклической. Под воздействием циклических нагрузок происходит деформационное старение трубных сталей, приводящее к снижению их сопротивляемости и хрупкому разрушению.

Принято, что коррозионный дефект можно смоделировать как трещиноподобный дефект, а силу, продвигающую трещину, рассчитать средствами механики упругопластического разрушения [2].



В данной работе предлагается метод оценки развития поверхностных трещин и оценки остаточного ресурса магистрального трубопровода при циклических нагрузках с учётом двухосного напряженного состояния в стенке трубопровода.

Объектом исследования является магистральный трубопровод с трещиноподобным дефектом коррозионного происхождения. Модель дефекта была создана на основе реального эксплуатационного заключения: коррозионный дефект – это, прежде всего, потеря металла трубы [3].



Рисунок 1

Кольцевые напряжения  $\sigma_{кц}$  зависят от величины рабочего давления в трубопроводе, поэтому они всегда растягивающие, т.е. положительные [4]:

$$\sigma_{кц} = \frac{P \cdot D_{вн}}{2\delta},$$

где  $P$  – давление в трубопроводе, Па;  $D_{вн}$  – внутренний диаметр трубы, м;  $\delta$  – толщина стенки трубы, м.

Продольные напряжения  $\sigma_{пр}$  в зависимости от температурного перепада или направления изгиба могут быть как растягивающими, так и сжимающими, т.е. отрицательными. Для защемлённого с двух концов элемента трубопровода продольные напряжения определяются следующим образом [5]:

$$\sigma_{пр} = -\alpha \cdot \Delta t \cdot E + \mu \cdot \sigma_{кц} \pm \frac{E \cdot D_{н}}{2\rho_{уи}},$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t$  – температурный перепад,  $^\circ\text{C}$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $D_{н}$  – наружный диаметр трубы, м;  $\rho_{уи}$  – радиус упругого изгиба оси трубопровода, м;  $E$  – модуль упругости, Па.

Развитие усталостных дефектов происходит в первую очередь за счет воздействия кольцевых напряжений, которые являются наибольшими по величине и по направлению перпендикулярны плоскости роста этих трещин [6-7].

В данной работе оценка несущей способности трубопровода проводится созданием математической модели коррозионного дефекта с помощью программы ANSYS Workbench. Для этого моделируются различные нагрузки, которые испытывает трубопровод в процессе эксплуатации с учётом двухосного напряженного состояния.

Модель дефекта была создана на основе реального эксплуатационного заключения: коррозионный дефект — это, прежде всего, потеря металла трубы. Для создания модели дефекта, представленного на рисунке 2, использовался графический редактор ANSYS-DesignModeler.

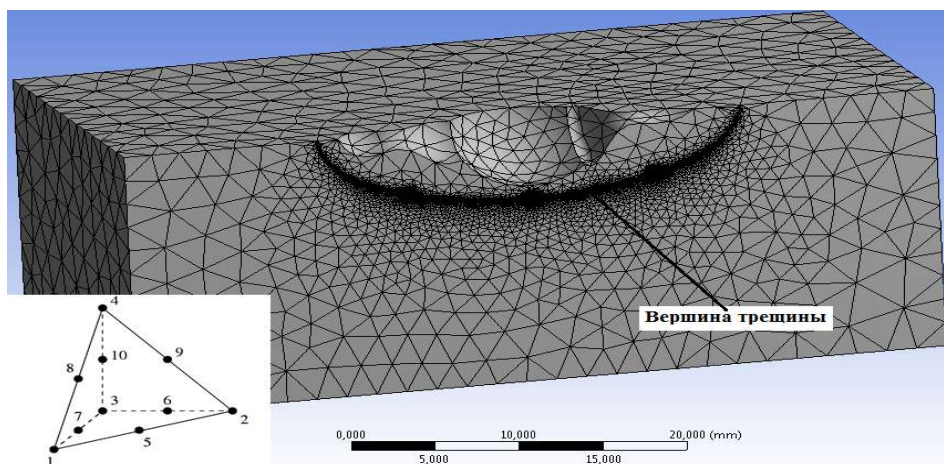


Рисунок 2 – Участок трубы с поверхностным дефектом, имеющим небольшую кривизну

Опыт наблюдения за ростом поверхностных трещин показывает, что они стремятся принять полуэллиптическую форму, что значительно упрощает моделирование.

После определения главных напряжений можно сделать заключение: наибольшие величины главных напряжений находятся в точках, которые расположены в области "отставания" от распространения фронта трещины, что в процессе роста приближает их к полуэллиптической форме.

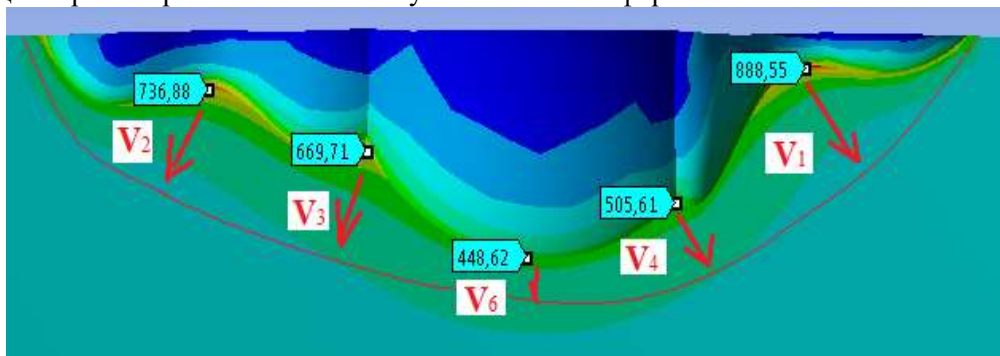


Рисунок 3

Параметр, отражающий изменение скорости роста усталостных трещин при различных видах двухосного нагружения стенки трубопровода – коэффициент трехосности напряжённого состояния  $Tr$  [1]

$$Tr = \frac{\sigma_0}{|\sigma_1|},$$

где  $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$  – среднее напряжение.

С учетом коэффициента трехосности эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений можно представить в виде:

$$K_I^{Tr} = Tr^x \cdot K_I, \quad (1)$$

где  $Tr$  – коэффициент трехосности напряжённого состояния;

$x$  – показатель степени, который необходимо определить по результатам двухосных испытаний.

С учетом (1) выражение для скорости роста трещин при различных видах нагружения, можно записать аналогично формуле Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C \left( \Delta K_I^{Tr} \right)^n. \quad (2)$$

В работе [1] для стали 20 была определена константа  $C = 0,26 \cdot 10^{-10}$ , а уравнение скорости роста усталостных трещин, учитывающее характер напряженного состояния в ее вершине, будет иметь следующий вид:

$$\left( \frac{da}{dN} \right) = 0,26 \cdot 10^{-10} \cdot \left( Tr^{0,5} \cdot \Delta K_I \right)^{4,0}.$$

Предложенная модель роста усталостных трещин позволяет оценить остаточный ресурс трубопровода при наличии поверхностной или несквозной трещины. Для этого интегрируется уравнение (2) и определяется остаточный ресурс  $N_{op}$ , т.е. число циклов нагружения от момента регистрации трещины  $l_{pez}$  до критического размера трещины  $l_{кр}$

$$N_{op} = \int_{l_{pez}}^{l_{кр}} \frac{1}{C_1 (\Delta K_{\sigma 0})^{n_1}} da.$$

В данной работе произведено исследование оценки опасности дефектов коррозионного происхождения, в результате чего была разработана математическая модель усталостного дефекта трубопровода, позволяющая производить оценку развития выявленных дефектов, оценивать срок безопасной эксплуатации, вводить ограничения по эксплуатируемым нагрузкам дефектного участка магистрального трубопровода.

### *Литература*

1. *Фокин М.Ф.* Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением / М.Ф. Фокин // Прикладная механика и технологии машиностроения: сборник научных трудов. – Нижний Новгород: Интелсервис, 2005. – С. 69–76.
2. *Вансович К.А.* Метод оценки остаточного ресурса магистрального нефтепровода при наличии поверхностной трещины в условиях эксплуатационных нагрузок / К.А. Вансович, И.П. Аистов, Д.С. Бесеция // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – №5 (77). – С. 1–7.
3. *Остсёмин А.А.* Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами / А.А. Остсёмин, В.Ю. Заварухин // Проблемы прочности. – 1993. – № 12. – С. 1–59.
4. *Плювинаж Г.* Оценка опасности коррозионных дефектов при помощи диаграммы оценки областей разрушения / Г. Плювинаж, О. Буледруа, М. Хадж-Мелиани // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 4. – С. 384–396.
5. Руководящий документ ПАО «Транснефть» РД-23.040.00-КТН-115-11. Нефтепроводы и нефтепродуктопроводы магистральные. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами. – Москва: Издательство ПАО «Транснефть», 2011. – 143 с. – Введен 10.08.2011.
6. *Сиратори Т.* Вычислительная механика разрушения / Т. Сиратори, Т. Миёси, Х. Мацусита. – Москва: Мир, 1986. – 334 с.
7. *Курохтин В.Ю., Рогов В.Е., Бокхоева Л.А.* Определение характеристик сопротивления усталости вертолетных лопастей // В сборнике: Проблемы механики современных машин. материалы VII международной научной конференции. Улан-Удэ. – 2018. – С. 213-217.

### *References*

1. *Fokin M. F.* // Journal of Applied mechanics and mechanical engineering: collection of scientific works. – Nizhny Novgorod: IntelService, 2005. – P. 69-76.
2. *Vansovich K. A., Aistov I. P., Beselia D. S.* // Engineering journal: science and innovation. – 2018. – No. 5 (77). – P. 1-7.
3. *Ostsemin A. A., Zavarukhin V. Y.* // Strength of materials. – 1993. – No. 12. – P. 1-59.
4. *Pluvinaje G., Boedra O., Haj-Melanin M.* // Science and technology of oil and oil products pipeline transportation. – 2018. – No. 4. – P. 384-396.
5. Guidance document of PJSC “Transneft” RD-23.040.00-KTN-115-11. Oil pipelines and oil product pipelines. Determination of strength and durability of pipes and welded joints with defects. – Moscow: JSC “Transneft” Press, 2011. – 143 p. – Introduced 10.08.2011.
6. *Shiratori T., Miyoshi T., Matsushita Kh.* Computational fracture mechanics. – Moscow: Mir, 1986. – 334 p.
7. *Kurokhtin V.Y., Rogov V. E., Bokhoeva L. A.* Determination of characteristics of fatigue resistance of helicopter blades// Problems of mechanics of modern machines. Proceedings of the VII international scientific conference. Ulan-Ude.- 2018.-P. 213-217.

УДК 621.882.29

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РЕЗЬБОВОЙ ПАРЫ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ**

© **М. Н. Захаров<sup>1</sup>, М. А. Любченко<sup>2</sup>**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская ул., д.5/1  
E-mail: <sup>1</sup>zmn@bmstu.ru, <sup>2</sup>mal@bmstu.ru

*Разработана методика оперативной оценки несущей способности резьбовой пары из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), позволяющая подобрать типоразмер резьбового крепежа на стадии проектирования изделия. Приведены результаты численного моделирования резьбовой пары из УУКМ на разрыв, предложена методика осреднения напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне разрушения витков. Проведены экспериментальные исследования влияния масштабного эффекта на прочность материала при срезе. Предложена формула для оценки несущей способности резьбовой пары из УУКМ. Обоснована возможность использования разработанной методики для подбора резьбового крепежа на стадии проектирования изделия путем сравнения результатов расчета по предлагаемой методике с экспериментально полученными значениями несущей способности резьбовой пары из УУКМ.*

**Ключевые слова:** углерод-углеродные композиционные материалы, УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, резьбовая пара из КМ, несущая способность резьбовой пары.

## **ASSESSMENT METHODOLOGY OF THREADED PAIR LOAD BEARING CAPACITY MADE FROM CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIAL AT THE PRODUCT DESIGN STAGE OF MANUFACTURING**

**M. N. Zakharov<sup>1</sup>, M. A. Lyubchenko<sup>2</sup>**

Bauman Moscow State Technical University  
105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya str., 5/1  
E-mail: [zmn@bmstu.ru](mailto:zmn@bmstu.ru), [mal@bmstu.ru](mailto:mal@bmstu.ru)

*A method for rapid assessment of the threaded pair carrying capacity made from carbon-carbon composite material (CCCM) has been developed, which makes it possible to select the size of a threaded fastener at the product design stage. The results of numerical modeling of a threaded pair from the CCCM tear behavior on stress are presented, a method of averaging the stress-strain state diagram in the zone of the destruction of thread coils is proposed. Experimental results of the scale effect influence on the strength of the material during the cut are presented. A formula for estimating the load bearing capacity of a threaded pair of CCCM is proposed. The possibility of using the developed methodology for the selection of threaded fasteners at the design stage of the product manufacturing by comparing the results of the calculation made by the proposed method with the experimentally obtained values of the load bearing capacity of the threaded pair from the CCC is justified.*

**Keywords:** carbon-carbon composite materials, 4DL-reinforced CCC material, threaded pair of CM, bearing capacity of the threaded pair.

### **Введение**

Специфика эксплуатации ряда современных изделий из композиционных материалов (КМ), связанная с работой в условиях высоких температур, диктует необходимость использования в них резьбовых деталей, также изготовленных из композитов и способных функционировать при высоких термодинамических нагрузках. Одним из таких материалов являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), способные сохранять свою работоспособность при температурах свыше 2200 °С.

Однако, стандартные детали резьбовой пары (винт-гайка), изготовленные из УУКМ, не могут быть подобраны или рассчитаны на основе традиционных подходов.

Для формирования условия разрушения резьбовой пары из УУКМ был выбран методологический подход [3], основанный на численном анализе НДС в

зоне разрушения резьбовой пары при приложении критической нагрузки определенной экспериментально и сравнением полученных результатов с прочностью материала на срез с учетом влияния масштабного эффекта.

Исследования проводились на каркасно-армированном УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, диаметром армирующего элемента 0,7 мм и доведенного до плотности 1950 кг/м<sup>3</sup>.

#### Расчет несущей способности резьбовых соединений

Для получения распределения напряжений в зоне контакта витков резьбы, изготовленной из УУКМ со схемой армирования 4ДЛ, были проведены расчеты, моделирующие действие растягивающей силы вдоль оси  $X$ . Расчеты проводились методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS с учетом физической линейности материала. При расчете материал был принят как однородный и ортотропный со свойствами, соответствующими средним характеристикам рассматриваемого УУКМ.

С учетом симметрии детали относительно поворота и переноса вдоль оси  $X$  рассматривалась четвертая часть резьбовой пары М16. На модели была сгенерирована нерегулярная конечно-элементная сетка из элементов Solid187, а на гайке с преобладанием элемента Solid186. Общий характерный размер элементов 0,3 мм, в зоне соприкосновения витков 0,1 мм. Витки резьбового соединения рассматривались как конечное число кольцевых выступов. В целях проверки сходимости решения проведена серия расчетов с различным числом элементов.

Предполагалось, что в зоне соприкосновения витков реализуется контакт с кулоновым трением, а коэффициент трения равен 0,1 [1,2]. На площадках  $A$  были заданы симметричные граничные условия, запрещающие перемещения в направлении нормали к площадкам, на площадке  $B$  запрещено перемещение вдоль оси винта, а к площадке  $C$  приложена растягивающая сила  $F_{раз}^{дейст}$  (рисунок 1).

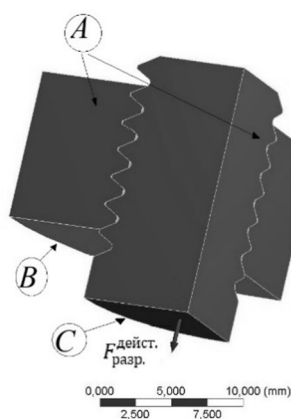


Рисунок 1 – Граничные условия

В ходе численного моделирования резьбовой пары проведена проверка на линейность полученных напряжений от величины заданной нагрузки. Было получено, что напряжения возрастают прямо пропорционально приложенной нагрузке. Следовательно, дальнейшие расчеты было целесообразно вести в относительных единицах.

В результате численного расчета рассматривались напряжения среза витков, поскольку при экспериментальном исследовании резьбовой пары, из УУКМ, в сборе был установлен характер разрушения – срез резьбы по внутреннему диаметру шпильки.

В результате численного моделирования из-за анизотропии свойств материала распределение напряжений по витку имеет неравномерный характер, и увеличиваются в радиальном направлении от плоскости среза  $ZX$  к плоскости среза  $YX$ . Поэтому для получения реальной действующей нагрузки было принято решение об осреднении результатов по витку в 2 этапа.

В первом этапе осреднение результатов проводилось по каждому витку в цилиндрической системе координат, где ось  $X$  совпадала с осью винта, а угол  $\varphi$  определял поворот от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  по витку резьбы. Путь осреднения задавался по основанию витка, где происходит срез резьбы. В полученном пути определялось среднее значение напряжений на срез:

$$\tau_{cp}(n, \varphi) = \frac{1}{l} \int_0^l \tau_{cp}(n, \varphi, x) dx,$$

где  $\tau_{cp}(n, \varphi, l)$  – распределения напряжений по сечению среза витков,  $\varphi$  – полярный угол по витку,  $l$  – вертикальная координата в плоскости среза витка,  $n$  – номер витка.

В результате осреднения нагрузки по витку получены следующие зависимости напряжений от полярного угла (рисунок 2), по каждому витку в соединении при 6 витках.

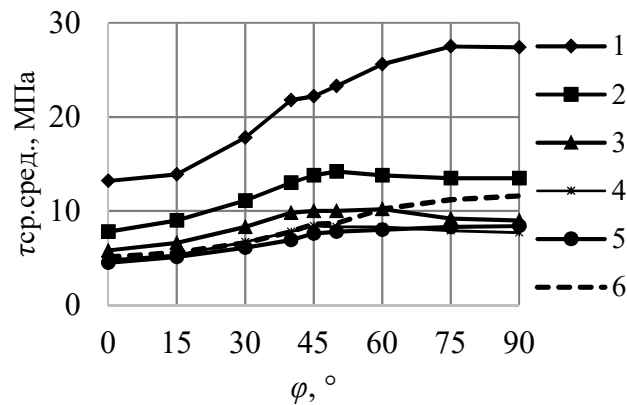


Рисунок 2 – Распределение  $\tau_{cp.ср.ед.}$  по витку резьбы в зависимости от  $\varphi^\circ$  при 6 витках

Во втором этапе полученные кривые проинтегрированы по углу и получены эквивалентные напряжения, приходящиеся на один виток в соединении:

$$\tau_{\text{э}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \tau_{cp.ср.ед.} d\varphi,$$

где  $\tau_{\varphi}$  – эквивалентные напряжения, действующие на витке;  $\tau_{cp.сред.}$  – среднее напряжение на пути;  $\varphi$  – полярный угол по витку.

Зависимость распределения напряжений по виткам от числа витков в резьбовой паре из УУКМ представлена на рисунке 3.

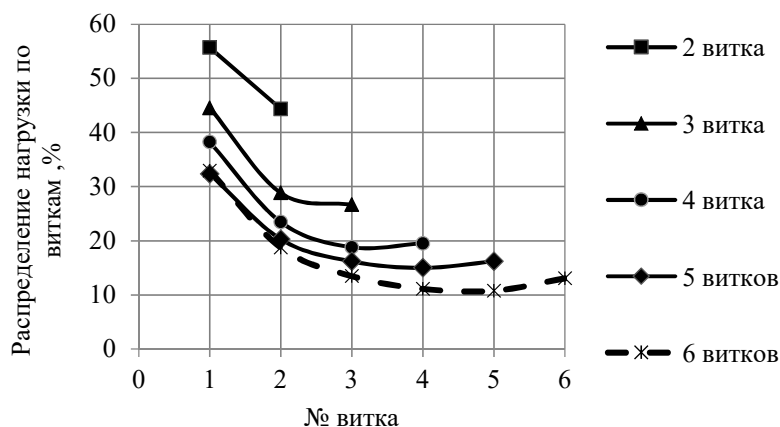


Рисунок 3 – Распределение напряжений по виткам резьбы

Считаем, что при резьбовом соединении с одним витком, всю осевую нагрузку воспринимает единственный виток. При увеличении числа витков в соединении осевая нагрузка распределяется между витками, и максимум приходится на первый виток. Начиная с модели в 2 витка и до модели при 5 витках, включительно, процент воспринимаемой осевой нагрузки первым витком постепенно уменьшается от 55% до 32%. Начиная с модели от 5 витков осевая нагрузка, воспринимаемая первым витком, стабилизируется и останавливается приблизительно на уровне 1/3 от общей осевой силы, действующей на резьбовую пару.

Таким образом, усилие, вызывающее срез витков, можно записать в следующем виде:

$$F_{раз} \geq S\tau_{cp} / (k\eta) = \pi d_3 k_1 P \tau_{cp} / (k\eta) \quad (1)$$

где  $F_{раз}$  – усилие, вызывающее срез витков;  $H$ ;  $\tau_{cp}$  – прочность материала на срез, МПа;  $S = \pi d_3 H$  – площадь среза первого витка, мм<sup>2</sup>;  $d_3$  – внутренний диаметр резьбы, мм;  $H = k_1 P$  – высота среза витка, мм;  $k_1$  – коэффициент эффективной площади среза витка (для метрической резьбы  $k_1 = 0,825$ , для трапецидальной  $k_1 = 0,634$  и т.д.);  $P$  – шаг резьбы, мм;  $\eta$  – доля нагрузки, воспринимаемая первым витком;  $k = 2$  – коэффициент неравномерности восприятия нагрузки витком.

#### Исследование прочности УУКМ на срез с учетом влияния масштабного эффекта

Экспериментальные исследования поведения прочности материала при срезе определялись в соответствии с ОСТ 92-1474-78, на УУКМ со схемой армирования 4ДЛ и диаметром армирующего элемента 0,7 мм при толщинах образцов от



1 до 3 мм, вырезанных в направлениях соответствующим плоскостям среза  $YX$  и  $ZX$ . Толщина образцов выбиралась таким образом, чтобы соответствовать размеру шага метрической резьбы в плоскости среза. На каждое значение размера приходилось не менее 5 образцов. Результаты приведены на рисунке 4.

В результате анализа полученных данных можно сделать вывод, что масштабный эффект прочности при срезе присутствует в области размеров материала сопоставимых с шагом резьбы, но разброс значений, полученных в ходе экспериментального исследования, показывает, насколько он нестабилен. В результате статистической обработки результатов на всем диапазоне толщин от 1 до 3 мм получено, что прочность в плоскости  $YX$  составляет 27,3 МПа, а в плоскости  $ZX$  – 25,7 МПа, поэтому в качестве прочности материала на срез были приняты осредненные значения в плоскостях среза  $\tau_{cp} = 26,5$  МПа.

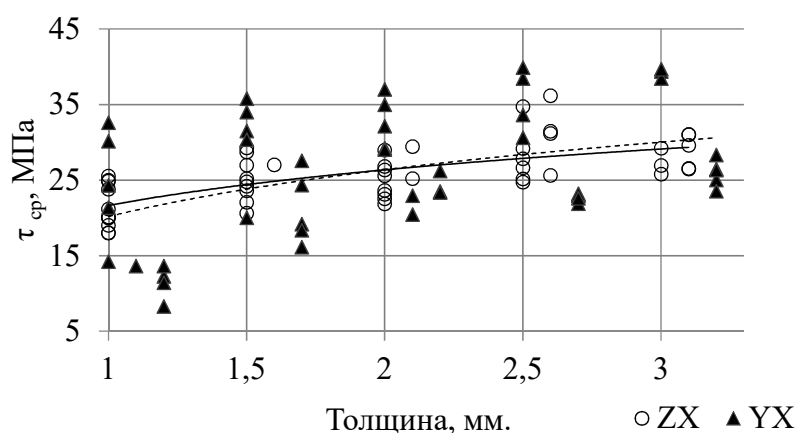


Рисунок 4 – Зависимость  $\tau_{cp}$  УУКМ от толщины образца

И тогда получим, что  $F_{раз}$  для различного количества витков в соединении будет равна (таблица 1).

Таблица 1 – Усилия  $F_{раз}$ , вызывающие срез витков по формуле (1)

Число витков в модели резьбы	$F_{эксн}$ , Н	$F_{раз}$ , Н	$\delta$ , %
1	1360	950	30
2	2181	1697	22
3	2815	2112	25
4	3666	2501	32
5	4450	2969	33
6	4024	2969	26
Средняя относительная погрешность, %			28

По результатам, приведенным в таблице 1, можно сделать вывод, что средняя относительная погрешность расчета разрушающей нагрузки по формуле (1), не превышает 28 %, причем оценка по предложенной формуле является консерва-

тивной, то есть расчетные значения были ниже, чем реально разрушающая нагрузка, таким образом, формула (1) применима для проектных расчетов.

#### *Литература*

1. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites / J.R. Gomes [и др.] // Wear. – 2001. – Т. 249. – С. 240-245.
2. Study on Friction Performance of Carbon/Carbon Composite under Lubrication Condition / Yewei Fu [и др.] // ICCM-17 Proceedings. – 2009.
3. Булатова А.З. Оценка опасности расслоений в металле конструкций на основе диаграммы трещиностойкости / А.З. Булатова, М.Н. Захаров, Е.М. Морозов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 3. – С. 41-46.

#### *References*

1. Gomes J.R., Silva O.M., Silva C.M. et al. // Wear. – 2001. – V. 249. – P. 240-245.
2. Fu Ye., Li H., Fei J. et al. Study on Friction Performance of Carbon/Carbon Composite under Lubrication Condition // ICCM-17 Proceedings. – 2009.
3. Bulatova A.Z., Zakharov M.N., Morozov E.M. // Factory laboratory. Diagnostics of materials. – 2010. – No. 3. – P. 41-46.

УДК 539.3

### **МЕЖСЛОЙНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ**

© Л. А. Бохоева, А. В. Перевалов, Я. А. Шевченко

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670033, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, строение 1  
E-mail: bohoeva@yandex.ru

*В работе рассмотрена задача о нелинейной устойчивости изотропной сферической оболочки, имеющей дефект типа тонкое расслоение, расположенное вблизи внутренней поверхности. Дефект представляет собой сферический сегмент. Проведен приближенный расчет закритических деформаций сферической оболочки в зоне отслоения.*

**Ключевые слова:** межслойные дефекты, сферическая оболочка, слоистые материалы, отслоение, моделирование.

### **INTERLAMINAR DEFECTS IN SPHERICAL SHELLS**

L. A. Bokhoeva, A. V. Perevalov, Ya. A. Shevchenko

East Siberia state university of technology and management  
670033, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., building 1  
E-mail: bohoeva@yandex.ru

*The paper considers the problem of nonlinear stability of thin exfoliations located near the inner surface of an isotropic spherical shell. The defect is a spherical segment. An approximate calculation of the supercritical deformations of the spherical shell in the exfoliation zone is carried out.*

**Keywords:** interlaminar defects, spherical shell, layered materials, delamination, modeling.

Рассмотрим замкнутую сферическую оболочку толщиной  $H$  и радиусом  $R$ . Оболочка подвержена внешнему равномерному давлению  $q$ . Будем считать, что

исходное напряженное состояние оболочки безмоментно, во внутренней поверхности оболочки имеется единственный дефект типа расслоение толщиной  $h$ . Зона дефекта представляет собой сферический сегмент, расположенный под центральным углом  $2\theta$ . Угол отсчитывается от середины дефектного участка. Для дефектного слоя выполняется следующее условие: толщина дефекта во много раз меньше толщины оболочки, поэтому дефектный слой теряет устойчивость при начальном нагружении оболочки внешним давлением [1]. Отслоившийся участок можно рассматривать как пологую тонкую сферическую панель, жестко защемленную по контуру (рисунок 1), при этом будем не учитывать влияние деформации отслоившейся части на деформацию основной части оболочки. Постановка задачи: рассмотрим симметричную форму нелинейного деформирования пологой сферической панели, которая представляет межслойный дефект типа расслоения в сферической оболочке.

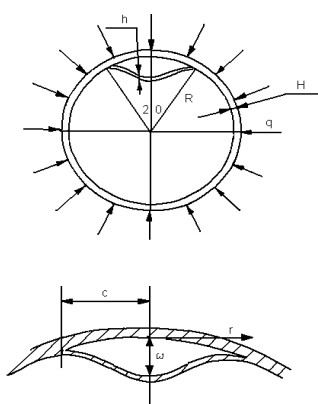


Рисунок 1 – Сферическая оболочка с межслойным отслоением.

Переход отслоившейся части расслоения из начального невозмущенного состояния в новое возмущенное состояние, задаем перемещениями точек срединной поверхности:

$$u = u_0 + \eta u_1 + \eta^2 u_2 ;$$

$$w = w_0 + \eta w_1 + \eta^2 w_2 .$$

Так как значения функция  $w_2(r)$  на второй степени порядка малы, при приближенных расчетах, функция  $w_2(r)$  не войдет в выражения для потенциальной энергии:

$$w = w_0 + \eta w_1 .$$

Функции перемещения зависят только от радиуса  $r$ . Согласно, работы [2], проводимой ранее авторами данной статьи, в новом состоянии компоненты деформации можно выразить через перемещения. Для сферической панели, жестко защемленной по контуру, выполняются следующие граничные условия:

$$w=0; \frac{dw}{dr} = 0 \text{ при } r=c,$$

где  $c$  – радиус кругового отслоения. Второе граничное условие будет  $u=0$ , при  $r=c$ , так как по краю дефекта типа расслоения отсутствуют радиальные перемещения.

Аппроксимирующую функцию для прогиба, которая удовлетворяет граничным условиям, можно представить в виде

$$w_1 = \left(1 - \frac{r^2}{c^2}\right)^2 \quad \text{при } r=c.$$

При решении вспомогательной задачи, определяем радиальные перемещения дефекта  $u_1(r)$  и  $u_2(r)$ . Определим следующую функцию усилий  $\varphi_1$ , связанную с прогибом  $w_1(r)$ , для нахождения перемещения в первом приближении  $u_1(r)$

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \varphi_1 = -\frac{1}{R} \nabla^2 w_1,$$

$$\text{где } \nabla^2 \equiv \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d}{dr} \right), \text{ или } \frac{d\varphi_1}{dr} = \frac{E}{6Rc} \left( 3 \frac{r^3}{c} - \frac{r^5}{c^3} \right) + C_1 \frac{r}{2} + C_2 \frac{1}{r}.$$

В центре дефекта типа расслоение радиальные напряжения ограничены по величине  $\sigma_r = 0$  при  $r \rightarrow 0$ . При осесимметричном случае  $\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\varphi_1}{dr}$ . Согласно

но  $c_2 = 0$  и  $c_1 = -\frac{2E(2-\mu)}{3R(1-\mu)}$  следует граничное условие  $\frac{du_1}{dr} = 0$  при  $r = 0$ .

Используя полученное значение  $c_1$ , определяем радиальное перемещение в первом приближении для точек срединной поверхности:

$$u_1 = \frac{r}{2R} \left[ 2(2-\mu) - 3(3-\mu) \frac{r^2}{c^2} + (5-\mu) \frac{r^4}{c^4} \right],$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона дефекта типа расслоение.

Радиальное перемещение во втором приближении  $u_2(r)$ , которое удовлетворяет всем необходимым граничным условиям задачи, можно определить:

$$u_2 = \frac{1}{6R} \left[ 3(1-\mu) \frac{r}{c} - 6(3-\mu) \frac{r^3}{c^3} + 4(5-\mu) \frac{r^5}{c^5} - (7-\mu) \frac{r^7}{c^7} \right].$$

Изменение полной потенциальной энергии сферической панели при переходе от начального состояния к смежному возмущающему состоянию можно определить из выражения:

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E} - \mathcal{E}_0 = U + V - \Pi,$$

где  $U = U_2 + U_3 + U_4$  - потенциальная энергия срединной поверхности (для исследования устойчивости в критической точке и анализа закритического поведения сферической панели рассмотрены члены более высокого порядка малости);

$$V = \frac{32}{3} \pi D \eta^2 / c^2;$$

$\Pi$  – потенциальная энергия изгиба  $\Pi = \frac{\eta^2 \pi C}{2} \int_0^R qR \left( \frac{dw_1}{dr} \right)^2 r dr = \frac{2\pi Rq}{3} \eta^2$ , где

$\eta$ - параметр, зависящий от уровня нагрузки сферической панели.

Для дальнейших расчетов при вводе безразмерных величин

$$\Delta \bar{\mathcal{E}} = \frac{3\Delta \mathcal{E} R}{2Eh^4 \pi}; \quad \bar{q} = \frac{qR^2}{Eh^3}; \quad \bar{\eta} = \frac{\eta}{h}; \quad \bar{c} = \frac{c}{R}; \quad \bar{R} = \frac{R}{h}$$

получаем следующее выражение для изменения полной потенциальной энергии  $\Delta \bar{\mathcal{E}}$ :

$$\Delta \bar{\mathcal{E}} = \frac{\bar{\eta}^2 \bar{c}^2 \bar{R} (2,84 - 2,84\mu + 0,72\mu^2)}{1 - \mu^2} + \frac{\bar{\eta}^3 \bar{c} [1,64 + 1,01\mu + 0,17\mu^2 + (1 + \mu)(0,66 - 0,33\mu)]}{1 - \mu^2} - \frac{\bar{\eta}^3 [1,64 - 0,76\mu + (1 + \mu)(1,13 - 0,08\mu)]}{1 - \mu^2} + \frac{\bar{\eta}^4 0,11}{\bar{c}^2 \bar{R}} - \bar{\eta}^2 \bar{q} + \frac{2\bar{\eta}^2 \bar{c}^2 \bar{R} \mu (2 - \mu)^2}{3(1 - \mu^2)} + \frac{1,33\bar{\eta}^2}{\bar{c}^2 \bar{R} (1 - \mu^2)}$$

Будем считать варьируемым параметр  $\bar{\eta}$ , который характеризует прогиб отслоения в центре дефекта типа расслоения [3, 4]. Значение критической нагрузки приблизительно находим из условия стационарности полной потенциальной энергии. На рисунке 2 представлена зависимость безразмерного параметра нагрузки  $\bar{q}$  от размеров дефектного участка  $\bar{\eta}$ . Далее представлено моделирование сферической оболочки с дефектом типа расслоение в системе ANSYS (Рис. 3).

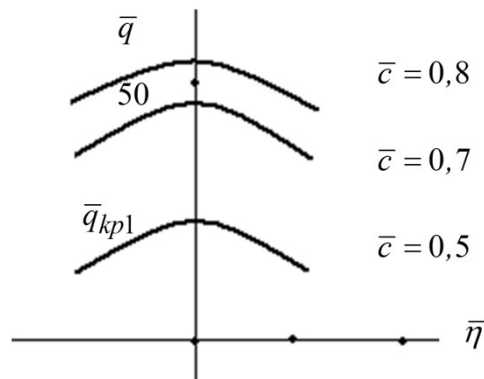


Рисунок 2 – Зависимость безразмерного параметра нагрузки  $\bar{q}$  от размеров дефектного участка  $\bar{\eta}$ .

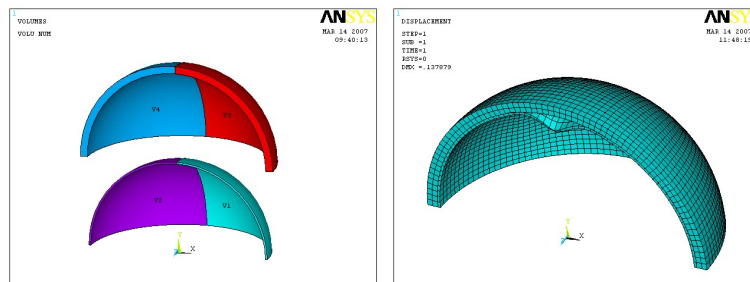


Рисунок 3 – Модель сферической оболочки с дефектом типа расслоение в системе ANSYS

Выводы: В данной работе представлена задача устойчивости тонких межслоевых дефектов типа расслоений, расположенных вблизи внутренней поверхности сферической оболочки. По форме область дефекта представляет собой сферический тонкостенный сегмент. При решении задачи решена была применен энергетический метод, представлена компьютерная модель оболочки с дефектом в системе ANSYS. Критическое значение отслоившейся части получено при использовании некоторых упрощенных допущений. Для полного аналитического исследования закритического поведения и нахождения нижней критической нагрузки следует обратиться к нелинейной теории оболочек.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-18050/18.

#### *Литература*

1. Бохоева Л.А. Определение критических нагрузок с помощью энергетического критерия устойчивости для локального круглого дефекта / Л.А. Бохоева, В.Е. Рогов, А.С. Чермошнцева // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 4 (24). – С. 32-37.
2. Бохоева Л.А. Прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслоевыми дефектами / Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, В.Е. Рогов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 87-92.
3. Бохоева Л.А. Исследование устойчивости пластин с дефектами типа круглых отслоений / Л.А. Бохоева // Вестник Бурятского государственного университета. – 2007. – № 6. – С. 85-89.
4. Бохоева Л.А. Устойчивость круглых дефектов типа отслоений в элементах конструкций с учетом поперечного сдвига / Л.А. Бохоева, В.Е. Рогов, А.С. Чермошнцева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 4 (44). – С. 19-22.

#### *References*

1. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S. // Sistemy. Metody. Tekhnologii. – 2014. – No. 4 (24). – P. 32-37.
2. Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Rogov V.E. // Fundamentalnye problemy sovremenogo materialovedeniya. – 2013. – V. 10. – No. 1. – P. 87-92.
3. Bokhoeva L.A. // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2007. – No. 6. – P. 85-89.
4. Bokhoeva L.A., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S. // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie. – 2014. – No. 4 (44). – P. 19-22.

УДК 537.323

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТАБИЛЬНОСТИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$**

© А. В. Бабич, М. С. Рогачев, М. Ю. Штерн, А. А. Шерченков  
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»  
124498, Россия, г. Москва, площадь Шокина, дом 1  
E-mail: drent@yandex.ru

В данной статье приведены исследования термических свойств и стабильности перспективного термоэлектрического материала  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$  в наноструктурированном виде. Исследованный материал был синтезирован методом прямого сплавления в кварцевых ампулах. Дальнейшая обработка позволила получить материал со средним размером частиц порядка 100 нм. После этого порошок подвергся горячему прессованию. Термические свойства материала исследовались с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии. При первом измерении  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$  появлялся эндопик при температурах 267-272 °C и два перекрывающихся экзопика в температурном диапазоне 280-346 °C. Эти пики исчезали при втором и третьем измерениях. Их природа может быть связана с метастабильными состояниями. При втором измерении можно видеть образование эндопика в температурном диапазоне 397-404 °C, который увеличивался при третьем измерении.

**Ключевые слова:** термоэлектрические материалы, термоэлектрическое генераторы, термоэлектричество, термические свойства, система Sn-Te, наноструктурированные материалы.

#### INVESTIGATION OF THERMAL PROPERTIES AND STABILITY OF THE NANOSTRUCTURED THERMOELECTRIC MATERIAL $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$

A. V. Babich, M. S. Rogachev, M. Y. Shtern, A. A. Sherchenkov

National Research University of Electronic Technology

Bld. 1, Shokin Square, Moscow, 124498, Russia

E-mail: drent@yandex.ru

*This article presents studies of the thermal properties and stability of the promising thermoelectric material  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$  in nanostructured form. The studied material was synthesized by direct alloying in quartz ampoules. Further processing allowed to obtain a material with an average particle size of about 100 nm. After that, the powder was hot pressed. The thermal properties of the material were investigated using differential scanning calorimetry. At the first measurement of  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$ , an endopeak appeared at temperatures of 267-272 °C and two overlapping exopeaks in the temperature range of 280-346 °C are observed. These peaks disappeared after the second and third measurements. Their nature may be associated with metastable states. For the second measurement, the formation of the endopeak in the temperature range of 397-404 °C can be seen, which increased during the third measurement.*

**Keywords:** thermoelectric materials, thermoelectric generators, thermoelectricity, thermal properties, Sn-Te system, nanostructured materials.

Сегодня термоэлектрические преобразователи энергии находят широкое применение во многих областях деятельности человека. В частности, можно отметить высокую перспективность термоэлектрических генераторов (ТЭГ). Однако, широкое распространение таких устройств сдерживает их сравнительно низкая эффективность, которая определяется величиной безразмерной термоэлектрической добротности и рабочим диапазоном температур.

К настоящему моменту известно много термоэлектрических материалов, которые подходят для применения в ТЭГ в широком диапазоне температур, от 300 до 1300 К [1]. Но стоит отметить, что значения безразмерной термоэлектрической добротности  $ZT$  для этих материалов высоки лишь в узкой области температур, что ограничивает применение ТЭГ лишь этим узким температурным диапазоном, вне которого эффективность существенно падает.

Один из путей решения данной проблемы – использование ТЭГ с многосекционными ветвями. Каждая секция изготавливается из материала, обладающего максимальным значением  $ZT$  в определенном интервале температур [2].

Термоэлектрический материал должен обладать высокой термоЭДС, высокой электрической проводимостью и малой теплопроводностью. Однако, одновременное сочетание указанных качеств в одном материале теоретически недостижимо, поэтому подбор хорошего термоэлектрического материала является компромиссом для заданных условий эксплуатации. Один из путей повысить термоэлектрическую добротность материала – наноструктурирование. Такой подход позволяет существенно увеличить рассеяние фононов и уменьшить теплопроводность материала.

Среднетемпературные термоэлектрические материалы системы Sn-Te известны уже достаточно давно и обладают сравнительно высокой термоэлектрической добротностью. В частности, в работе [1] была показана перспективность состава  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$  для применения в термоэлектрических генераторах. Однако свойства наноструктурированных материалов системы Sn-Te до сих пор изучены недостаточно.

В связи с этим целью данной работы было исследование термических свойств и стабильности наноструктурированного термоэлектрического материала ( $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$ ), перспективного для применения в термоэлектрических генераторах.

Синтез исследованного материала осуществлялся прямым сплавлением в кварцевых ампулах при температуре 950 °С. Далее материал измельчался в щековой дробилке и мельнице ножевого типа. Последующее использование мельницы планетарного типа позволило получить материал со средним размером частиц порядка 100 нм. После этого порошок подвергался горячему прессованию.

Термические свойства материала исследовались с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC-50, Shimadzu). Измерения проводились в потоке азота при скорости нагрева 5 градусов в минуту в Al тиглях. Масса навесок составляла порядка 10 мг. Результаты измерений представлены на рисунке 1.

При первом измерении  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$  появлялся эндотик при температурах 267-272 °С и два перекрывающихся экзотика в температурном диапазоне 280-346 °С. Эти пики исчезали при втором и третьем измерениях. Их природа может быть связана с метастабильными состояниями. В связи с тем, что пики данных тепловых эффектов накладываются друг на друга, для более точного определения параметров этих пиков была проведена математическая обработка ДСК кривой (рисунок 2). Необходимый температурный участок описывался с помощью суперпозиции Гауссианов, что позволило определить параметры каждого теплового эффекта в отдельности. Температура начала первого теплового эффекта составляет 280 °С, второго – 301 °С.



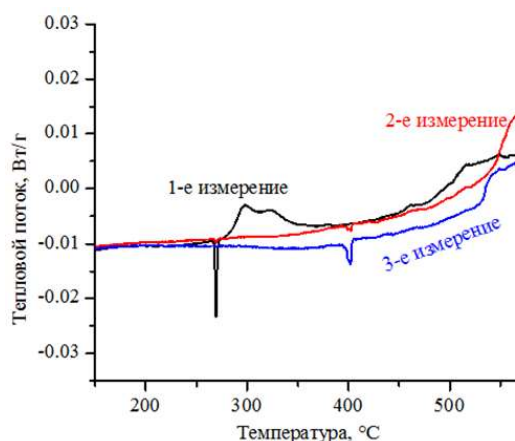


Рисунок 1 – ДСК кривые образца  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$

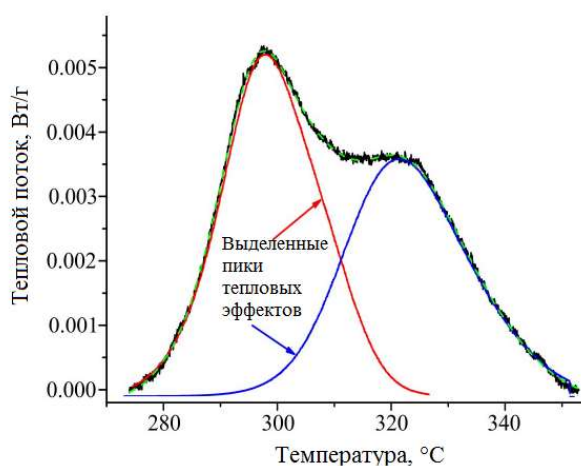


Рисунок 2 – Обработка ДСК кривой (выделение пиков)

При втором измерении можно видеть образование эндопика в температурном диапазоне 397-404 °C, который увеличивался при третьем измерении. Принимая во внимание фазовую диаграмму  $\text{SnTe}$ , природа данного пика может быть объяснена эвтектической реакцией



В связи с этим, данный материал может быть использован до температуры 250 °C.

Таким образом, в данной работе было показано, что термоциклирование  $\text{Sn}_{0,9}\text{Pb}_{0,1}\text{Te}$  выше 250 °C может привести к появлению и развитию тепловых эффектов, что свидетельствует о фазовом разделении, которое может существенно повлиять на термическую стабильность и рабочие диапазоны температур наноструктурированных термоэлектрических материалов и нуждается в тщательном исследовании.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации (СП-4954.2018.1).

### *Литература*

1. Современное состояние термоэлектрического материаловедения и поиск новых эффективных материалов / А.А. Шерченков [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2015. – Т. 10. – С. 827-840.

2. A high-temperature, high-efficiency solar thermoelectric generator prototype / M.L. Olsen [и др.] // Energy Procedia. – 2014. – Т. 49. – С. 1460-1469.

### *References*

1. *Sherchenkov A.A., Shtern Yu.I., Mironov R.E., Shtern M.Yu., Rogachev M.S.* // Nanotechnologies in Russia. – 2015. – V. 10. – P. 827-840.

2. *Olsen M.L., Warren E.L., Parilla P.A. et al.* // Energy Procedia. – 2014. – V. 49. – P. 1460-1469.

УДК 54

## **AN INNOVATIVE WAY TO PRODUCE NANOFIBROUS BUNDLE BY CONDENSATION AND HEAT-DRAWING OF A NANOFIBER WEB**

© **Ganbat Tumen-Ulzii<sup>1a</sup>, Ganbat Danaa<sup>1b</sup>, and You Huh<sup>2c</sup>**

<sup>1</sup>Mongolian University of Science and Technology,

Baga Toiruu 34, Sukhbaatar District, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>2</sup>Dept. of Mech. Eng., College of Eng., Kyung Hee Univ., Yongin, 446-701, Korea

E-mail: <sup>a</sup>ganbat\_tu@must.edu.mn, <sup>b</sup>ganbat\_da@must.edu.mn, <sup>c</sup>ganbat\_tu@must.edu.mn

*This research reports a new product form made of nanofibers (a nanofibrous bundle) and the method used to produce it. Nanofibers are electrospun into a web form on a moving collector and the nanofiber web is transformed into a bundle by passage through a condenser. Since the web is hardly peeled off from the collector surface and deforms very easily, the condensed bundle is too weak for further processing. Therefore the bundle needs to improve the structural and mechanical properties. The bundle is drawn through a roller drafting system heated by a heating device. The elevated temperature affects the bundle drawing process and the bundle properties. Using a newly designed system, we tried to produce nanofibrous bundle of PVDF (polyvinylidene difluoride). The nanofiber arrangement and the tensile properties of the bundle were measured before and after the drawing process under various drawing conditions.*

**Keywords:** *nanofibrous bundle, heat drawing, fiber rearrangement, bundle strength, strain at breakage.*

### **1. Introduction**

Electrospinning is known as an efficient nanofiber production method. However most electrospun fibers are produced in the form of randomly-oriented nonwoven mat[1]. Recently, many researchers have developed technologies to obtain continuous non-twisted nanofiber bundles, by using a rotating mandrel, a water reservoir collector, two oppositely located metallic spinneret and self-bundling, etc [2-4]. Although these methods have the advantage of being able to produce nanofibrous bundles directly, there are critical disadvantages such as a low productivity and insufficient reproducibility for the application.

This paper introduces a novel method to produce thermodynamically stabilized twistless nanofibrous bundles. Nanofibers collected to the twistless nanofiber bundles are drawn by roller pairs with the purpose to stabilize the internal structure of the nanofibers thermodynamically so that the shape and the mechanical properties of the nanofibers and their bundles are improved.

We investigated the influence of various drawing conditions on the tensile properties, especially for various draw ratios and heating temperatures, in order to establish the feasible operation conditions and to confirm how far the mechanical properties can be improved.

## 2. Design of the Web-bundling System

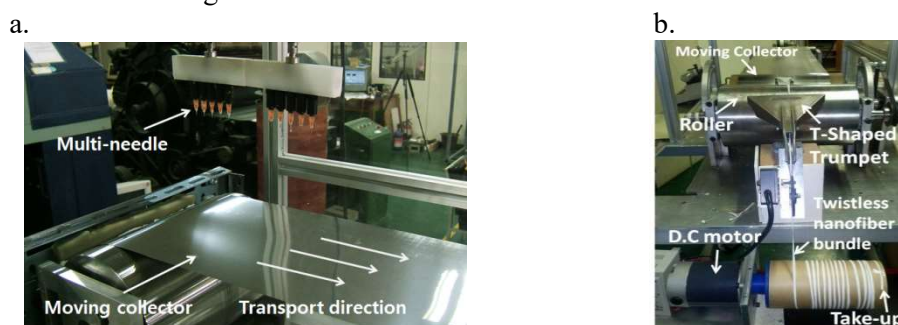
### 2.1 System configuration

The novel system used to transform the nanofibrous web into a bundle in this study consists of two parts: 1) an electrospinning system with two multi-headed (i.e., 5-needle) syringes and an endless moving collector, and 2) a 3/3 roller drafting system equipped with a heating chamber.

#### 2.1.1 Electro-spinning and bundling device

Production of a nanofibrous bundle was implemented according to the following stages. First the polymer solution was ejected from the Taylor cone at the tip of the needle of the syringe which is driven by a micro pump. The nanofibers were produced by whipping the ejected polymer solution due to the electrostatically pulling force that was generated between the needle and the collector by a DC-electric power source.

The process for producing a nanofibrous bundle is composed of three steps: 1) web formation by fiber accumulation on the moving collector, 2) nanofiber bundling by guiding the nanofibrous web into a condenser (called a T-shaped trumpet), and 3) take-up of the bundle. Figure 1 shows the moving collector of the electrospinning system in combination with multiple needles. The take-up system with the bundling condenser is shown in Figure 1.



a. Photograph of the moving collector system and a multi-needle array.

b. A photograph of the bundling unit with a T-shaped trumpet.

Figure 1

First, electrospun nanofibers were accumulated in a web form on the collector, which transported the web to the bundle formation device. Then, the fiber web was peeled off of the collector surface and delivered to the condenser, where the web was transformed into a bundle while passing through the condenser hole and groove, which has a narrow cross-section. The bundle delivered from the condenser contained no twists, because the fibers were arrayed in loops in the web and were simply squeezed in the condenser due to the narrow cross-section.

#### 2.1.2 Heat-drawing system

Since the nanofibers were laid on the collector in the form of loops that were compressed laterally in the condenser, the bundle was weak and easily deformed upon external loading. Therefore the bundle structure and the fiber arrangement had to be improved and the constituent nanofibers also stabilized thermodynamically. Thus, the

bundle underwent a drawing process under heating. A heat-drawing system, consisting of three roller pairs, a digital thermometer, and a home-made heating chamber, was designed and constructed. The middle and front rollers were driven individually by servo-motors. The middle roller and the back roller were hard linked by a belt. The heating chamber was installed between the first two roller pairs by constructing a front drawing zone. Drawing was implemented using the speed difference between the front and middle roller pairs, while the fiber bundle was heated continuously by supplying hot air at a controlled temperature. Figure 2 shows the experimental system for heat-drawing the nanofibrous bundle.

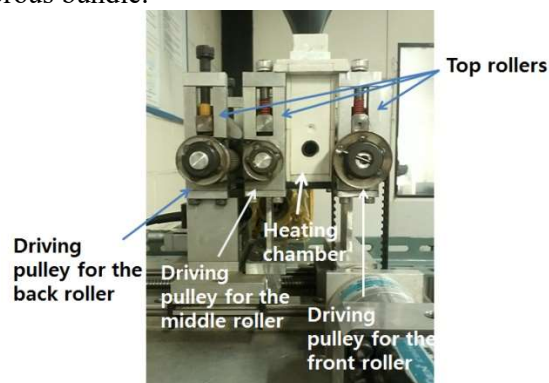


Figure 2 – Side view of the heat drawing system for the nanofibrous bundle

### 3. Experimental

#### 3.1 Raw Material

As the raw material for nanofibers, poly(vinylidene difluoride)(PVDF) was adopted with a molecular weight of 107,000. The solvent for the PVDF was a mixture of 60% N,N-dimethylacetamide (DMAc) and 40% acetone, into which PVDF was dissolved. The solution was then heated to 60°C to a concentration of 20 wt%.

#### 3.2 Processing

##### 3.2.1 Fiber accumulation and twistless bundling

Electro-spinning in the experimental rig was conducted by supplying an electric voltage of 16 kV. The spinneret, a syringe with needles, was installed with a distance of 16 cm separating the needle tip and the collector. Experimental conditions for the electro-spinning and bundling process are listed in Table 1.

Table 1 – Electrospinning conditions

Material	Polymer	PVDF
	Solvent	DMAc/ acetone
Needle size	mm	0.33
Number of needles	ea	10
Needle distance	mm	12
Solution feed rate	ml/h	5
Voltage	kV	16
Distance from nozzle tip to collector	mm	120
Collector speed	m/min	0.2
Take-up speed	m/mm	0.22

The PVDF solution ejected from the Taylor cone was whirled and whipped to form loops on the moving collector, while being solidified between the needle tip and collector. The nanofibers were stapled in multiple loops and became a web. The nanofibrous web produced on the collector was transported to the condenser and transformed into a nanofibrous bundle.

### 3.2.2 Heat-drawing process

Drawing was implemented using the speed difference between the front and back rollers. Since the bundle delivered was made of multiple loops of nanofibers, and the nanofibers had been solidified over a short spinning distance, the properties of the nanofibers and the bundle structure were not yet stable. In addition, the bundle was so weak and brittle that cold drawing did not yield any significant results. After numerous trials, we determined the optimal heat-drawing conditions, which are given in Table 2.

Table 2 – Process conditions for heat-drawing of nanofibrous bundles

Fiber Material	PVDF	
	Bundle width, $\mu\text{m}$ (tex)	1,213 (249)
	CV%	4.2 (4.5)
Front roller speed	m/min	0.2
Heating zone length	mm	45
Temperature range	$^{\circ}\text{C}$	20, 70-110
Draw ratio		1.0-4.0
Distance between rollers	mm	60
Diameter of roller	mm	30

The dimension of the heating chamber were 100x30x80 (mm) and the operation temperature ranged from 20 $^{\circ}\text{C}$  (room temperature) to 120 $^{\circ}\text{C}$ . Heat-drawing was conducted while the front roller speed was kept constant at 0.2 m/min, and the chamber temperature was adjusted to 3 levels: 70 $^{\circ}\text{C}$ , 90 $^{\circ}\text{C}$  and 110 $^{\circ}\text{C}$ , which remained somewhat below the melting point of the PVDF polymer (150 $^{\circ}\text{C}$ ) [14]. The draw ratio was controlled at a range between 1.0 and 4.0 by the servo-motor, driving the middle and back roller pairs, and by a PC, which monitored and controlled the drawing process [15-16].

### 3.2.3 Measurements

The morphology and thickness of the nanofibrous bundle and of the constituent nanofibers before and after the heat-drawing treatment were measured from high magnification SEM images. Also measured were the tensile properties of the bundle before and after heat-drawing, where the test speed was 200 mm/min and the specimen length was 12 mm at room temperature (20 $^{\circ}\text{C}$ ). All of the measurements were conducted from 10 or more replications. The fiber diameter was measured 100 times for each bundle specimen.

## 4. Results and discussion

### 4.1 Condensed nanofibrous bundle

During the electrospinning process, the polymer solution material extruded from the needle tips changed to fiber form. As the process advanced, the fibers were piled on the moving collector, forming a web that was transported and peeled off of the collector at the return point of the collector. Then, the nanofibrous web was passed on to the T-shaped condenser, where the web was transformed to a nanofibrous bundle and wound onto a bobbin. Figure 3 shows a SEM image of the condensed nanofibrous

bundle. The constituent fibers are arrayed at random. The fibers differ in thickness and the thickness of each fiber varies longitudinally.



Figure 3 – SEM image of the inside of the condensed nanofibrous bundle

Since the nanofibrous bundle was generated simply by condensing the web cross-directionally and the nanofibers were arrayed as loops in the web, the bundle was still easily deformable in structure and the nanofibers vulnerable to external loading. A typical S-S curve of the condensed nanofibrous bundle is given in Figure 11. The tensile test shows repeated slip-stick deformation, which indicates that fiber-to-fiber friction occurs primarily in the condensed bundle during tensile deformation. The elongation at breakage is very high, even though the fibers are bundled. The strength is very low. Therefore the bundle needs to be further processed to improve the structural and mechanical properties. The bundle was thus drawn in an elevated temperature atmosphere, where the bundle and the structure and physical properties of the bundle and the constituent nanofibers changed according to the process conditions. Following sections are dealing with the effects of the heat-drawing process on the nanofibrous bundle and the constituent nanofibers.

#### **4.2 Thickness of the output bundle and the constituent fibers**

In general, drawing is conducted to narrow the thickness of the bundle and/or the constituent fibers. In this research the effects of drawing were investigated by measuring the thickness of the nanofibrous bundle and the constituent fibers before and after drawing at various temperatures and draw ratios.

##### **4.2.1 Effects of drawing on bundle width**

Bundle thickness is reduced, when bundles are drawn. Since the nanofibrous bundle after condensing had a shape of a thin band, the thickness change of the bundle through heat drawing was difficult to measure so that the width of the bundle was measured in terms of the width. The bundle width decreased, as the draw ratio increased. At room temperature, a draw ratio higher than 1.2 caused the bundle to break. The bundle was too weak to resist this drawing tension at room temperature. However, with appropriate temperature adjustment the bundle could be thinned down to 670 nm at a draw ratio of 4.0. Under given conditions with a constant draw ratio, the temperature seems to have no significant influence on bundle thickness.

##### **4.2.2 Effects of drawing on fiber diameter**

The diameter change of the constituent nanofibers can reveal detailed information about nanofibrous bundle drawing. In a stretched state in the direction of the bundle axis, the fiber diameter decreases, as the draw ratio increases. If the fibers are laid cross-wise, bundle drawing would not influence constituent fiber thickness. At a draw ratio of up to 2.0, the diameter of the constituent fibers is not affected by drawing. At a draw ratio higher than 3.0, the fiber diameter decreases in comparison with the undrawn bundle. This thinning

effect, however, could not be statistically proven due to the large variance in fiber dimensions. While the fibers were placed randomly in the bundle with elliptic trajectories, they were realigned in the drawing direction when the bundle was drawn, which did not significantly deform the fibers. Drawing temperature had no statistically significant influence on fiber diameter. At a low draw ratio of 2.0, no effect of temperature was observed on fiber diameter. At a draw ratio of 3.0, the temperature seemed to affect the fiber diameter on average, but the change was not statistically significant either. These results can be attributed to the fact that the fiber diameter became more varied during drawing, such that the effects of temperature could not be easily observed.

Heat drawing generally caused a thinning effect on the bundle, but the effect on the constituent fibers was minimal. The higher the draw ratio, the thinner the bundle became, but also the more variant fiber diameter was. Drawing temperature considered as a process factor turned out to have functioned in that the bundle became softened, thus could be drawn without breakage.

#### 4.3 Fiber arrangement in the bundle

As draw ratio increased, the thickness of the nanofibrous bundle was reduced and the diameter of the constituent nanofibers decreased at a varying rate. Drawing temperature had no significant influence on the dimensions of the fiber bundle and the constituent nanofibers. This result indicates that during the drawing process, the nanofibrous bundle became thinner first, then the constituent nanofibers became thinner when the drawing ratio and temperature exceeded a certain level. This suggests that drawing of the nanofibrous bundle occurs in two steps. At first the fiber is rearranged, and then the nanofibers are thinned, with some variation. Figure 4 shows SEM images of twistless nanofibrous bundles prepared under different draw ratios at a drawing temperature of 110°C. When the draw ratio was increased, we observed that the nanofibers were aligned parallel and the bundle had decreased in width, but fiber diameter varied considerably.

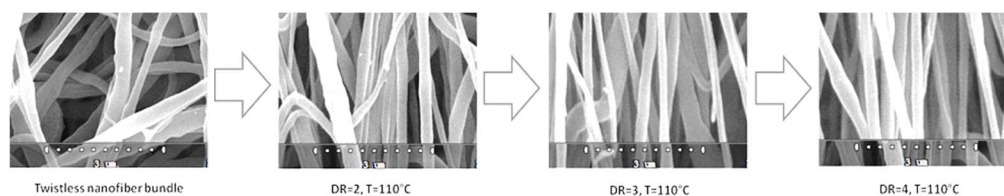


Figure 4 – SEM images of nanofibrous bundles prepared at different drawing ratios (T=110°C)

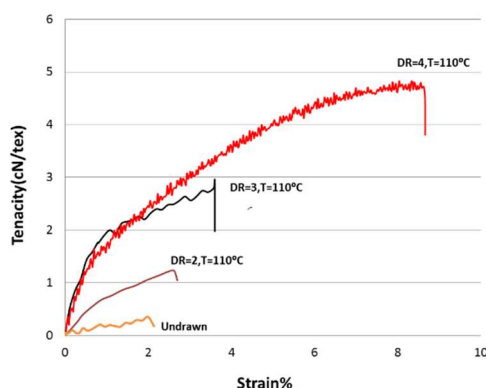


Figure 5 – Stress vs. strain curves for nanofibrous bundles prepared at different draw ratios with a constant temperature of 110°C

The stress vs. strain curves of the nanofibrous bundles had a more or less linear shape. The undrawn bundles were easily deformable and weaker than the drawn bundles. Figure 5 shows that the bundles drawn with a low draw ratio of 2.0 at temperatures of 70 and 90°C exhibited lower strain at breakage than undrawn bundles, but that bundles drawn at a temperature of 110°C were more deformable in comparison to undrawn bundles. The strength of all of the drawn bundles was higher than undrawn bundles. When the bundles were drawn at 110°C, the strain at breakage was larger, as the draw ratio increased. It can be concluded that the draw ratio and temperature affect the tensile properties of drawn bundles. Drawing at a low temperature with a low draw ratio of 2 resulted in low elongation at breakage, while the bundle became stronger. As the draw temperature and draw ratio increased, the tensile strength and strain at breakage improved. This could be due to fiber rearrangement along the bundle axis after drawing. The heat-drawing process increased the strength of a nanofibrous PVDF bundle to 4.8 cN/tex and increased the strain at breakage to 8.7% at draw ratio of 4 and a draw temperature of 110°C.

### 5. Conclusions

In order to extend the applications of electrospun nanofibers, we sought to develop a new process for converting nanofiber webs into continuous nanofibrous bundles using a multi-headed syringe-type electrospinning system with a moving collector. PVDF was used as the raw material. The condensed twistless PVDF nanofibrous bundle underwent a heat-drawing process to improve the structural and mechanical properties of the bundle. The fiber diameter and the properties of the bundles produced by heat-drawing process were tested.

The results demonstrated that this new method for producing twistless nanofibrous bundles was feasible. PVDF solution was ejected onto a continuously moving steel band as the collector delivered the nanofiber web. The nanofiber web was peeled off and condensed into a bundle form without twists. Roller-drawing of the twistless bundle from the nanofiber web worked well when heating was used.

SEM images and tensile test analysis showed that drawing the condensed bundle from a nanofibrous web improved the fiber arrangement of the bundle, resulting in better tensile properties. Uni-axial tensile tests showed that the bundle strength peaked at about 4.8 cN/tex with breakage strain of 0.087 at a drawing ratio of 4.0 at 110°C. The thickness of the constituent nanofibers was not significantly affected at draw ratios of up to 4.0. The drawing effect was attributed to straightening of the nanofiber loops in the bundle.

### References

1. Doshi J., Reneker D.H. // *J. Electrostatics*. – 1995. – No. 35. – P. 151-160.
2. Berry J. P. // US patent No. 4965110 A. – 1990.
3. Reneker D.H., Yarin A.L., Fong H., Koombhongse S. // *J. Appl. Phys.* – 2000. – No. 87. – P. 4531-4547.
4. Boland E.D., Wnek G.E., Simpson D.G., Pawlowski K.J., Bowlin G.L. // *J. Macromol. Sci. – Pure Appl. Chem.* – 2001. – No. A38 (12). – P. 1231-1243.
5. Matthews J.A., Wnek G.E., Simpson D.G., Bowlin G.L. // *Biomacromolecules*. – 2002. – No. 3. – P. 232-238.
6. Sill T.J., von Recum H.A. // *Biomaterials*. – 2008. – No. 29. – P. 1980-2006.
7. Bhardwaj N., Kundu S.C. // *Biotechnology Advances*. – 2010. – No. 28. – P. 325-347.
8. Huang Z.-M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna S. // *Composites Sci. & Technol.* – 2003. – No. 63. – P. 2223-2253.



9. Bornat A. // US Patent No. 4689186. – 1987.
10. Dabirian F., Hosseini Y. and Hosseini Ravandi S.A. // J. Textile. Inst. – 2007. – No. 98. – P. 237-241.
11. Theron A., Zussman E., Yarin A.L. // Nanotechnology. – 2001. – No. 12. – P. 384-390.
12. Smit E., Buettner U., Sanderson R.D. // Polymer. – 2005. – No. 46. – P. 2419-2423.
13. Pan H., Li L., Hu L., Cui X. // Polymer. – 2006. – No. 47. – P. 4901-4904.
14. Nasir M., Matsumoto H., Danno T., Minagawa M., Irisawa T., Shioya M., Tanioka A. // J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys. – 2006. – No. 44. – P. 779-786.
15. Chermoshentseva A.S., Pokrovskiy A.M., Bokhoeva L.A. The behavior of delaminations in composite materials – experimental results// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. "International Conference on Advanced Materials and New Technologies in Modern Materials Science 2015, AMNT 2015". - 2016. - C.012005.
16. Chermoshentseva A.S., Bokhoeva L.A., Rogov V.E. Experimental research of models of thin-walled-compressed rings with defects type of delamination of layered composite materials// Proceedings of IFOST-2016. 11th International Forum on Strategic Technology IFOST-2016. - 2016.- C. 112-114.

УДК 669

#### **РАЗРАБОТКА БИОСОВМЕСТИМОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**© М. И. Баскакова, С. В. Конушкин, Е. О. Насакина, К. В. Сергиенко,  
А. В. Леонов, М. А. Севостьянов**

Федеральное государственное учреждение науки «Институт металлургии и  
материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук»

119334, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, 49

E-mail: nacakina@mail.ru

*Работа посвящена формированию и исследованию сплавов памяти формы на основе титана, предназначенных для создания медицинских имплантационных изделий для малоинвазивной эндоскопической хирургии, в виде образцов различной конфигурации от слитков до проволоки диаметром 280 мкм. Для определения структуры материалов использовали СЭМ, Оже-спектроскопию, оптическую микроскопию и рентгеновскую дифрактометрию. Отмечена высокая однородность распределения компонентов по объему образцов, дендритное строение слитков и мелкозернистая структура заготовок после многократного деформирования.*

**Ключевые слова:** наноструктура, сверхэластичность, сплавы памяти формы, коррозионная стойкость, титан, ниобий, цирконий.

#### **DEVELOPMENT OF A BIOCOMPATIBLE TITANIUM-BASED SHAPE MEMORY ALLOY FOR MEDICAL DEVICES**

**M. I. Baskakova, S. V. Konushkin, E. O. Nasakina, K. V. Sergiyenko,  
A. V. Leonov, M. A. Sevost'yanov**

Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences

119334, Russia, Moscow, Leninsky Ave., 49

E-mail: nacakina@mail.ru

*The work is devoted to the formation and study of titanium-based shape memory alloys for the creation of medical implant products for minimally invasive endoscopic surgery, in the form of samples of various configurations from ingots to 280 microns in diameter. SEM, Auger spectroscopy, optical microscopy, and X-ray diffractometry were used to determine the structure of the materials. High homogeneity of components distribution over the volume of samples, dendritic structure of ingots and fine-grained structure of blanks after repeated deformation were noted.*

**Keywords:** *nanostructure, super elasticity, shape memory alloys, corrosion resistance, titanium, niobium, zirconium.*

Ряд сплавов и полимеров обладают специфическими механическими характеристиками: сверхэластичностью, соблюдением закона запаздывания, эффектом памяти формы (ЭПФ) [1-5]. Эти материалы находят обширное применение в современном мире в разнообразных областях. Наиболее известным из них является TiNi (никелид титана). Однако данный сплав обладает спорным уровнем коррозионной стойкости и биосовместимости из-за содержания токсичного никеля, трудно обрабатывается и т.д., что ограничивает его применение. Пока уступая в механических характеристиках, по уровню биосовместимости никелид титана обходят безникелевые титановые сплавы памяти, например Ti-Nb-Zr.

Наноструктурирование титановых сплавов должно позволить эффективно регулировать их свойства (изменение гистерезиса, металлоемкости материала и т.д.), приводить к более низкому по сравнению с микроструктурным материалом удельному весу и достаточно высоким параметрам формоизменения при наличии ЭПФ и сверхэластичности, повышать обрабатываемость при производстве изделий.

Целью работы было получение и комплексные исследования структуры титановых сплавов памяти формы, предназначенных для медицинского применения, в виде образцов различной конфигурации от слитков до проволоки диаметром 280 мкм, полученной методом интенсивной пластической деформации, способствующей созданию наноструктур.

Плавка навесок проводилась в электродуговой вакуумной печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом LK8 фирмы LEYBOLD-HERAEUS (Германия). Большие слитки дополнительно подвергали гомогенизирующему отжигу в вакууме 5\*10<sup>-5</sup> мм.рт.ст. при температуре при температуре 850-1000°C в течении 12 ч и охлаждали вместе с печью. Использовалась печь СШВЗ-1.2,5/25-ИЗ. Прокатка происходила на реверсивных станах ДУО-300 и Кварто опытного производства ИМЕТ РАН до сечения ~ 8 мм. Выплавленные слитки деформировали на воздухе до сечения 10x10 мм<sup>2</sup>. Заготовки подогревали на воздухе. Нагрев осуществлялся непосредственно перед деформацией в печи KYLS 20.18.40/10 фирмы HANS BEIMLER. Ротационная ковка заготовок последовательно проводилась на радиальных ковочных машинах В2129.02, В2127.01, В2123.01 (Россия) с последовательной сменой бойков. Конечный диаметр заготовки составлял 1.5 мм. Подогрев заготовок на воздухе непосредственно перед деформацией осуществлялся в печи ПТС-2000-40-1200 (Россия) до 600°C, исходя из предыдущего этапа деформации. С диаметра проволоки 1.5 мм до конечного диаметра волочение производилось на машине С7328/ZF фирмы «THE NORTHWEST MACHINE CO.LTD» (Китай) и на станке UDZGW 100/8 (Германия). Волочение проходило на воздухе. В качестве смазки использовался аквадаг. Отжиг на диаметре 0.7-0.6 мм осуществляли при 600С в течение 20 мин в вакууме.

Морфологию и послойный элементный состав (в т.ч с использованием поперечных шлифов) исследовали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) TESCAN VEGA II SBU, снабженном приставкой для энергодисперсионного анализа INCA Energy, на котором также проводили фрактографические исследования образцов, и электронном Оже-спектрометре JAMP-9500F фирмы JEOL в сочетании с ионным травлением при бомбардировке аргоном под углом 30°. Для определения фазового состава использовали рентгеновский дифрактометр "Ultima IV" фирмы "Ригаку" в  $\text{CuK}\alpha$  – излучении. Фазовый анализ осуществлялся в программном комплексе PDXL с использованием базы данных ICDD. Характерный вид и размер зерен наноструктурированного никелида титана определяли с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) TECNAI 12, позволяющего получать и анализировать микродифракционные картины фазового состава, светлопольные и темнопольные изображения анализируемого участка поверхности. Образцы были подготовлены с помощью установки ионного травления GATAN 691. Для исследования микроструктуры проволок никелида титана проводили предварительное травление поверхности в смеси следующего состава: (1мл HF + 2мл HNO<sub>3</sub> + 47 мл H<sub>2</sub>O) в течение 2–3 минут, по истечении которых образец несколько раз промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе. Исследования проводили на оптическом металлографическом микроскопе Carl Zeiss Axiovert 40 MAT с цифровой обработкой изображения, предназначенном для наблюдения непрозрачных и полупрозрачных объектов.

Отмечено равномерное распределение элементов по объему слитков, а также хорошее совпадение полученных величин концентраций металлов в сплаве с расчетными величинами, ожидаемыми на основании подобранных навесок шихтовых материалов. Не выявлено формирование интерметаллических включений. Слиткам присуща дендритная структура, характерная для сплавов, полученных литьем. Гомогенизирующий отжиг при 900-1000°C способствует значительному растворению дендритов в сплаве и рекристаллизации. Протравливаются границы равноосных, полиэдрических зерен и субзерен. Зерна в исследуемых образцах после пластической деформации имеют ярко выраженную текстуру в направлении прокатки иковки. Прутки имеют слоистую структуру по продольному сечению и радиальную в перпендикулярном сечении. В процессе прокатки зерна сплава последовательно уменьшаются в размерах, что свидетельствует об отсутствии рекристаллизации при 600°C во время предварительного подогрева прутка перед ковкой в сплавах всех составов. Пластическая деформация волочением также проходила с подогревом и отжигом до 600° на воздухе, но границы зерен не протравливаются при микроструктурном анализе, что свидетельствует об отсутствии рекристаллизации.

Отмечается однородное распределение всех элементов в прутках и проволоке. Отмечена высокая шероховатость и неоднородность поверхности проволоки. Однако по химическому составу на глубину более 200 нм наблюдается равномерная оксидная пленка без примесей. После поверхностной механической обработки сглаживаются микродефекты и оксидный слой уменьшается до 50 нм.

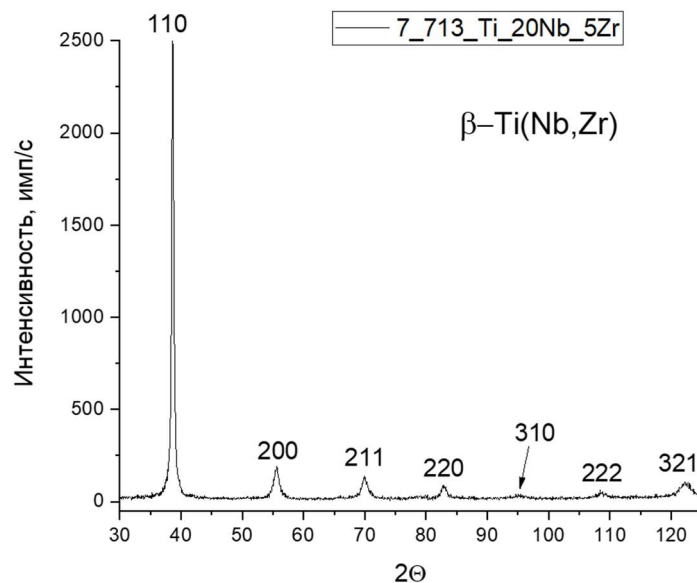


Рисунок 1 – Рентгенограмма образцов проволоки после волочения состава Ti-20Nb-5Zr

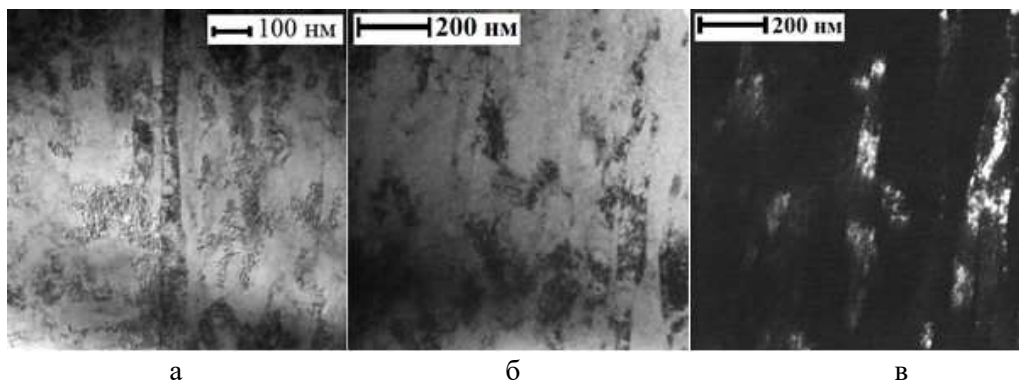


Рисунок 2 – Светлопольное (а, б) и темнопольное (в) изображения ПЭМ деформированных зерен и скоплений дислокаций в составе исходного никелида титана

Все продеформированные образцы были однофазными с кристаллической решеткой типа  $\beta$ -Ti (ОЦК), поликристаллическими, без явно выраженной текстуры, с уширенными рефлексамии без расщепления дублета даже на больших углах (рисунок 1), что свидетельствует о высокой степени внутренних микронапряжений. На светлопольных (рисунок 2а-б) и темнопольных (рисунок 2в) ПЭМ изображениях проволок из никелида титана можно видеть, что зерна сплава представляют нановолокна, имея размер поперечного сечения в пределах 30-70 нм, а продольного – микрометры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 18-79-00128.

*Литература*

1. Гюнтер В.О. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В.О. Гюнтер, В.Н. Ходоренко, Ю.Ф. Ясенчук, Т.Л. Чекалкин. – Томск: Издательство МИЦ, 2006. – 296 с.

2. Duerig T.W. Engineering aspects of shape–memory alloys / T.W. Duerig, K.N. Melton, C.M. Wayman, D. Stockel. – Oxford: Butterworth Heinemann Ltd, 1990. – 491 p.
3. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / В.Э. Гюнтер [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1992. – 742 с.
4. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука [и др.]. – Москва: Metallurgiya, 1990. – 224 с.
5. Севостьянов М. А. Способы улучшения эксплуатационных характеристик сплава TiNi медицинского назначения / М. А. Севостьянов, Е. О. Насакина, А. Г. Колмаков. – Москва: Интерконтакт Наука, 2018. – 196 с.

#### References

1. Gyunter V.O., Khodorenko V.N., Yasenchuk Yu.F., Chekalkin T.L. Nikelid titana. Meditsinskii material novogo pokoleniya. – Tomsk: MITS Press, 2006. – 296 p.
2. Duerig T.W., Melton K.N., Wayman C.M., Stockel D. Engineering aspects of shape–memory alloys. – Oxford: Butterworth Heinemann Ltd, 1990. – 491 p.
3. Gyunter V.E., Itin V.I., Monasevich L.A. et al. Effekty pamyati formy i ikh primenenie v meditsine. – Novosibirsk: Nauka. Siberian branch, 1992. – 742 p.
4. Ootsuka K., Simidzu K., Sudzuki Yu. et al. Splyavy s efektom pamyati formy. – Moscow: Metallurgiya, 1990. – 224 p.
5. Sevostianov M.A., Nasakina E.O., Kolmakov A.G. Sposoby uluchsheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik splava TiNi meditsinskogo naznacheniya. – Moscow: Interkontakt Nauka, 2018. – 196 p.

УДК 539.3

### ИССЛЕДОВАНИЕ НА СЖАТИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

© Л. А. Бохоева<sup>1</sup>, заведующий кафедрой, Е. Б. Бочектуева<sup>2</sup>, доцент  
 Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
 670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415  
 E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>bochektueva.e@yandex.ru

*В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости и процесса разрушения слоистых пластин из композиционного материала. Композиционные материалы изготовлены из разного количества слоев конструкционной стеклоткани, склеенных эпоксидной смолой. Для достоверной оценки несущей способности слоистых пластин используются экспериментальные и численные методы. Отработана методика экспериментального исследования деформационных и прочностных свойств слоистых композиционных материалов с использованием современного испытательного оборудования. Установлено, что расхождение между значениями критической нагрузки четырехслойных образцов и критической нагрузкой трехслойных образцов составляет 2-3%, поэтому для уменьшения веса изделия из композиционных материалов можно изготавливать из трехслойных пластин. В системе ANSYS были смоделированы двухслойные, трехслойные и четырехслойные пластины. Представлены результаты численного расчета методом конечных элементов. Сделано сравнение полученных экспериментальных результатов с численными значениями, оценена возможность использования экспериментальных данных о механическом поведении слоистых композиционных материалов при проектировании и расчетах модулей защитных экранов.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, образцы, испытания, пластины, эксперимент.

## RESEARCH FOR COMPRESSION OF LAMINATED COMPOSITES

L. A. Bokhoeva<sup>1</sup>, head of department, E. B. Bochektueva<sup>2</sup>, assist. prof.  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, 40v, +7(3012)431415  
E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>bochektueva.e@yandex.ru

*This article presents the results of experimental studies of definition the mechanical characteristics of epoxy resin and hardener without adding nanopowder and with the inclusion of nanopowders. The stability and destruction process of laminated plates made of composite material with different numbers of layers without nano-additives and with nanopowders in the binder has been studied. The results of experimental studies of the stability and destruction process of laminated plates made of composite material are presented. Experimental and numerical methods are used to estimate the carrying capacity of laminated plates. A technique has been developed for the experimental study of the deformation and strength properties of composite materials using modern test equipment. It was established that the discrepancies between the values of the critical load of four-layer samples and the critical load of three-layer samples are 2-3%, therefore, to reduce the weight, products from composite materials can be made of three-layer plates. In the ANSYS system, two-layer, three-layer and four-layer plates were modeled. The results of numerical calculation by the finite element method are presented. Comparison of the obtained experimental results with numerical values is made, the possibility of using experimental data on the mechanical behavior of layered composite materials in the design and calculation of protective screen modules is estimated.*

**Keywords:** composite materials, samples, tests, plates, experiment.

### Введение

Проблема засорения околоземного пространства «космическим мусором» возникла, когда космические корабли и станции стали наиболее уязвимой мишенью такого мусора [1]. Защита от него в настоящее время осуществляется путем введения в конструкцию космических объектов модулей специальных защитных экранов. Проектирование, отработка и подтверждение эффективности защитных экранов является задачей актуальной и необходимой. Основные сложности при решении этой задачи обусловлены причинами: жесткие весовые ограничения экранов и высокие скорости при ударе. Ученые ведут работы по созданию методов защиты поверхности космических аппаратов от повреждений [2-6], моделированию условий возникновения подобных чрезвычайных ситуаций на орбите и формированию нового перспективного класса слоистых материалов. Слоистые композиционные материалы (КМ) обладают широким спектром и уникальным сочетанием таких свойств, как высокая прочность, коррозионная стойкость, износостойкость [7-8]. Значимую роль в процессе создания новых материалов играет именно экспериментальное исследование по прочности и устойчивости образцов.

### Экспериментальные работы

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости и процесса разрушения слоистых пластин из композиционного материала с разным количеством слоев. Были изготовлены: 10 образцов из четырех слоев; 10 образцов из трех слоев; 10 образцов из двух слоев. Образцы изготовлены в научно-производственной лаборатории «Надежность, прочность изделий и конструкций» Восточно-Сибирского Государственного университета технологий и управления. Технология изготовления образцов осуществлялась методом кон-

тактного формования путем послойного укладывание в форму, смазанную антиадгезионным покрытием, армирующего материала (стеклоткань Т-10) с одно-временным пропитыванием каждого слоя связующим (эпоксидной смолой с отвердителем). После пропитки осуществляется дополнительная укатка для устранения пузырьков воздуха и равномерного распределения смолы. При этом очень важно осуществить тщательное устранение воздуха, поскольку впоследствии в данные местах возникают межслойные дефекты. Изготовлены партии образцов, состоящие из двух, трех и четырех слоев. После формирования изделие высыхает и подвергается механической обработке. Затем все образцы были пронумерованы, проведены измерения поперечного сечения образцов в рабочей части. Используя микрометр и электронный штангенциркуль, измеряли ширину и толщину в разных сечениях образца. Отклонения по ширине составили  $\pm 0,1$  мм, по толщине  $\pm 0,1$  мм. На рисунке 1 представлено изготовление и подготовка образцов к испытанию.



Рисунок 1 – Изготовление и подготовка образцов к проведению экспериментов

На рисунке 2 представлены фотографии испытательного оборудования для сжатия пластин. Экспериментальные работы проводились на универсальной машине Instron 3367.



Рисунок 2 – Испытательная машина Instron 3367

### Результаты экспериментальных работ

Первая выборка образцов состояла из десяти четырехслойных пластин следующих размеров:  $t = 2$  мм,  $h = 19,6$  мм,  $l = 170$  мм. Пластина устанавливалась в зажимы и задавалась нагрузка со скоростью  $v = 50$  мм/мин, при достижении критической силы (рисунок 3) пластина теряла устойчивость, но продолжала воспринимать нагрузку до разрушения. Определена критическая нагрузка, нагрузка при разрушении образца. Результаты четырехслойных образцов представлены на рисунке 4.



Рисунок 3 – Испытание на сжатие двуслойных пластин

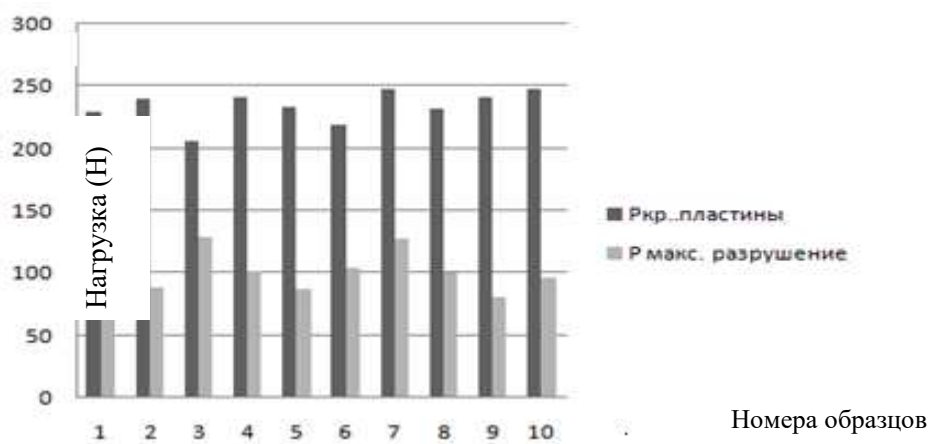


Рисунок 4 – Результаты испытаний на сжатие четырехслойных образцов с номерами 1-10

Вторая выборка состояла из десяти трехслойных пластин (образцы № 11 – № 20) следующих размеров:  $t = 2,5$  мм,  $h = 20$  мм,  $l = 145$  мм. Результаты представлены на рисунках 5, 6.



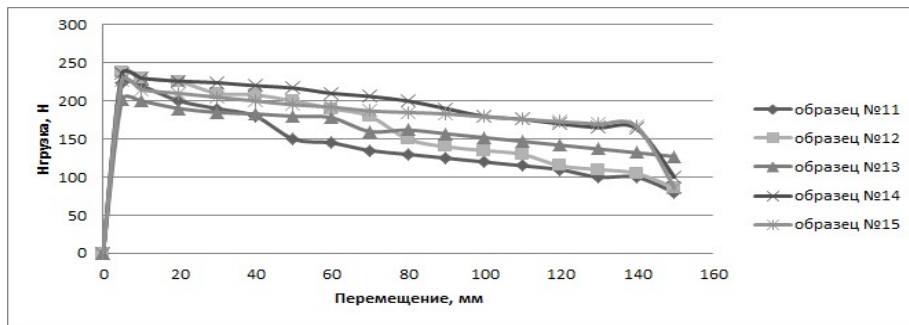


Рисунок 5 – Диаграмма испытания на сжатие трехслойных образцов с номерами 11-15

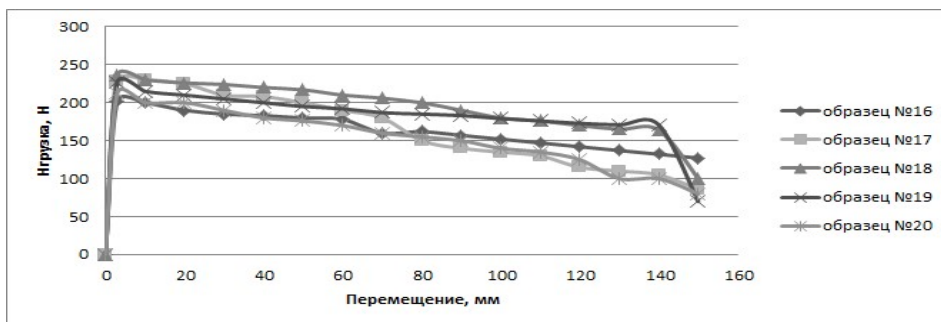


Рисунок 6 – Диаграмма сжатия трехслойных образцов с номерами 16-20

Третья выборка состояла из десяти двухслойных пластин ( $t = 1$  мм,  $h = 20$  мм,  $l = 110$  мм,  $v = 50$  мм/мин), образцы № 26 – № 35 представлены на рисунках 7, 8.

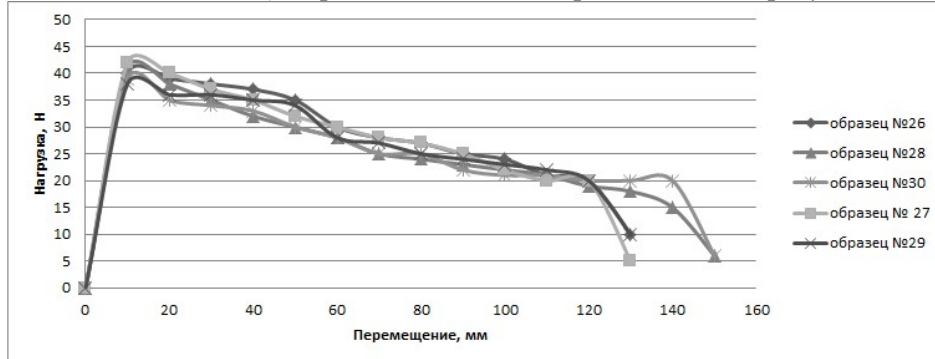


Рисунок 7 – Диаграмма сжатия двухслойных образцов с номерами 26-30

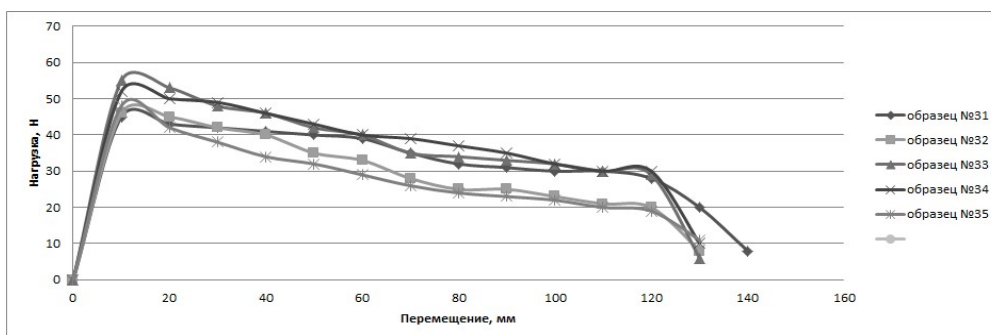


Рисунок 8 – Диаграмма сжатия двухслойных образцов с номерами 31-35

Результаты экспериментов представлены в таблице 1. Критическая нагрузка образца –  $P_{кр.пластины}$ . Нагрузка при разрушении образца –  $P_{кр.разрушения}$ .

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов

Четырехслойные образцы										
№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{кр.пластины}$ , Н	230	240	206	241	234	219	248	232	241	248
$P_{кр.разрушения}$ , Н	82	89	130	102	87	105	128	100	81	97
Трехслойные образцы										
№ образца	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$P_{кр.пластины}$ , Н	223	238	202	236	227	213	216	225	236	241
$P_{кр.разрушения}$ , Н	80	86	127	100	86	102	125	98	78	94
Двухслойные образцы										
№ образца	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
$P_{кр.пластины}$ , Н	40	42	41	38	39	45	46	55	52	48
$P_{кр.разрушения}$ , Н	10	5	6	11	6	8	8	6	10	11

### Выводы

Выполнен комплекс экспериментальных работ с образцами из многослойных КМ и получены следующие результаты:

1. Проведены испытания образцов из КМ, состоящих из четырех, трех и двух слоев. Получены значения критической нагрузки и значение нагрузки при разрушении.

2. Разработана методика изготовления и проведены испытания образцов. Установлено, что расхождения между значениями критической нагрузки четырехслойных образцов и критической нагрузкой трехслойных образцов составляет 2-3 %, поэтому для уменьшения веса изделия из КМ можно изготавливать из трехслойных пластин. Расхождение между значениями критической нагрузки трехслойных образцов и критической нагрузкой двухслойных образцов составляет 19-21 %. Расхождение между значениями экспериментальных и численных данных составляет 7-8 %.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-29-18050\18.

### Литература

1. Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора / В.В. Зеленцов // Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 04. – С. 89-104.

2. *Chernyaev A.* Weight-efficiency of conventional shielding systems in protecting unmanned spacecraft from orbital debris / A. Chernyaev, I. Telichev // *Journal of Spacecraft and Rockets.* – 2017. – Т. 54. – № 1. – С. 75–89.
3. *Christiansen E.L.* Space Shuttle debris and meteoroid impacts / E.L. Christiansen, J.L. Hyde, R.P. Bernhard // *Advances in Space Research.* – 2004. – № 34. – С. 1097-1103.
4. *Hyde J.H.* M/OD Impacts on the Mini Pressurized Logistics Module, Protection of Materials and Structures from the Space Environment / J.H. Hyde, R.P. Bernhard, E.L. Christiansen // *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Space Conference (ICPMSE-7).* – Kluwer Academic Publishers, 2004.
5. *Christiansen E. L.* Handbook for designing protection, NASA/TM-2009-214785 / E. L. Christiansen, J. Arnold, A. Davis. – USA, Texas, Houston: NASA Johnson Space Center, 2009.
6. *Swift H.F.* Hypervelocity Impact Mechanics / H.F. Swift // *Impact Dynamics.* – Wiley & Sons, 1982.
7. *Бохоева Л.А.* Определение критических нагрузок энергетическим методом с учетом деформаций сдвига / Л.А. Бохоева, Т.А. Дамдинов // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.* – 2006. – № 1. – С. 3-7.
8. *Chermoshentseva A.S.* Experimental research of models of thin-walled-compressed rings with defects type of delamination of layered composite materials / A.S. Chermoshentseva, L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov // *Proceedings of 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST).* – 2016. – С. 112-114.

#### References

1. *Zelentsov V.V.* // *Science and Education of the Bauman MSTU.* – 2015. – No. 04. – P. 89-104.
2. *Chernyaev A., Telichev I.* // *Journal of Spacecraft and Rockets.* – 2017. – V. 54. – No. 1. – P. 75–89.
3. *Christiansen E.L., Hyde J.L., Bernhard R.P.* // *Advances in Space Research.* – 2004. – No. 34. – P. 1097-1103.
4. *Hyde J.H., Bernhard R.P., Christiansen E.L.* // *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Space Conference (ICPMSE-7).* – Kluwer Academic Publishers, 2004.
5. *Christiansen E. L., Arnold J., Davis A.* Handbook for designing protection, NASA/TM-2009-214785. – USA, Texas, Houston: NASA Johnson Space Center, 2009.
6. *Swift H.F.* // *Impact Dynamics.* – Wiley & Sons, 1982.
7. *Bokhoeva L.A., Damdinov T.A.* // *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva.* – 2006. – No. 1. – P. 3-7.
8. *Chermoshentseva A.S., Bokhoeva L.A., Rogov V.E.* // *Proceedings of 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST).* – 2016. – P. 112-114.

УДК 621.01

### **ЗОНДИРУЮЩИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩИХ ПЕРЕГОРОДКАХ**

© **В. А. Тарасов<sup>1</sup>, А. Б. Гордеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева  
603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

<sup>2</sup>Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
603107, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 97  
E-mail: g0rd.ab@mail.ru

В статье приведены уравнения движения цилиндрически–симметричных акустических полей. Доказано, что под влиянием вибрационного поля преобразуется фаза огибающей зондирующей волны и ее амплитуда.

**Ключевые слова:** цилиндрические волны, сферические волны, акустические волны, фазовые скорости, зондирование, частота, девиация.

V.A. Tarasov<sup>1</sup>, A.B. Gordeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University  
603950, Russia, Nizhny Novgorod, 24 Minina St.

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Agricultural Academy  
603107, Russia, Nizhny Novgorod, 97 Gagarina Ave.  
e-mail: g0rd.ab@mail.ru

## PROBING AND ACOUSTIC WAVES IN SOUND INSULATING PARTITIONS

The paper presents the equations of motion of cylindrical–symmetric acoustic fields. It is proved that under the influence of the vibration field not only the phase of the envelope of the probing wave changes, but also its amplitude.

**Keywords:** cylindrical waves, spherical waves, acoustic waves, phase velocities, sounding, frequency, deviation.

Было представлено, что действующая на преграду акустическая волна обладает плоским фронтом, и изучалась задача о взаимовлиянии плоских волн и вибрационных полей. Реально произвести плоский фронт создаваемой акустической волны трудно [1–4]. Необходимо узнать: что изменится, если фронт зондирующей волны не является плоским? Фазовые скорости акустических волн в звукопоглощающей перегородке, которая содержит цилиндрические металлические элементы, которые соединяют внешние пластины с внутренней стороной перегородки, различные. Поэтому рассмотрим случай, если цилиндрически – симметричное акустическое поле  $\vec{U}_r(\vec{r}, t)$  и интенсивное вибрационное поле  $\vec{W}_r(\vec{r}, t)$  имеют один центр симметрии.

У цилиндрически – симметричных акустических полей уравнения движения:

$$\rho_0 \ddot{U}_r - (\lambda + 2\mu)(\partial^2 U_r / \partial r^2 + \partial U_r / r \partial r - U_r / r) = Q_1,$$

$$Q_1 = (3b_1 \partial U_r / \partial r + b_2 U_r / r) \partial^2 U_r / \partial r^2 + b_3 [(\partial U_r / \partial r)^2 - U_r / r],$$

где  $\rho$  плотность в деформированном состоянии среды;

$\rho_0$  – плотности в недеформированном состоянии среды,

$b_1, b_2, b_3$  – постоянные коэффициенты.

Это уравнение описывает волновые поля и в жидких средах. Уравнения для сферически симметричных полей:

$$\rho_0 \ddot{U}_r - (\lambda + 2\mu) \partial(\partial U_r / \partial r + 2U_r / r) \partial r = Q_2,$$

$$Q_2 = 2h_1 (\partial U_r / \partial r)^2 / r - 2h_2 U_r^3 + 2h_3 U_r / r (\partial U_r / r \partial r + \partial^2 U_r / \partial r^2) + h_4 \partial U_r \partial^2 U_r / \partial r \partial r^2$$

где  $h_1 \dots h_4$  – постоянные коэффициенты. Принимая правильными условия, решение уравнения выглядит так:

$$U_r = \partial \left[ U_0(\vec{r}, t) \cdot H_0^{(1)}(k, \vec{r}) e^{i\omega t} \right] / \partial r + kc + W(\vec{r}, t),$$

где  $H_0^{(1)}(k, \vec{r})$  – функция Ханкеля нулевого порядка первого рода.

Решение подставляем в уравнение движения, выраженное в цилиндрических координатах. Не учитывая слагаемые малого порядка и выразив члены уравнения по первой гармонике, найдем укороченное уравнение относительно амплитуды  $a(\vec{r}, t)$  и фазы  $\phi(\vec{r}, t)$ :

$$\partial a / \partial t + c(\partial a / \partial r + a / r) = f_1 \cdot (\partial W_r / \partial r) \cdot a; \quad \partial \phi / \partial t + c \partial \phi / \partial r = f_2 \cdot r \cdot W_r,$$

где  $a = \sqrt{\text{Re}^2 U_0(x_1, t) + \text{Im}^2 U_0(x_1, t)}$ ;

$\phi = \text{arctg}(\text{Im} U_0(x_1, t) / \text{Re} U_0(x_1, t))$ ;

$f_1, f_2$  – постоянные коэффициенты.

Понятно, что под действием вибрационного поля изменяется и фаза огибающей зондирующей волны, и ее амплитуда.

Если сферически-симметричные поля, то [3, 4]:

$$U_r = -\frac{1}{r^2} (ikr + 1) U_0(r, t) \cdot e^{[i(\omega t - kr)]} + kc + W_r(r, t).$$

В итоге, по представленной ранее технологии вывода линеаризованных уравнений относительно действительной амплитуды и фазы зондирующей волны, получим:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + c \left( \frac{\partial a}{\partial r} + \frac{2a}{r} \right) = \frac{ra}{l_1 r^2 - 1} \cdot \left( a \frac{\partial W}{\partial r} + l_2 \frac{W_r}{r} \right);$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{[(1 - l_3 r^2) \frac{\partial W_r}{\partial r} + \left( \frac{1}{r} + l_4 r \right) W_r]}{2\omega \rho_0 (k^2 r^2 - 1)},$$

где  $l_1 \dots l_4$  – постоянные коэффициенты. Уравнения подтверждают, если неплоский фронт зондирующего акустического сигнала, то, в результате взаимодействия с интенсивным вибрационным полем  $\vec{W}(\vec{r}, t)$  исследуемого объекта, акустическая волна изменяется и по фазе, и по амплитуде.

Итог: при реальном взаимодействии зондирующего поля с проверяемым объектом нужно моделировать тот тип акустического поля, который принимался при теоретическом рассмотрении. Иной вид акустического поля дает различную

функциональную зависимость между параметрами вибрационного поля и характеристиками акустического сигнала и, в итоге, к различным законам модуляции отраженного и прошедшего через звукопоглощающее покрытие, сигнала не только по фазе, но и по амплитуде.

#### *Литература*

1. *Никифоров А.С.* Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах / А.С. Никифоров, С.В. Будрин. – Ленинград: Судостроение, 1986. – 216 с.
2. *Бохоева Л.А.* Стендовые испытания с использованием компьютерных технологий образцов авиационных конструкций / Л.А. Бохоева, В.Е. Рогов // *Механика конструкций и материалов (композиционные материалы и наноматериалы): доклады научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГУТУ.* – 2017. – С. 19-29.
3. *Сухоруков В.И.* Эффект Доплера при движении источника и приемника волн в произвольном направлении / В.И. Сухоруков, Г.И. Сухоруков // *Акустический журнал.* – 1986. – Т. 32. – № 6. – С. 134-136.
4. *Седов М.С.* Звукоизоляция облегченных ограждающих конструкций зданий: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.00.00 / М.С. Седов. – Горький, 1971. – 367 с.

#### *References*

1. *Nikiforov A.S., Budrin S.V.* Rasprostranenie i pogloshchenie zvukovoi vibratsii na sudakh. – Leningrad: Sudostroenie, 1986. – 216 p.
2. *Bokhoeva L.A., Rogov V.E.* // *Mekhanika konstruksii i materialov (kompozitsionnye materialy i nanomaterialy): proceedings of scientific-practical conference of lecturers, researchers and graduate students of the ESSUTM.* – 2017. – P. 19-29.
3. *Sukhorukov V.I., Sukhorukov G.I.* // *Akusticheskij Zhurnal.* – 1986. – V. 32. – No. 6. – P. 134-136.
4. *Sedov M.S.* Zvukoizolyatsiya oblegchyonykh ograzhdayushchikh konstruksii zdanii: thesis for the degree of doctor of technical sciences: 05.00.00. – Gorky, 1971. – 367 p.

УДК 669.24:548.5:004.9

### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОЧАСТИЦ Cu-Au ПРИ СИНТЕЗЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ**

**© Е. А. Горошко, Ю. Я. Гафнер, С. Л. Гафнер**

Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова

655017, Россия, г. Абакан, ул. Ленина, 90

E-mail: eliz\_gor@mail.ru

*Методом компьютерного моделирования с использованием потенциала сильной связи был исследован синтез наночастиц Cu-Au при конденсации из высокотемпературной газовой фазы. Выбранный набор параметров был подобран таким образом, чтобы так можно более точно имитировать условия конденсации в инертном газе. Начальная конфигурация содержала суммарно 91124 атомов Cu и Au хаотично распределенных в пространстве. Моделировались химические композиции  $Cu_3Au$ , Cu-Au,  $Cu_{90}Au_{10}$  и  $Cu_{60}Au_{40}$ , которые в процессе конденсации охлаждались от начальной температуры  $T = 1000\text{ K}$  до конечной  $T = 77\text{ K}$  с использованием скорости охлаждения  $U = 1 \cdot 10^{10}\text{ K/s}$ . После анализа внешнего вида и строения наночастиц Cu-Au разной химической композиции*

было отмечено то, что большое количество бинарных наночастиц обладало явно выраженным икосаэдрической структурой.

**Ключевые слова:** нанотехнологии, нанопорошки, компьютерное моделирование, сильная связь, наночастицы, медь, золото.

## FORMATION OF THE STRUCTURE OF NANOPARTICLES Cu-Au WITH SYNTHESIS FROM GAS PHASE

**E. A. Goroshko, Yu. Ya. Gafner, S. L. Gafner**

N.F. Katanov Khakas State University  
655017, Russia, Abakan, Lenin str., 90  
E-mail: eliz\_gor@mail.ru

*The method of computer simulation using the tight-binding potential was used to study the synthesis of Cu-Au nanoparticles during condensation from the high-temperature gas phase. The selected set of parameters was chosen in such a way as to more accurately simulate the conditions of condensation in an inert gas. The initial configuration contained a total of 91,124 Cu and Au atoms randomly distributed in space. The chemical compositions of  $Cu_3Au$ , Cu-Au,  $Cu_{90}Au_{10}$  and  $Cu_{60}Au_{40}$  were simulated, which were cooled from the initial temperature  $T = 1000$  K to the final  $T = 77$  K using the cooling rate  $U = 1 \cdot 10^{10}$  K / s. After analyzing the appearance and structure of the Cu-Au nanoparticles of different chemical compositions, it was noted that a large number of binary nanoparticles had a pronounced icosahedral structure.*

**Keywords:** nanotechnology, nanopowders, computer simulation, tight-binding, nanoparticles, copper, gold.

### Введение

Из-за хороших перспектив использования металлических сплавов нанометрового размера в нанoeлектронике, катализе, оптике, сенсорных устройствах, биомедицине и т. д. исследование таких соединений привлекает все большее внимание. Однако оказалось, что физико-химические свойства бинарных наночастиц имеют намного более сложный характер поведения, по отношению к составляющим их металлам. И именно различный химический состав наночастиц часто является ключом к пониманию таких свойств.

Однако при экспериментальном анализе наночастиц сложного химического состава имеется немало трудностей. Во-первых: процесс синтеза частиц должны обладать четкой повторяемостью, а определение реальной электронной структуры соединения возможно лишь косвенными экспериментальными методами. Во-вторых: электронная структура поверхности, определяющая все основные каталитические свойства частиц наносплава, сильно зависит от геометрического характера расположения атомов, что свидетельствует о важности применения правильной структурной модели наночастиц.

Известно, что при высокой температуре в макроскопических образцах золото и медь смешиваются в любой пропорции. При низких температурах сплавы Cu-Au образуют тетрагональную сверхструктуру  $L1_0$  для стехиометрии CuAu и кубическую сверхструктуру  $L1_2$  для стехиометрии  $CuAu_3$  и  $Cu_3Au$ . Однако на наноразмере знание полной фазовой диаграммы сплавов Cu-Au все еще отсутствует.

Несмотря на такой значительный пробел в теории, в последние годы экспериментально был успешно реализован широкий спектр методов синтеза наночастиц Cu-Au различной формы и состава. Так в [1] частицы  $Cu_3Au$  были получены химическим путем, и отдельные нанокластеры затем были исследованы элект-

тронным микроскопом высокого разрешения. Вначале частицы наносплава Cu-Au не имели четко определяемой внешней формы, варьируемой от сферической к эллиптической. После облучения частиц потоком электронов в течение 2 минут их форма начала меняться и примерно через 15 минут частицы сформировали новый внешний вид (рисунок 1). Структура частиц с  $D = 2.0 - 20.0$  нм была определена как ГЦК. В конечном итоге в [2] экспериментально было показано, что в ходе химического синтеза предпочтительное внутреннее упорядочение и состав наночастиц сплава Cu-Au даже при комнатной температуре является очень сложным процессом и зависит от размера частиц и свойств окружающей среды.

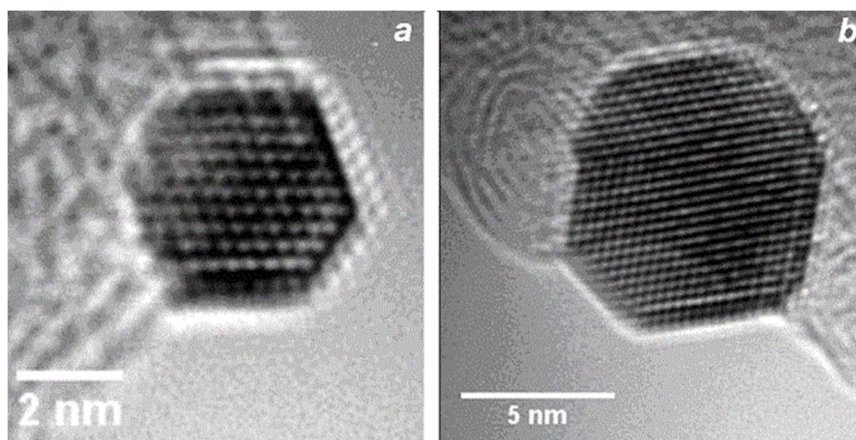


Рисунок 1 – ТЭМ изображения наночастиц Cu-Au, полученных химическим путем, после облучения электронами. По данным [1]

Таким образом, во всех проведенных экспериментах наблюдалось самое различное строение Cu-Au наночастиц без четкого понимания того, какая именно структура может сформироваться в результате того или иного метода синтеза. В представленной работе мы сконцентрируемся на выяснении методами компьютерного моделирования вопроса взаимозависимости процессов атомного упорядочения и геометрии частиц при синтезе из газовой среды.

#### **Компьютерная модель**

Выбранный нами набор параметров был подобран таким образом, чтобы так можно более точно имитировать условия конденсации в инертном газе (*IGC – inert gas condensation*). В таких установках сверхнасыщенный металлический пар образуется методом термического испарения, что ведет к высокой начальной плотности металлического пара, который далее перемещается в окружающую инертную атмосферу. Модельная система имела форму куба с длиной грани в 1350 Боровских радиуса и содержала суммарно 901124 атомов меди и золота, равномерно распределенных в пространстве, с начальной температурой  $T_i = 1000$  К. Среднее расстояние между атомами на этом этапе составляло  $30 \cdot a_B$ , где  $a_B$  – радиус Бора.

В связи с большим количеством атомов в исследуемой системе, было принято решение моделировать конденсацию кластеров не в среде реального инертного газа, а в среде газа из виртуальных частиц, имеющих постоянную температуру и



создаваемых термостатом Андерсена [3]. Данный термостат позволяет проводить охлаждение с некоторой фиксированной скоростью, посредством постепенного удаления избыточной энергии из имитируемой области. Поиск решения для системы уравнений движения частиц в системе осуществлялся с использованием схемы Верле в её «скоростной форме» [3] с постоянным шагом по времени ( $h = 1$  фс). Моделирование конденсации атомов меди и золота из газовой фазы проводилось методом молекулярной динамики с использованием скорости охлаждения  $U = 1 \cdot 10^{10}$  К/с до конечной температуры  $T = 77$  К (охлаждение жидким азотом).

При моделировании таким методом необходимо как можно точнее определить энергию взаимодействия между атомами и термодинамические условия в системе. В нашей работе использовался многочастичный потенциал сильной связи Клери (*Cleri*) и Розато (*Rosato*) [4], основанный на приближении вторых моментов гамильтонианов сильной связи (TB-SMA).

Для анализа происходящих процессов были выбраны четыре возможные химические композиции  $\text{Cu}_3\text{Au}$ ,  $\text{CuAu}$ ,  $\text{Cu}_{90}\text{Au}_{10}$ ,  $\text{Cu}_{60}\text{Au}_{40}$ . Были проанализированы распределения наночастиц Cu-Au по размеру и их форма после достижения ими конечной температуры  $T = 77$  К и на промежуточных стадиях. Атомы меди и атомы золота в моделируемом пространстве были распределены хаотично, кроме этого высокая начальная температура полностью исключала возможность формирования кластеров только одного из химических элементов. Таким образом, единственным фактором, влияющим на процессы синтеза бинарных наночастиц CuAu при условии свободной конденсации из газовой среды, был только разный химический состав начального газа из атомов металлов.

### Результаты и обсуждение

В зависимости от плотности пара и температуры окружающего пространства возможны различные механизмы роста кластеров. При малой степени перенасыщения в метастабильной газовой фазе образование кластера начинается с гомогенной нуклеации. Это означает случайный процесс образования малого кластера критического размера (зародыша). В области перенасыщенного пара возможны колебания плотности в достаточно широких пределах, что и приводит к формированию зародышей, которые могут либо продолжить свой рост до уже стабильной частицы в жидком состоянии, либо вновь испариться в газовую фазу.

После завершения процессов нуклеации возможны различные механизмы дальнейшего роста кластеров. При поверхностном росте единичные атомы газовой фазы присоединяются к поверхности кластера, вызывая его постепенный рост. Также возможны столкновения отдельных кластеров между собой по сценарию агломерации или коалесценции. При агломерации кластеры слипаются друг с другом практически без изменения своей формы. При коалесценции кластеры сплавляются друг с другом и образуют единую частицу с формой отличной от той, что была у первичных кластеров до столкновения. В дальнейшем полученные частицы могут изменить свою форму в результате изменения положения отдельных атомов.

Конечная структура частиц зависит от вклада всех этих различных механизмов. Понимание особенностей роста наночастиц может помочь при производстве кластеров с фиксированными заранее размером, формой и структурой и, следовательно, фиксированными физическими и химическими свойствами. Рассмотрим эти процессы на примере бинарных наночастиц Cu-Au.

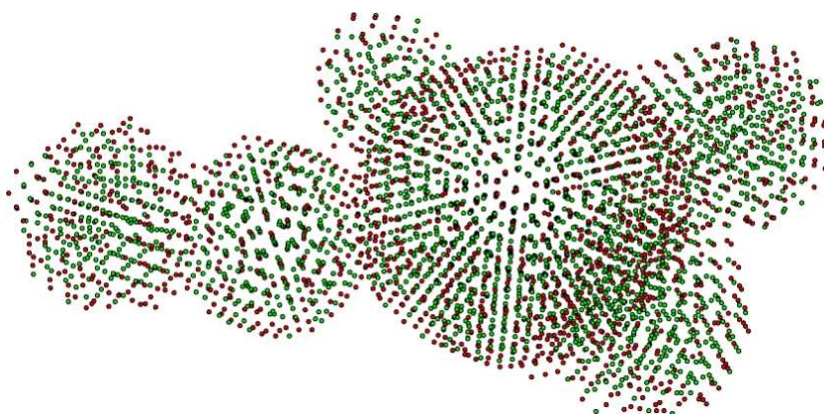


Рисунок 2 – Изображения наночастицы  $\text{Cu}_{60}\text{Au}_{40}$ , полученной при МД моделировании

После анализа внешнего вида и строения наночастиц Cu-Au разной химической композиции, стала заметна следующая особенность: большое количество бинарных наночастиц обладало явно выраженным икосаэдрическим строением (рисунок 2). Такой вид строения позволяет минимизировать поверхностную энергию наночастицы и с этой точки зрения он является энергетически выгодным. Однако для того, чтобы его сформировать, необходима достаточно большая вероятность диффузии атомов в пределах объема наночастицы. Внешний вид частицы на рисунке 2 указывает на то, что ее формирование происходило при низких температурах. Это предположение подтверждается тем, что при таких температурах процессы коалесценции (сплавления) кластеров между собой практически завершаются из-за отсутствия необходимой для этого высокого значения кинетической энергии и начинают превалировать процессы агломерации, или простого слипания частиц между собой, что и видно на рисунке 2. Поэтому образование икосаэдрического строения имело другую природу. На наш взгляд, причиной явились разные размеры атомов золота и меди. Атомы золота, вследствие большего размера, встраиваясь в медную решетку, невольно ее разрыхляют. Из-за этого атомы меди получают возможность более легкого перемещения, что и дает возможность образования икосаэдрического построения атомов. Таким образом, синтез бинарных частиц Cu-Au способствует формированию частиц икосаэдрического строения.

#### **Заключение**

В данной работе методом компьютерного моделирования исследовался процесс образования бинарных наночастиц Cu-Au из газовой фазы. При этом наблюдалась конденсация жидких капель из горячего газа высокой плотности, которые затем кристаллизировались в первичные частицы нанометрового размера и далее объединялись между собой в более крупные формирования. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что, несмотря на различное внутреннее строение первичных частиц при их агломерации в наночастицы сравнительно большого размера происходит упорядочение структуры в пределах значительного объема кластера. Такое упорядочение может быть как следствием высокой температуры окружающей среды, так и высово-

бождением энергии связи частиц происходящим при процессе агломерации, что приводит к существенному локальному повышению температуры, значительно усиливающему процессы перестройки внутренней структуры кластера, а также разные размеры атомов золота и меди.

Представленная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, номера грантов 18-42-190001 и 19-48-190002.

#### *Литература*

1. Truncated-octahedral copper-gold nanoparticles / D.T. Tran [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – № 241. – С. 012086.
2. Artrith N. Grand canonical molecular dynamics simulations of Cu-Au nanoalloys in thermal equilibrium using reactive ANN potentials / N. Artrith, A.M. Kolpak // Computational Materials Science. – 2015. – № 110. – С. 20-28.
3. Pang T. An introduction to computational physics / T. Pang. – Cambridge: University Press, 2006. – 385 с.
4. Cleri F. Tight-binding potentials for transition metals and alloys / F. Cleri, V. Rosato // Phys. Rev.B. – 1993. – № 48. – С. 22-33.

#### *References*

1. Tran D.T., Jones I.P., Johnston R.L., Preece J.A., van den Brom C.R. // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – No. 241. – P. 012086.
2. Artrith N., Kolpak A.M. // Computational Materials Science. – 2015. – No. 110. – P. 20-28.
3. Pang T. An introduction to computational physics. – Cambridge: University Press, 2006. – 385 p.
4. Cleri F., Rosato V. // Phys. Rev.B. – 1993. – No. 48. – P. 22-33.

УДК 624.011

### **СОЕДИНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХСЯ НАГЕЛЕЙ. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ**

© **Н. А. Кулинич, А. Г. Черных**, д-р техн. наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
190005, Россия, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4  
E-mail: kulinich.natasha@gmail.com

*Повышение требований к клееным деревянным конструкциям приводит к поиску альтернативных соединений с высокими показателями прочности соединений. В данной статье изучается работа соединения с использованием перфорированных стальных пластин и выявляются факторы, влияющие на несущую способность, которые необходимы для дальнейшего исследования. Расчеты исследуемых соединений не рассматриваются в российских нормативных документах.*

**Ключевые слова:** самонарезающиеся нагели, стандартный Еврокод 05, SFS-нагели, LVL, оптимизация узлов деревянных конструкций.

## WOODEN STRUCTURES CONNECTIONS WITH SELF-DRILLING STEEL DOWELS. CARRYING CAPACITY FACTORS

N. A. Kulinich, A. G. Chernykh, Ph. D., Prof.  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya, 190005, Saint-Petersburg, Russia  
E-mail: kulinich.natasha@gmail.com

*Increasing requirements for glued wooden structures leads to the search for alternative joints with high strength properties of joints. This article examines the work of the connection using perforated steel plates and identifies factors affecting the carrying capacity that are necessary for further research. Calculations of the studied compounds are not considered in the Russian regulatory documents.*

**Keywords:** self-drilling steel dowels, standard Eurocode 05, SFS-dowels, LVL, wooden structures optimization.

Конструкции из дерева являются легкими, стойкими к химическим воздействиям, ими можно перекрывать большие пролеты. Развитие деревянных соединений конструкций – поиск новых, более прочных, устойчивых к воздействию огня, соединений конструкций – является актуальной задачей в деревянном строительстве.

Соединения являются наиболее ответственными деталями деревянных конструкций – разрушение начинается в большинстве случаев в них.

Одной из важных задач совершенствования технологии строительства является уменьшение трудоемкости монтажных стыков. Для решения задачи необходимо выполнение следующих требований: уменьшение количества крепежей за счет увеличения их несущей способности, внедрение в массив без какой-либо дополнительной рассверловки, возможность применения скоростных способов забивки. Известно, что деревянные соединения с использованием металлических пластин увеличивают несущую способность конструкции.

В статье исследуются многосрезное нагельное соединение с перфорированными стальными пластинами (далее – НСПП) с использованием самонарезающихся нагелей.

**Целью работы** является изучение работы соединений НСПП, выявления факторов, влияющих на несущую способность соединения.

### *Общие данные*

Повышение требований к клееным деревянным конструкциям приводит к поиску альтернативных соединений с высокими показателями прочности соединений.

*Актуальностью* работы является отсутствие расчета рассматриваемых соединений в российских нормативных документах.

Область применения НСПП – конструкции клееных ферм и рам в архитектурных формах.

Механическое соединение такого типа допускают определенное начальное смещение между соединяемыми элементами, которое влияет на несущую способность соединения. Размер этого смещения частично зависит от начальных зазоров, которые существуют между нагелем и отверстиями в древесине в местах их совместной работы. В соединении НСПП начальные смещения устранены путем самозасверливания нагелей [1].

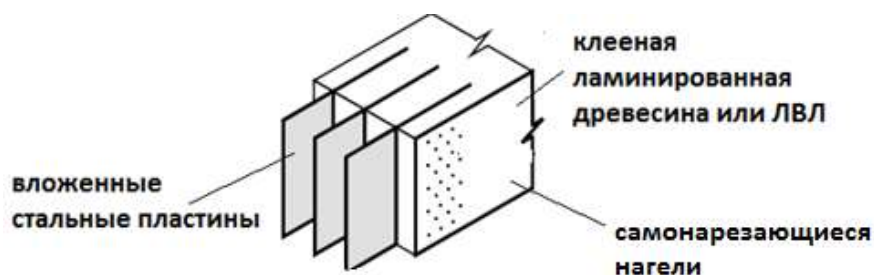


Рисунок 1 – Схема соединения нагелей и стальной пластины

Преимущества данного типа соединений:

- Высокая жесткость соединения

Добавим, что при достаточно маленьких диаметрах и при быстром устройстве соединения без предварительного просверливания, происходит хорошее взаимное сцепление элементов со стальными пластинами (одной и больше) из стали марки S235, St37, Fe360 с максимальной толщиной 10 мм (одна пластина) или 5 мм (2 или 3 пластины).

- Хорошая огнестойкость, достигаемая благодаря тому, что нагели утопляются в древесину, огнестойкость соединения увеличивается.

Недостатками данного типа соединений являются:

- Сложность производства

Чтобы облегчить производство крупных ферменных конструкций с большим количеством нагелей разработан пневматический прошивочный пресс. Он оснащен мощным двигателем, направляющим штифтом и регулятором глубины [1]. Нагели устанавливаются сквозь деревянную конструкцию и стальную пластину за один рабочий этап, ошибок допущения не возникает даже в условиях строительной площадки.

Высокопрочные нагели в отличие от стандартных позволяют использовать меньшее количество крепежных элементов для одинаковой несущей нагрузки, снижаются затраты на обработку древесины и просверливание [2], кроме того, минимизируются размеры соединений и элементов. Высокопрочные нагели не только имеют высокий предел текучести материала нагеля, но также и высокую пластическую деформационную способность. Благодаря данным характеристикам соединение разрушается пластично [3].

Необходимо, чтобы соединение разрушалось с изгибом нагелей пластично. При жестком нагеле может произойти раскалывание древесины между гнездами.

Разрушения от скола древесины происходят при малых деформациях, т.к. нагель работает не полностью, а несущая способность древесины при скалывании мала. Также происходит и при слишком малом шаге между нагельными и длины заделки нагеля.

#### *Модели разрушения*

Несущая способность крепежных элементов может быть описана так называемой Европейской моделью предельных состояний (EYM), впервые опубликованной Йохансеном [2].

Согласно модели, предел прочности соединений нагельного типа определяется из условия потери несущей способности элементов соединения или формирования пластического шарнира в крепеже. Тип модели разрушения определяется в

зависимости от *геометрии соединения* и показателей используемых материалов, таких, как *изгибающий момент в крепеже* и *прочность на смятие древесины нагельного гнезда*.

Изначально, согласно теории ЕУМ, принимался упругий изгибающий момент поперечного сечения нагеля, при этом игнорировалась возможность увеличения данной характеристики за счет пластических деформаций, которые допускались только для древесины. Расчетные зависимости в Eurocode 5, основанные на жесткопластическом поведении древесины при смятии в отверстии и нагеля при изгибе (рисунок 2), учитывают возможность образования пластического изгибающего момента в нагеле.

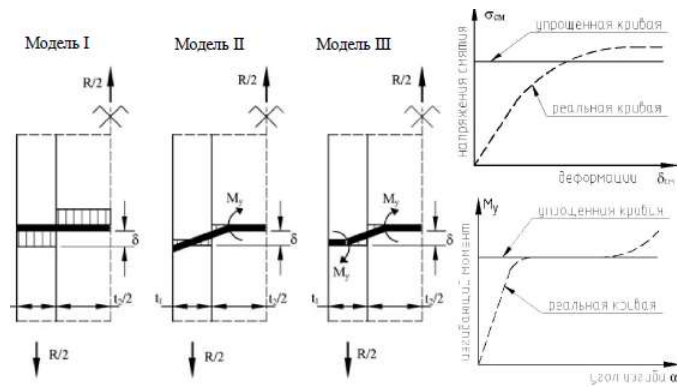


Рисунок 2 – Предельные модели работы односрезного нагельного соединения и идеализированные кривые деформирования древесины и нагеля

Пример предельных моделей работы для симметричного односрезного соединения приведен на рисунке 3. Согласно модели № 1, разрушение соединения наступает от смятия среднего или крайнего деревянного элемента. В моделях № 2 и № 3 разрушение соединения происходит от изгиба нагеля с образованием по его длине одного или двух пластических шарниров.

Для оптимальной работы необходимо, чтобы нагрузка распределялась равномерно.

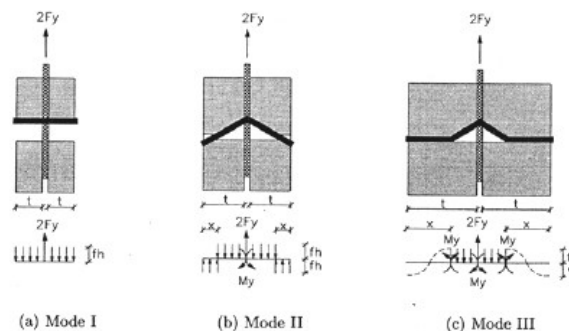
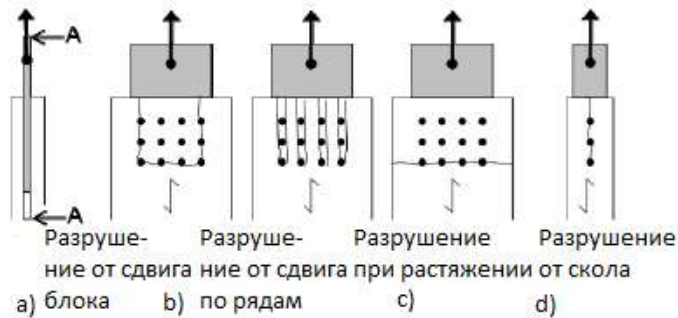


Рисунок 3 – Виды разрушения нагелей в соединениях

Проанализированы различные случаи разрушения соединений НСПП, нагруженные параллельно волокнам в статье [4].



а) разрушение от сдвига блоком; б) разрушения от сдвига по рядам; в) разрушение при растяжении; г) разрушение от скола

Рисунок 4

*Расчет соединений*

Согласно [3, 5] уравнения для расчета соединения следующие:

$$F_y = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_h \cdot t \cdot d, & \text{модель 1} \\ f_h \cdot t \cdot d \cdot \left( \sqrt{2 + \frac{4M}{f_h \cdot t^2 \cdot d}} - 1 \right), & \text{модель 2} \\ 2,3 \sqrt{d \cdot f_h \cdot M_y} & \text{модель 3} \end{array} \right.$$

где  $f_h$  – нормативное сопротивление анкеровки;  
 $M_y$  – нормативный момент пластической деформации нагеля;  
 $d$  – диаметр нагеля;  
 $t$  – толщина пластины;  
 $F_y$  – расчетная величина усилия в направлении  $Y$ .

Согласно Eurocode 5 (2004), принимается следующая схема расстановки нагелей для односрезного соединения.



Рисунок 5 – Схема расстановки нагелей

*Результаты проведенных ранее экспериментов*

Результаты экспериментов доказывают, что с увеличением расстояния между нагелями вдоль приложения нагрузки увеличивается и несущая способность соединения, кроме того, уменьшается вероятность хрупкого разрушения [3].

Было также доказано, что с увеличением числа рядов не происходит существенного увеличения несущей способности соединения [1].

Таким образом, к факторам, влияющим на несущую нагрузку соединения, относятся: расстояние между рядами нагелей, расстояние между нагельными вдоль приложения нагрузки, длина защемления конца нагеля, материал древесины, материал нагеля, температурно-влажностный режим, точность измерений.

#### *Выводы*

Было изучена работа нагельного соединения с перфорированными пластинами.

Выявлены факторы, влияющие на несущую способность соединения, что является необходимыми данными для следующего этапа исследования – проведения эксперимента.

#### *Литература*

1. *Mischler A.* Multiple Shear Steel-to-Timber Connections with Self-Drilling Dowels / A. Mischler // IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering. – 2001. – Т. 85. – № 2. – С. 49-54.
2. Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels / A. Misconel [и др.] – 2016.
3. *Sjödin J.* Steel-to-timber dowel joints: Influence of moisture induced stresses : диссертация на соискание ученой степени доктора / J. Sjödin. – Institutionen för teknik och design, 2006.
4. Dowel type connections with slotted-in steel plates / M.B. Pedersen [и др.] // CIB-W18 Timber Structures. – Universität Karlsruhe, 1999. – С. 1-17.
5. EN 1995-1-1:2004 (E) Eurocode 5 Design of timber structures.

#### *References*

1. *A. Mischler* // IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering. – 2001. – V. 85. – No. 2. – P. 49-54.
2. *A. Misconel [et al.]*. Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels. – 2016.
3. *Sjödin J.* Steel-to-timber dowel joints: influence of moisture induced stresses : doctor thesis. – Institutionen för teknik och design, 2006.
4. *M.B. Pedersen [et al.]* // CIB-W18 Timber Structures. – Universität Karlsruhe, 1999. – P. 1-17.
5. EN 1995-1-1:2004 (E) Eurocode 5 Design of timber structures

УДК 678

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОГО ЛЮКА В ГРУЗОВОЙ СТВОРКЕ ВЕРТОЛЕТА МИ-171**

© **В. Ю. Курохтин**, старший преподаватель

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*Данная статья посвящена разработке конструкции и технологии изготовления увеличенного аварийного люка из полимерных композиционных материалов в правой грузовой створке вертолета Ми-171. Описана предполагаемая конструкция предлагаемого взамен люка из композиционных материалов, в том числе его отдельных элементов:*



замка, обеспечивающего крепление люка на створке; ручки для открывания и закрывания люка. Внутренние полости люка предполагается заполнять пенополиуретаном для повышения его жесткости, для чего предусматриваются отверстия по периметру люка. Описана укрупненная технология изготовления люка. Показаны схемы сборочной оснастки, которую предполагается использовать при сборке люка: оснастка для выкладки внутренней, внешней обшивок и их соединения между собой.

**Ключевые слова:** грузовая створка, люк, композиционный материал, вертолет, технология, оснастка.

## MODELING A COMPOSITE HATCH IN THE CARGO DOOR OF THE MI-171 HELICOPTER

V. Yu. Kurokhtin, senior lecturer

East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*This article is devoted to the development of the design and manufacturing technology of an enlarged emergency hatch made of polymer composite materials in the right cargo door of the Mi-171 helicopter. The proposed design of the hatch made from composite materials, including its individual elements, is described: a lock that secures the hatch to the door; a handle for opening and closing the hatch. The internal cavity of the hatch is supposed to be filled with polyurethane foam to increase its rigidity, for which holes are provided around the perimeter of the hatch. The enlarged manufacturing technology of the hatch is described. Schemes of assembly equipment that are supposed to be used when assembling the hatch are shown: equipment for laying out internal and external skins and for their connecting to each other.*

**Keywords:** cargo door, hatch, composite material, helicopter, technology, equipment.

Полимерные композиты находят широкое применение в конструкции современных летательных аппаратов [1], поскольку они позволяют сократить число сборочных единиц, разъемов, добиться более гладких поверхностей. Кроме того, использование композитов кратно повышает прочность и жесткость конструкций по сравнению с металлами.

В статье рассмотрена проблема моделирования и изготовления аварийного композитного люка увеличенных габаритов, расположенного в правой задней грузовой створке фюзеляжа Ми-171.

Грузовые створки находятся в задней части фюзеляжа и предназначены для загрузки и разгрузки вертолета. Каждая створка состоит из обшивки и набора жесткостей (рисунок 1), изготавливаемых штамповкой из алюминиевых сплавов и собираемых клепкой [2]. Створки воспринимают нагрузки как изнутри фюзеляжа (вес перевозимых грузов и/или пассажиров), так и снаружи (аэродинамические нагрузки при полете), что определяет высокие требования к их прочности и жесткости.

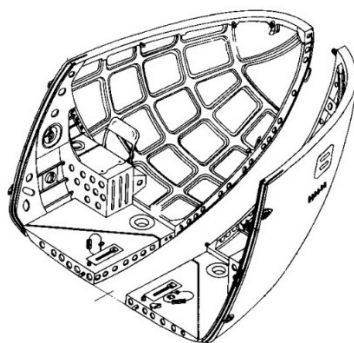


Рисунок 1

Аварийный люк предназначен для эвакуации пассажиров и размещается в правой створке. К его недостаткам относятся значительная масса, трудоемкий процесс сборки, малые размеры [3]. Поэтому необходимо уменьшить вес люка (заменой его материала на композиционный) и одновременно увеличить его размеры.

Предлагаемый взамен существующего люк конструктивно предполагается состоящим из двух скрепленных по контуру обшивок, дополнительно соединенных поперечными стрингерами; внутреннее пространство между обшивками и стрингерами заполняется пенополиуретаном для повышения жесткости (рисунок 2). Длина люка будет увеличена в 1,5 раза.

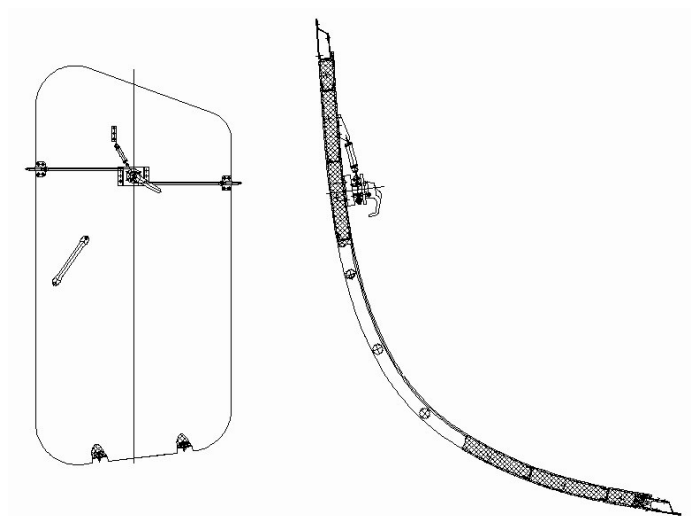


Рисунок 2

На люке устанавливается замок для крепления к створке. Так как замок состоит из металлических деталей, а композиты могут быстро разрушиться от внедрения в них металлических крепежных изделий, то замок предполагается крепить на кронштейне, который привинчивается к резиновым прокладкам, клеящимся к композитной обшивке (рисунок 3). Тяги, входящие в конструкцию замка, крепятся на кронштейнах; крепление самих кронштейнов осуществляется на металлических пластинах, в которых имеются резьбовые отверстия под винты.

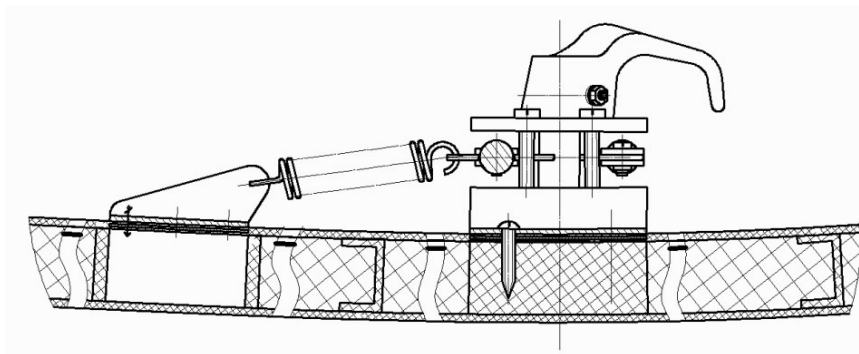


Рисунок 3

Ручка для открывания и закрывания люка также крепится на металлических пластинах. В нижней части люка будут установлены штыри, дополнительно обеспечивающие крепление люка за счет их вставки в ответные узлы на створке. Эти штыри имеют конец с винтовой резьбой, ввинчивающийся в резиновую прокладку, приклеивающуюся в этом месте к обшивке (рисунок 4). Герметизация проема будет обеспечиваться за счет нанесения специального герметика по контуру люка для обеспечения его плотного прилегания к контуру проема в створке.

По бокам люка расположены отверстия для заливки пенополиуретана, в которые вставляются втулки.

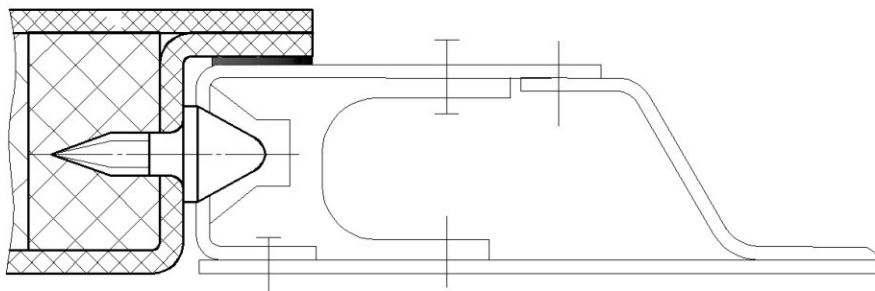


Рисунок 4

Обшивки люка предполагается выкладывать на отдельных оправках (рисунок 5) с их помещением в вакуумные мешки для обеспечения их плотного прилегания к поверхности оснастки. Вакуумные мешки крепятся по контуру оснастки с помощью кулачковых прижимов. Далее происходит склеивание обшивок на сборочной оснастке (рисунок 6).

Полуформы сборочной оснастки прижимаются друг к другу болтами, а обшивки – кулачковыми прижимами. После выдерживания внутреннее пространство люка заполняется пенополиуретаном через отверстия в верхней полуформе. После этого люк извлекается из оснастки, и на него устанавливаются металлические узлы.

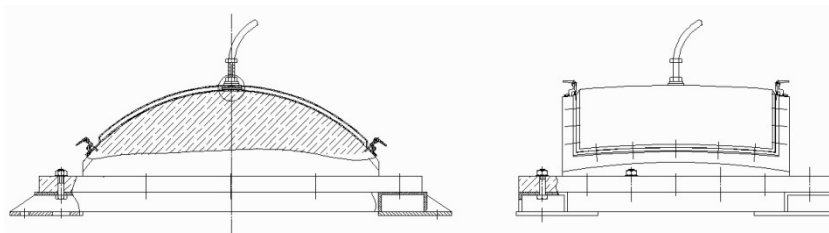


Рисунок 5

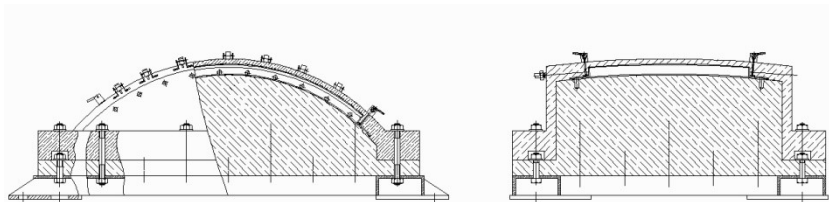


Рисунок 6

Согласно предварительным расчетам, общая длительность сборки составит 240 минут на один композиционный люк против 340 минут на алюминиевый люк.

Изготовленный люк после прочностного расчета планируется к внедрению в производство вертолетов Ми-171 на ОАО «Улан-Удэнский авиационный завод».

#### *Литература*

1. *Бохоева Л. А.* Экспериментальное исследование, численное моделирование элементов каркаса остекления фонаря кабины вертолета из композиционного материала / Л. А. Бохоева, К. А. Филиппова, В. Е. Рогов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2012. – Т. 9. – № 4-2. – С. 669-674.
2. *Абибов А.Л.* Технология самолетостроения / А.Л. Абибов. – Москва: Машиностроение, 192. – 551 с.
3. *Образцов И.Ф.* Строительная механика летательных аппаратов / И.Ф. Образцов. – Москва: Машиностроение, 1986. – 536 с.

#### *References*

1. *Bokhоеva L.A., Filippova K.A., Rogov V.E.* // *Basic Problems of Material Science*. – 2012. – V. 9. – No. 4-2. – P. 669-674.
2. *Abibov A.L.* *Tekhnologiya samolyotostroeniya*. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 551 p.
3. *Obraztsov I.F.* *Stroitel'naya mekhanika letatelnykh apparatov*. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 536 p.

УДК 62-1/-9

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ РЕЗИНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ БОЛЬШИХ СТЕПЕНЯХ ДЕФОРМАЦИЙ**

© А. Г. Кушнарёв, И. В. Щербаков, Д. Б. Даутбаева

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук А. А. Козулин

Национальный исследовательский Томский государственный университет

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

E-mail: kushnarev97@gmail.com

*Разработана физико-математическая модель, описывающая нелинейное упругое поведение конструкционной резины при больших степенях деформации. Проведено сравнение результатов численного моделирования с данными экспериментальных исследований механического поведения цилиндрических образцов резины при сжатии. Результаты исследования показали, что в условиях сложноподвижного состояния математическая модель достоверно описывает деформационное поведение рассматриваемого материала. Решена задача определения напряженно-деформированного состояния резинового амортизатора в условиях нагрузок, приближенных к эксплуатационным. Дан прогноз работоспособности изделия.*

**Ключевые слова:** моделирование, метод конечных элементов, большие степени деформаций, резина, Муни-Ривлин, амортизатор.

**A.G. Kushnaryov, I.V. Scherbakov, D.B. Dautbaeva**

Scientific Supervisor: Ph.D. **A.A. Kozulin**

Tomsk State University

634050, Russia, Tomsk, Lenin ave., 36

e-mail: kushnarev97@gmail.com

#### **MODELING OF NONLINEAR ELASTIC BEHAVIOR OF RUBBER ELEMENTS OF STRUCTURES AT LARGE STRAINS**

*A physical and mathematical model has been developed that describes the nonlinear elastic behavior of structural rubber at high degrees of deformation. The results of numerical simulation are compared with experimental data on the mechanical behavior of cylindrical rubber specimens under compression. The results of the study showed that under conditions of a complex-stressed state, the mathematical model reliably describes the deformation behavior of the material under consideration. Solved the problem of determining the stress-strain state of a rubber shock absorber under conditions of loads close to operational. A product health forecast is given.*

**Keywords:** modeling, finite element method, large degrees of deformation, rubber, Muni-Rivlin, shock absorber.

**Введение.** Прогнозирование деформационного поведения ответственных элементов конструкций с помощью компьютерного моделирования на этапе проектирования требует создания точных физико-механических моделей. Однако при больших деформациях и ярко выраженных физических нелинейностях, как у многих полимерных и резиноподобных материалов, проведения аналитических оценок будет недостаточно. Учет геометрических и физических нелинейностей при определении напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия усложняет математическую модель, процесс счета и нередко приводит к возникновению запредельных погрешностей, затрудняя отражение реального деформационного поведения [1]. Поэтому применение определяющих уравнений сложного вида неизбежно при описании подобных процессов. Для применения таких уравнений требуется проведение комплекса экспериментальных работ, способствующих нахождению физико-механических свойств и зависимостей материалов, достаточных для нахождения констант.

Целью данного исследования явилось создание физико-математической модели, адекватно отражающей нелинейное механическое поведение конструкционной резины при больших степенях деформации, проведение натурных экспериментов по одноосному и многоосному сжатию цилиндрических образцов из конструкционной резины, численная оценка НДС резинового амортизационного элемента.

**Материал и методы исследования.** В работе проведён ряд экспериментов по сжатию цилиндрических образцов, изготовленных из конструкционной резины. Эксперименты проводились по двум схемам нагружения – одноосное и двухосное сжатие при скорости деформации 0.01 1/с [2]. Размеры цилиндрических образцов составляли: высота 25 мм; диаметр 17,8 мм. Одноосное сжатие реализовано с возможностью перемещения торцевых поверхностей в радиальных направлениях. Двухосное сжатие проводилось на цилиндрических образцах того же вида, но с приклеенными к торцам стальными таблетками, что предотвращало перемещение их торцов в радиальных направлениях, создавая сложнапряженное состояние при сжатии. В результате проведения двух типов экспериментов получены кривые напряжения-деформации для исследуемого материала. Результаты экспериментов показали, что исследуемый материал может деформироваться упруго вплоть до 70 %, причем реализуемые деформации имеют ярко выраженную нелинейность.

**Результаты и обсуждение.** При создании физико-математической модели в качестве определяющего уравнения выбрана пяти-параметрическая модель Муни-Ривлина [3]. Регрессионным методом на основе экспериментальных данных определены значения констант определяющего уравнения, представленные в таблице. Проведена серия вычислительных экспериментов, в которых имитировались условия проведенных натуральных экспериментов. Задача решалась методом конечных элементов. В силу наличия круговой симметрии для цилиндрических образцов и элементов конструкции амортизатора задачи об определении НДС решались в осесимметричной постановке.

Таблица 1 – Значения констант для модели Муни-Ривлина

Константа	$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{11}$	$C_{20}$	$C_{02}$
Значение, МПа	1,63	-1,33	-1,22	1,91	0,27

Сравнение кривых нагружения, полученных численно и экспериментально при сжатии цилиндрического образца, представлено на рисунке 1. Верификация физико-математической модели показала свою адекватность, отражающую реальное деформационное поведение нелинейно-упругого образца при больших степенях деформаций, качественно описывая поведение испытуемого объекта, а напряжения, возникающие в опытном образце, численно близки к результатам моделирования, это явно показано на рисунке 2.

Геометрическая модель исследуемого амортизационного элемента в разрезе и ее идеализированная конечно-элементная модель, используемая в расчетах, показана на рисунке 2. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.

Созданная физико-математическая модель может быть успешно использована для прочностных расчетов ответственных элементов конструкции из исследуемого класса материалов. График отклика амортизационного элемента показывает, что данное изделие способно противостоять усилию 550–600 Н при деформировании в эксплуатационном диапазоне до 40 %.

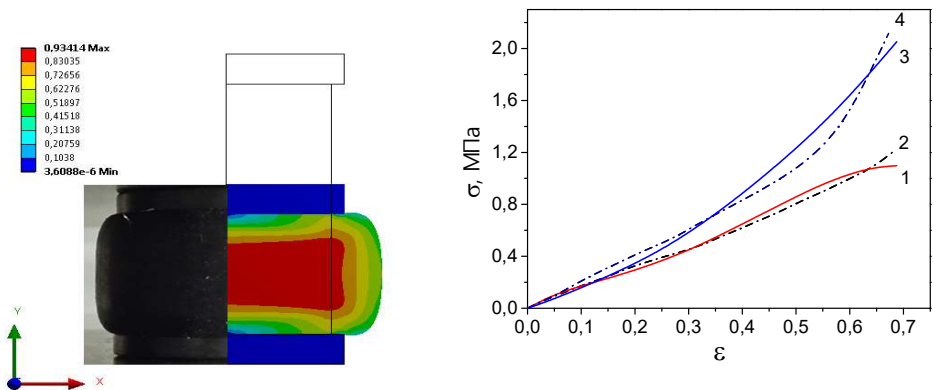


Рисунок 1 – Сравнение экспериментальных данных с расчетными: 1 – расчет, двухосное сжатие; 2 – эксперимент, двухосное сжатие; 3 – расчет, одноосное сжатие; 4 – эксперимент, одноосное сжатие

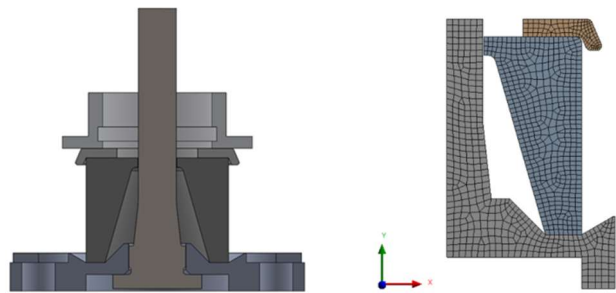


Рисунок 2 – Геометрическая и конечно-элементная модели амортизационного элемента

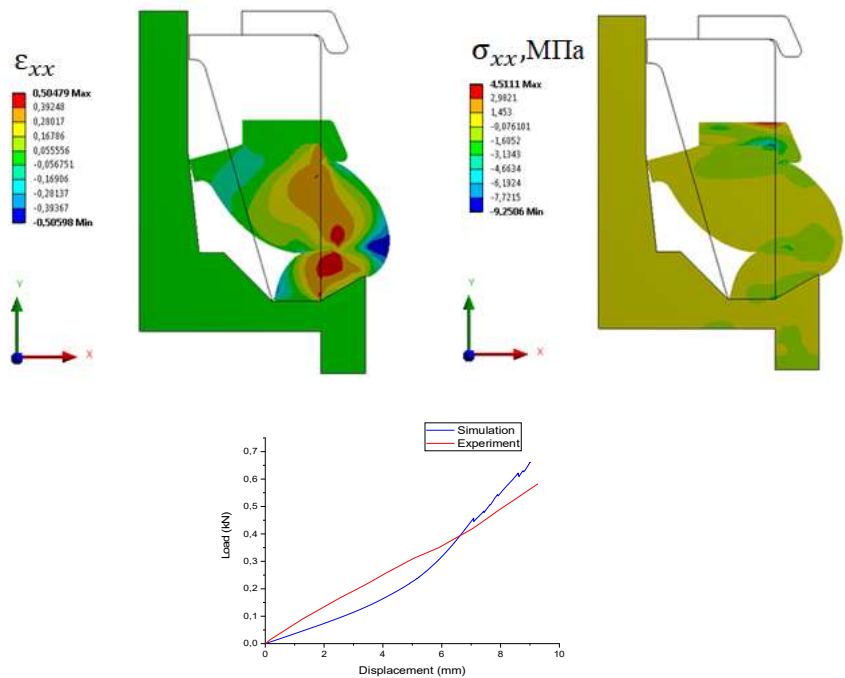


Рисунок 3 – Численные результаты определения НДС в элементе амортизатора и графики отклика на деформационное воздействие, полученные в эксперименте и расчете

### *Литература*

1. Скрипняк В.А. Влияние технологических микродефектов структуры на долговечность полимерных материалов / В.А. Скрипняк, А.А. Козулин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 3-6.
2. ГОСТ ISO 7743-2013. Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при сжатии. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 23 с. – Введен 01.01.2015.
3. Kozulin A.A. Strength calculation of polymer pipeline elements / A.A. Kozulin, V.A. Skripnyak // The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS. – 2005. – С. 29-31.

### *References*

1. Skripnyak V.A., Kozulin A.A. // Russian Physics Journal. – 2007. – V. 50. – No. 7. – P. 3-6.
2. GOST ISO 7743-2013. Rubber or thermoplastic. Determination of compression stress-strain properties. – Moscow: Standartinform, 2014. – 23 p. – Introduced 01.01.2015.
3. Kozulin A.A., Skripnyak V.A. // The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS. – 2005. – P. 29-31.

УДК 629.4.015

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ БЕССТЫКОВОГО РЕЛЬСОВОГО ПУТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕВОЙ СИЛЫ**

**© П. В. Новосельцев**

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1  
E-mail: nov-pv@mail.ru

*На Российских железнодорожных дорогах происходит переход к бесстыковому рельсовому пути, но при его работе иногда происходят нарушения пути, вызванные внутренними напряжениями в рельсах от действия:*

- температуры;
- продольных сил, вызванных прохождением подвижного состава и угоном железнодорожного пути.

*Напряжения могут быть растягивающими зимой и сжимающими летом. Напряжения могут достигнуть опасной величины приводящей к разрыву пути при низких температурах и выбросу пути при высоких температурах. Для обеспечения безопасности движения необходимо разработать технологию контроля возникающих при эксплуатации напряжений. Авторами создано и получен патент на устройство, которым можно определять возникающие напряжения. были проведены исследования на железнодорожных путях и получены зависимость смещений и напряжений от действия приложенной внешней силы  $P = f(\delta)$ .*

**Ключевые слова:** контроль состояния железнодорожного пути, сдвиг рельса, выброс пути, напряжение от действия температуры.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF CONTINUOUS WELDED RAILS DEFORMATION UNDER THE EFFECT OF AXIAL FORCE**

**P. V. Novoseltsev**

East Siberia State University of Technology and Management  
670013, Republic of Buryatia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya St., 40V, building 1  
E-mail: nov-pv@mail.ru



On the Russian railways, there is a transition to a continuous rail-rail track, but during its operation, track disturbances sometimes occur due to internal stresses in the rails from the action:

- temperature;
- longitudinal forces caused by the passage of rolling stock and theft of the railway.

Stresses can be tensile in winter and compressive in summer. Stresses can reach dangerous values leading to rupture of the path at low temperatures and ejection of the path at high temperatures. To ensure traffic safety, it is necessary to develop a technology for monitoring stresses arising during operation. The authors created and obtained a patent for a device with which it is possible to determine the occurring stresses. Studies were carried out on railway tracks and the dependence of displacements and stresses on the action of an external force was obtained.

**Keywords:** railway track monitoring, rail shift, track overshoot, strain from the effect of temperature.

Автором создано «Устройство для определения продольной жесткости рельсового пути» (патент на полезную модель RU 138300 U1) [1]. этим устройством на рельсы прикладывается продольная сила  $P$  и определяется смещение рельсов  $\delta$  и рассчитываются напряжения, возникающие в рельсах.

Исследуем вариант, когда в рельсах при низких температурах возникли сжимающие напряжения ( $\sigma_t$ ). Расчетная схема представлена на рисунке 1а. От железнодорожного состава на рельс действует продольная сила  $P$ , реакцией на которую, от насыпи и шпального основания на рельс действует распределенная сила сопротивления  $q$  (рисунок 1б) [2, 3].

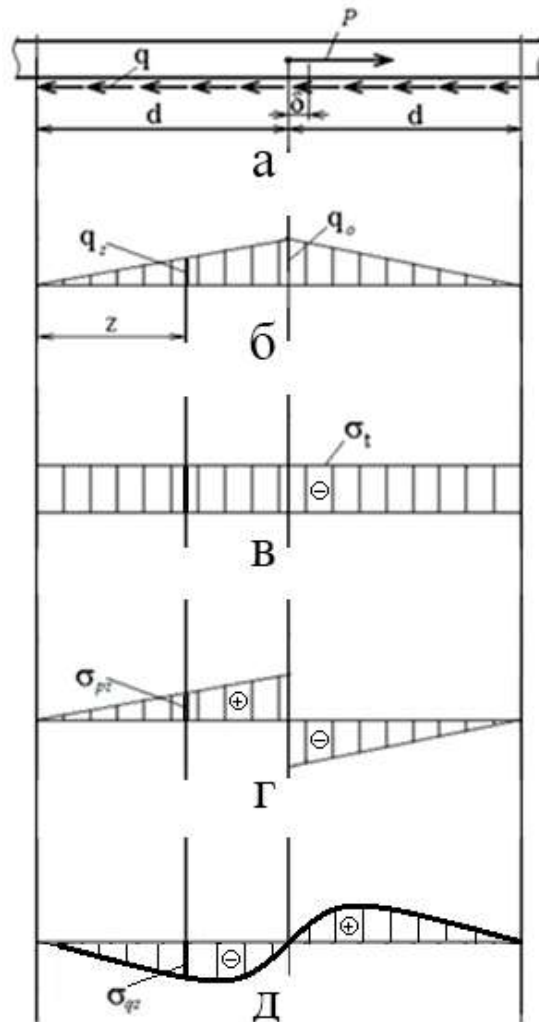
В рельсе возникает:

- температурное напряжение  $\sigma_t$  (рисунок 1в) [2, 3];
- продольное напряжение от силы  $P$  (рисунок 1г) [4, 5];
- продольное напряжение от действия распределенной силы от действия верхнего строения пути  $q$  (рисунок 1д) [2].

Было принято, что:

- силы  $P$  действует на расстояние  $2d$ ;
- сила от действия верхнего строения пути на рельс имеет линейную зависимость (рисунок 1б):

$$q_z = q_0 \cdot \frac{z}{d} ;$$



- сжимающие температурные напряжения  $\sigma_t$  равномерные по длине (рисунок 1в);
- продольные напряжения в рельсе от действия силы  $P$  распределяются по линейной зависимости (рисунок 1г):

Рисунок 1 
$$p_z = \frac{P \cdot z}{2 \cdot d \cdot F};$$

- напряжения  $\sigma_q$  от действия железнодорожного пути на рельс определяется по зависимости (рисунок 1д):

$$\sigma_{qz} = q_0 \frac{z^2}{d \cdot 2 \cdot F}.$$

Потенциальная энергия деформации от действия температуры определяется по зависимости:

$$U_0 = 2 \cdot \int_0^d \frac{\sigma_t^2 \cdot F^2 \cdot dz}{2 \cdot E \cdot F}. \quad (1)$$

Потенциальная энергия деформации от действия температуры  $\sigma_t$ , продольной силы  $P$ , силы сопротивления  $q$ :

$$U_1 = \int_0^d \frac{d \left( -\sigma_t + \frac{P \cdot z}{2 \cdot d \cdot F} - q_0 \frac{z^2}{d \cdot 2 \cdot F} \right)^2 \cdot F^2 \cdot dz}{2 \cdot E \cdot F} + \int_0^d \frac{d \left( -\sigma_t - \frac{P \cdot z}{2 \cdot d \cdot F} + q_0 \frac{z^2}{d \cdot 2 \cdot F} \right)^2 \cdot F^2 \cdot dz}{2 \cdot E \cdot F}. \quad (2)$$

Приращение потенциальной энергии деформации:

$$\Delta U = U_1 - U_0. \quad (3)$$

После преобразования уравнений (1), (2), (3) получим:

$$\Delta U = \frac{\sigma_t \cdot q_0 \cdot d^2}{3 \cdot E} + \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} - \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F}. \quad (4)$$

Приращение потенциальной энергии деформации равно сумме работ внешних сил:

$$\Delta U = A_i^e. \quad (5)$$

были проведены экспериментальные исследования зависимости перемещения  $\delta$  точки приложения силы  $P$  от ее величины (см. график на рисунке 2).

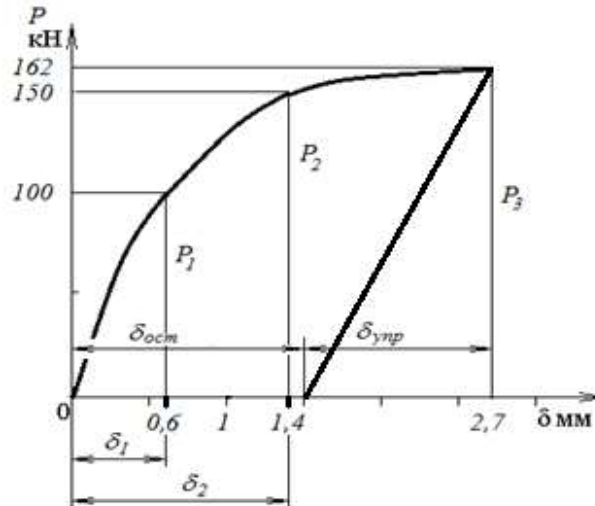


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость перемещения рельсового пути  $\delta$  от силы  $P$

Кривую нагружения представим в виде функции:

$$P = a \cdot \delta^m. \quad (6)$$

Определим коэффициент  $m$  и, подставляя  $P_1$  и  $P_2$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , получим:

$$m = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}}. \quad (7)$$

Выразим коэффициент  $a$ :

$$a = \frac{P_1}{\delta_1^m}. \quad (8)$$

#### Расчет параметров рельсового пути

Найдем сумму работ сил из формул (6), (7), (8) и, преобразовав, получим:

$$\sum A_i^e = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta = \int_0^{\delta} a \cdot \delta^m d\delta = \frac{P \cdot \delta}{m+1}. \quad (9)$$

Сумма работ сил затрачивается на деформацию рельсового пути и потери энергии при его перемещении:

$$\sum A_i^e = A_{унр} + A_{потерь}.$$

Работа, затраченная на упругую деформацию:

$$A_{упр} = \frac{1}{2} \cdot \delta_{упр} \cdot P,$$

где перемещение  $\delta_{упр}$  находим по графику на рисунке 2.

Работа от потери энергии:

$$A_{потерь} = \sum A_i^e - A_{упр} = \frac{P \cdot \delta}{m+1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_{упр} \cdot P. \quad (10)$$

Упругая деформация находится по закону Гука:

$$\delta_{упр} = \frac{P \cdot d}{E \cdot F}.$$

Тогда, длина железнодорожного пути  $d$ , деформирующегося от действия силы  $P$ :

$$d = \frac{\delta_{упр} \cdot E \cdot F}{P}. \quad (11)$$

Работа потерь энергии деформации вызвана действием силы сопротивления верхнего строения пути  $q$ :

$$A_{потерь} = A_q = 2 \int_0^d q_z \cdot \delta \cdot \frac{z}{d} \cdot dz.$$

Преобразовав (11), а также выразив длину  $d$  (10), получим:

$$A_{потерь} = A_q = 2 \cdot q_0 \cdot \delta \cdot \frac{\delta_{упр} \cdot E \cdot F}{P}.$$

Максимальное значение силы сопротивления от действия верхнего строения пути  $q_0$ , и подставив работу потерь энергии (10), получим:

$$q_0 = \frac{P^2 \cdot \left( \frac{\delta}{m+1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_{упр} \right)}{2 \cdot \delta \cdot \delta_{упр} \cdot E \cdot F}.$$

После преобразования (5), (4) и (9), получим:

$$\frac{\sigma_t \cdot q_0 \cdot d^2}{3 \cdot E} + \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} + \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F} = \frac{P \cdot \delta}{m+1}.$$

Определим возникающие напряжения бесстыкового рельсового пути:

$$\sigma_t = \left( \frac{P \cdot \delta}{m+1} - \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} - \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F} \right) \cdot \frac{3 \cdot E}{q_0 \cdot d^2}.$$

Используя этот метод, можно:

1. Найти возникающие напряжения в рельсовом пути в опасном месте и сравнить его с допускаемым.
2. Найти сопротивление сдвигу рельсового пути и определить его техническое состояние.

#### *Литература*

1. Устройство для определения продольной жесткости рельсового пути / С.В. Елисе-ев [и др.]. – Патент России № 138300. – 10.03.2014.
2. Железнодорожный путь: учебник для вузов железнодорожного транспорта / Т.Г. Яковлева [и др.]. – Москва: Транспорт, 1999. – 405 с.
3. *Новакович В.Ч.* Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями / В.Ч. Новакович. – Москва: Маршрут, 2005. – 139 с.
4. *Новосельцев В.П.* Влияние продольной жесткости рельсового пути на проскальзывание колесной пары локомотива по рельсу / В.П. Новосельцев, П.В. Новосельцев, А.А. Гордеева // Мир транспорта. – 2013. – № 4 (48). – С. 34-38.
5. *Новосельцев В.П.* Экспериментальное исследование процесса трогания с места железнодорожного состава / В.П. Новосельцев, Ж.Г. Дамбаев, П.В. Новосельцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2007. – № 1 (13). – С. 74-78.

#### *References*

1. *Eliseev S.V., Novoseltsev V.P., Novoseltsev P.V., Suslov O.A., Gordeeva A.A.* Ustroistvo dlya opredeleniya prodolnoi zhyostkosti relsovogo puti. – Russia patent no. 138300. – 10.03.2014.
2. *Yakovleva T.G., Karpushenko N.I., Klinov S.I., Putrya N.N., Smirnov M.P.* Zheleznodorozhnyi put. – Moscow: Transport, 1999. – 405 p.
3. *Novakovich V.Ch.* Besstykovoi put so sverkhdlinnymi relsovymi pletyami. – Moscow: Marshrut, 2005. – 139 p.
4. *Novoseltsev V.P., Novoseltsev P.V., Gordeeva A.A.* // World of Transport and Transportation. – 2013. – No. 4 (48). – P. 34-38.
5. *Novoseltsev V.P., Dambaev Zh. G., Novoseltsev P.V.* // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2007. – No. 1 (13). – P. 74-78.

УДК 678.67.02

### **ВОЗМОЖНОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

© **В. В. Пнева**<sup>1</sup>, преподаватель, **В. Е. Рогов**<sup>2</sup>, старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Улан-Удэнский авиационный техникум

670009, Россия, г. Улан-Удэ, Хоринская ул., д. 1г

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН

670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

E-mail: rogov54v@mail.ru

*В работе рассмотрен перспективный способ, позволяющий регулировать и изменять размеры фторопластовых заготовок. Опытным путем выявлено, что за счет*

многократных нагревов полимерных заготовок до температуры расплава полимера в оправках их размеры можно изменять на 10-12 % по наружному и на 15-20 % по внутреннему диаметру.

**Ключевые слова:** фторопластовые заготовки, оправки, многократный нагрев, температура расплава полимера.

## POSSIBILITY OF ADJUSTING AND SIZING PTFE BILLETS

© V. V. Pnyova<sup>1</sup>, lecturer, V. E. Rogov<sup>2</sup>, Senior Researcher

<sup>1</sup>Ulan-Ude Aviation College

670009, Russia, Ulan-Ude, 1g Khorinskaya St.

<sup>2</sup>Baikal Institute of Nature Management of Siberian branch of the Russian Academy of sciences

670047, Russia, Ulan-Ude, 6 Sakhyanovoi St.

E-mail: rogov54v@mail.ru

*The work considers a promising method that allows to adjust and resize fluoroplastic blanks. It was experimentally found that due to the multiple heating of polymer preforms to the temperature of the polymer melt in the mandrels, their sizes can be changed by 10-12 % in the outer diameter and by 15-20 % in the inner diameter.*

**Keywords:** fluoroplastic preforms, mandrels, multiple heating, polymer melt temperature.

Изделия из политетрафторэтилена (ПТФЭ) обладают способностью «запоминать» свою первоначальную форму и размер [1], что проявляется в полном восстановлении первоначальных размеров образца при повышении температуры после деформирования. При эксплуатации полимерное изделие принимает исходную форму под влиянием релаксационных процессов – это явление носит название «эффекта памяти формы» (ЭПФ). Эффект памяти формы для кристаллизующих полимеров происходит из-за структурной перестройки аморфной фазы. С ростом температуры повышается вероятность реализации ЭПФ [2] с возможностью кристаллизации, деструкции и рекристаллизации кристаллитов, несовершенной формы, а также из-за процессов утолщения кристаллических блоков и плавления кристаллической фазы.

В публикациях [1-3] приводятся результаты исследований различных полимеров с ЭПФ. Данный эффект нашел широкое применение для ряда полимеров и широко используется в производстве изделий в виде термоосаждающихся пленок (трубок). Однако публикаций, где изучен ЭПФ для ПТФЭ, крайне мало. Память формы фторопласта-4 проявляется не только в виде пленок, но и для объемных деталей, что обусловлено тем, что некоторые аморфно-кристаллические полимеры (включая и ПТФЭ) при температурах выше температуры стеклования после пластической деформации в высокоэластичном состоянии способны частично или полностью возвращаться в исходное геометрическое положение под действием остаточных внутренних напряжений. Это происходит вследствие того, что отдельные элементы надмолекулярной структуры (звенья, сегменты макромолекулы) должны вернуться к исходной конформации под влиянием остаточных напряжений. Движение частей макромолекул сопровождается релаксацией внутренних напряжений, в результате чего на макроуровне будут изменяться геометрические размеры образцов. Активность микродвижения элементов структуры и степень релаксации напряжений определяется температурой образца и продолжительностью эксперимента [1].

Исходя из представленного выше, можно заключить, что, изменяя линейные размеры фторопластовых заготовок внешним силовым воздействием, невозможно добиться постоянства их размеров, так как при повышении температуры в образцах будет наблюдаться обратный процесс, приводящий к прежним габаритам.

Несмотря на то, что методы прямого прессования заготовок из ПТФЭ и композиций на его основе в размер не нашли широкого распространения, в ряде случаев часто возникает производственная необходимость изменения размеров для получения изделий заданного размера.

При решении данного вопроса был разработан способ получения заготовок с необходимыми размерами из порошкообразного ПТФЭ [4] путем прессования, спекания и охлаждения. Изменение размеров заготовок достигается путем их нагрева при температуре  $643 \pm 5$  К до расплава в ограничивающих оправках без давления, а необходимые линейные размеры получают путем многократной термообработки в соответствующих оправках.

Принципиальным отличием нового способа является то, что изменение размера изделия производится в ограничивающих оправках при отсутствии внешнего давления, в силу чего не возникают внутренние напряжения, а требуемый размер определяется только размером оправок.

Для проверки эффективности предлагаемой технологии была изготовлена партия заготовок и затем подвергнута термоциклированию в оправках по вышеуказанному режиму.

На рисунке 1 представлен вариант ограничивающих оправок для изменения (уменьшения) размера цилиндрической заготовки по наружному диаметру.

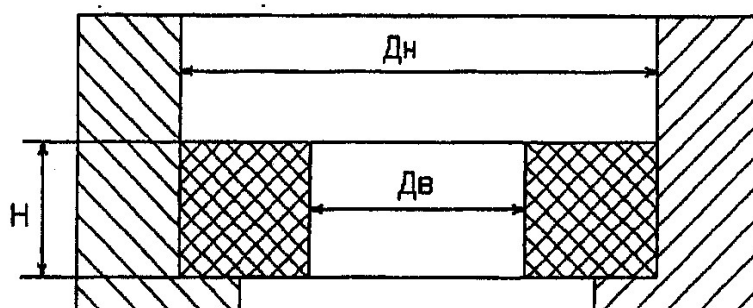


Рисунок 1 – Ограничивающая оправка по наружному диаметру

В таблице 1 представлены экспериментальные данные для цилиндрической заготовки ( $\varnothing 75,0 \times \varnothing 44,0 \times 30$  мм) после спекания и после термообработок в ограничивающих оправках.

Исходя из данных таблицы 1, видно, что в результате термообработки заготовок в соответствующих оправках наблюдается изменение размеров в сторону уменьшения, как по наружному, так и внутреннему диаметру, при этом размер детали по высоте увеличивается.

Таблица 1 – Изменение размеров заготовки после термообработок в ограничивающих оправках

Размеры цилиндрической заготовки и оправок, мм								
После прессования	После спекания	Изменение размера, %	Оправка Ø74,0 мм	Изменение размера, %	Оправка Ø71,0 мм	Изменение размера, %	Оправка Ø69,0 мм	Изменение размера, %
Ø75,0	Ø73,8	-1,6	Ø71,0	-3,8	Ø68,7	-3,2	Ø66,6	-3,0
Ø44,0	Ø43,5	-1,2	Ø40,0	-8,0	Ø37,6	-6,0	Ø36,2	-3,7
30,0	30,9	+3,0	32,1	+4,0	33,6	+4,6	34,4	+2,6

Примечание – «-» соответствует усадке, «+» соответствует увеличению

Опытным путем выявлено, что за счет многократных нагревов полимерных заготовок до температуры расплава полимера в оправках, их размеры можно изменить на 10–12%, по наружному и на 15–20% по внутреннему диаметру. Из-за того, что цепи полимера получают определенную ориентацию при многократном нагреве и располагаются параллельно одна другой, создавая тем самым более плотные упорядоченные текстуры, плотность полимера возрастает [5, 6].

Таким образом, при наличии соответствующих оправок имеется возможность получать заданный размер заготовки по наружному диаметру или по внутреннему диаметру и по высоте.

Рассмотрим более подробно характер процессов, протекающих при нагреве заготовок в ограничивающих оправках. Поскольку оправка ограничивает одну степень свободы полимерной заготовки и отсутствует внешнее давление, то расширение образца при нагреве будет происходить в свободное пространство ограничивающей оправки. Известно, что изделия из ПТФЭ при температуре 600–615 К [7] увеличиваются в объеме на 25% с последующим противоположным процессом усадки при охлаждении.

На наш взгляд, отдельные элементы надмолекулярной структуры (звенья, сегменты макромолекул) во время термообработки в ограниченном объеме меняют месторасположение в материале из-за свободного температурного расширения и запоминают его при охлаждении, вследствие того, что эти процессы происходят в расплаве полимера, предыдущее расположение забывается. При повторной термообработке заготовок в оправках без давления остаточные внутренние напряжения деформации отсутствуют или существенно меньше, чем при воздействии внешней нагрузки, что хорошо согласуется с данными работы [8]. Изменение объемной деформации при воздействии температуры без давления происходит во всем объеме полимера, тогда как изменение деформации от действия внешнего давления (различные виды калибровок) носит локальный характер, в результате чего создают внутренние напряжения в изделиях.

Установлено, что при многократном нагреве заготовок до 623 К (рабочая температура эксплуатации ПТФЭ) их размер не изменяется. При этом деструктивные процессы в полимере при температуре термообработки отсутствуют, о чём свидетельствует стабильность массы цилиндрической детали, после 16 термических циклов.

Применение данного способа в производстве фторопластовых изделий позволяет целенаправленно изменять размеры заготовок в нужном направлении и получать требуемый размер по наружной или внутренней поверхности цилиндрического изделия без механической обработки при сохранении структуры поверх-



ностного слоя материала и их эксплуатационных свойств. Разработанный способ позволяет изменять или регулировать размеры фторопластовых изделий в нужном направлении без создания внутренних напряжений в материале при снижении расхода дорогостоящего материала и трудоемкости изготовления.

Работа выполнена в рамках госзадания БИП СО РАН.

#### *Литература*

1. Белошенко В.А. Эффект памяти формы в полимерах / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин, Ю.В. Возняк // Успехи химии. – 2005. – № 74. – С. 285-306.
2. Белошенко В.А. Эффект памяти формы в полимерах и его применение / В.А. Белошенко, В.Н. Варюхин. – Киев: Наукова думка, 2005. – 189 с.
3. Trznadel M. Thermal shrinkage of polymers / M. Trznadel, M. Kryszewski // J.M.S. – 1992. – № 4. – P. 275-306.
4. Способ изготовления заготовок с требуемыми размерами из порошкообразного ПТФЭ / В.Е. Рогов [и др.]. – Патент России № 2278785. – Бюллетень № 18. – 27.06.2006.
5. Литов Ю.Н. Стадии разрушения полимеров в условиях ползучести / Ю.Н. Литов // Механика твердого тела. – 1971. – № 4. – С. 180-181.
6. Исследование релаксации напряженно-деформированного состояния полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ / Ю.К. Машков [и др.] // Материаловедение. – 2003. – № 12. – С. 37-43.
7. Чегодаев Д.Л. Фторопласты / Д.Л. Чегодаев, З.К. Наумова, Ц.С. Дунаевская. – Ленинград: Химия, 1960. – 192 с.
8. Гольдман А.Я. Прочность конструкционных пластмасс / А.Я. Гольдман. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 320 с.

#### *References*

1. Beloshenko V.A., Varyukhin V.N., Voznyak Yu.V. // Russian Chemical Reviews. – 2005. – No. 74. – P. 265–283.
2. Beloshenko V.A., Varyukhin V.N. Effekt pamtyati formy v polimerakh i ego primenenie. – Kiev: Naukova dumka, 2005. – 189 p.
3. Trznadel M., Kryszewski M. // J.M.S. – 1992. – No. 4. – P. 275-306.
4. Rogov V.E., Kornopol'tsev V.N., Kornopol'tsev N.V. et al. Sposob izgotovleniya zagotovok s trebuemyimi razmerami iz poroshkoobraznogo PTFE. – Russia patent no. 2278785. – Bulletin no. 18. – 27.06.2006.
5. Litov Yu.N. // Mechanics of Solids. – 1971. – No. 4. – P. 180-181.
6. Mashkov Yu.K., Mamaev O.A., Baibaratskaya M.Yu. et al. // Material Science. – 2003. – No. 12. – P. 37-43.
7. Chegodaev D.L., Naumova Z.K., Dunaevskaya Ts.S. Ftoroplasty. – Leningrad: Khimiya, 1960. – 192 p.
8. Goldman A.Ya. Prochnost konstruktsionnykh plastmass. – Leningrad: Mashinostroenie. Leningrad branch, 1979. – 320 p.

УДК 539.42

### **РАСЧЕТ КИН ПО ФРОНТУ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНЫ В РАСТЯНУТОЙ ПОЛОСЕ**

© А. М. Покровский<sup>1</sup>, А. С. Чермошнцева<sup>2</sup>, Е. И. Дубовицкий<sup>3</sup>  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5/1  
E-mail: <sup>1</sup>pokrovsky@bmstu.ru, <sup>2</sup>asch-13@ya.ru, <sup>3</sup>oakegor@yandex.ru

*Разработана методика аналитического определения распределения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) по фронту полуэллиптической краевой поперечной трещины в растянутой постоянными напряжениями полосе. В основу расчета положен метод сечений, согласно которому записано уравнение равновесия для нормальной силы, сводящееся к равенству нормальных сил на свободном торце полосы и в плоскости трещины. Показано, что между значениями КИН в наиболее заглубленной точке и в точке, выходящей на поверхность, можно ввести жесткую связь, зависящую от отношения глубины к полудлине трещины и глубины к толщине полосы. Проведено тестирование полученных расчетных данных для полосы бесконечной ширины, путем сравнения с результатами вычисления КИН по имеющимся в справочной литературе аппроксимационным формулам. Обоснована возможность использования разработанной методики для полосы конечной ширины посредством сравнения результатов расчета по предлагаемой методике с численными значениями, полученными в процессе решения задачи методом конечных элементов в программной среде ANSYS.*

**Ключевые слова:** полуэллиптическая трещина, коэффициент интенсивности напряжений, метод сечений, метод конечных элементов.

#### CALCULATION OF SIF FROM THE FRONT OF A SEMI-ELLIPTICAL TRANSVERSE CRACK IN A STRETCHED BAND

A. M. Pokrovskiy<sup>1</sup>, A. S. Chermoshentseva<sup>2</sup>, E. I. Dubovitskiy<sup>3</sup>

Bauman Moscow State Technical University  
105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya St., 5/1  
E-mail: <sup>1</sup>pokrovsky@bmstu.ru, <sup>2</sup>asch-13@ya.ru, <sup>3</sup>oakegor@yandex.ru

*The method of analytical determination for the distribution of stress intensity factor (SIF) on the front of the semi-elliptical boundary-value of cross-section crack in the band stretched by constant stresses was developed. Calculations are based on the method of cross-sections, according to which, the balance equation for normal force that can be reduced to the equality of the normal forces on the free end of the band and in the plane of the crack was written. It was demonstrated that we can introduce a hard link between the values of SIF in the deepest point and the point, that depends on the ratio of the depth to the half length of the crack and the depth to the thickness of the band. The introduction of this link allowed us to use only one balance equation in the calculation. Testing of the obtained calculated data for the band of the infinite width was performed by comparing the results with the results of SIF calculations using approximate formulas available in the reference articles. The possibility of using the developed method for the band of the finite width by comparing the calculation results with the proposed method and numerical values obtained in the process of solving finite element method in ANSYS software environment.*

**Keywords:** semi-elliptical crack, stress intensity factor, method of cross-sections, finite element method.

Значительное количество деталей машин и строительных конструкций представляют из себя работающие на растяжение, в том числе и при циклически изменяющейся нагрузке полосы, то есть тела с длиной, значительно превышающей размеры поперечного сечения. При эксплуатации в таких элементах со временем возникают трещиноподобные дефекты. Для оценки их трещиностойкости и живучести необходимо знать распределение коэффициента интенсивности напря-

жений (КИН) по фронту трещин. Так как только в этом случае можно применить силовой критерий разрушения Ирвина [1]. Для определения КИН в деталях с трещинами, как правило, используют численные методы, в первую очередь метод конечных элементов (МКЭ). Чаще всего применяют стандартные конечно-элементные комплексы, в которых имеется встроенная функция вычисления КИН, например, ANSYS. Нередко при оценке трещиностойкости деталей используют аппроксимационные выражения для КИН, приводимые в справочной литературе [2-4]. Однако не для всех схем можно найти готовые решения. Достаточно простым, но в тоже время обладающим приемлемой точностью определения КИН, является метод сечений [5, 6]. В настоящей работе предложена методика вычисления КИН по фронту полуэллиптической краевой поперечной трещины в растянутой полосе с применением усовершенствованных точных формул для напряжений.

Рассмотрим растянутую напряжениями  $\sigma$  полосу бесконечной длины толщиной  $h$  и шириной  $d$  с поперечной краевой полуэллиптической трещиной глубиной  $a$  и полудлиной  $l$  (рисунок 1).

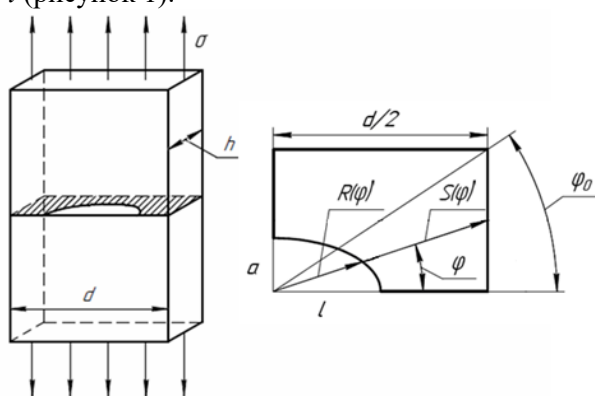


Рисунок 1 – Поперечная краевая полуэллиптическая трещина в полосе

В связи с симметрией задачи будем рассматривать только правую часть поперечного сечения полосы (рисунок 1). Функция контура трещины и расстояние до внешнего контура полосы имеют вид

$$R(\varphi) = \frac{a \cdot l}{\sqrt{(a \cos \varphi)^2 + (l \sin \varphi)^2}}, \quad S(\varphi) = \begin{cases} \frac{d}{2 \cos \varphi}, & \varphi \leq \varphi_0, \\ \frac{h}{\sin \varphi}, & \varphi > \varphi_0 \end{cases}$$

где  $\varphi_0 = \arctg(2H / D)$ .

Обозначим  $\varepsilon = a / l$ ,  $\lambda = a / H$ .

Растягивающее напряжение примем равным 200 МПа, глубину трещины 5 мм. Полудлину трещины и толщину полосы определим по значениям  $\varepsilon$  и  $\lambda$  соответственно.

Примем, что напряжения в плоскости полуэллиптической трещины в полосе можно приближенно определить по формуле для дисковой трещины в бесконечной среде при замене постоянного радиуса  $b$  на расстояние от начала координат

до точки на фронте трещины  $R(\varphi)$  и замене постоянного КИН для круговой трещины на  $K_I(\varphi)$ , зависящий от угла  $\varphi$

$$\sigma(r, \varphi) = \left( \sigma - \frac{2\sigma}{\pi} \arcsin \frac{R(\varphi)}{r} + K_I(\varphi) \sqrt{\frac{R(\varphi)}{\pi(r^2 - R^2(\varphi))}} \right).$$

Используем для вычисления  $K_I(\varphi)$  метод сечений, согласно которому запишем уравнение равновесия для нормальной силы на одном из торцов и в плоскости трещины

$$\sigma \cdot \frac{d \cdot h}{2} = \int_0^{\pi/2} \int_{R(\varphi)}^{S(\varphi)} \left( \sigma - \frac{2\sigma}{\pi} \arcsin \frac{R(\varphi)}{r} + K_I(\varphi) \sqrt{\frac{R(\varphi)}{\pi(r^2 - R^2(\varphi))}} \right) r dr d\varphi.$$

Примем линейное распределение КИН по координате  $y$ , тогда по углу  $\varphi$  от 0 до  $\pi/2$  получается тригонометрическое распределение

$$K_I(\varphi) = K_I^{(1)} - \frac{K_I^{(1)} - K_I^{(2)}}{a} y = K_I^{(1)} \left( 1 - \frac{R(\varphi)}{a} \sin \varphi \right) + K_I^{(2)} \frac{R(\varphi)}{a} \sin \varphi.$$

Введем жесткую связь между  $K_I^{(1)}$  и  $K_I^{(2)}$ . Для этого воспользуемся аппроксимационной формулой для определения КИН вдоль фронта поперечной полуэллиптической трещины в растянутом напряжении  $\sigma$  слое толщиной  $h$  в случае, когда глубина трещины меньше ее полудлины [2].

В таблице 1 представлены результаты расчета по приведенной формуле КИН для наиболее заглубленной точки  $K_I^{(2)}$  (первая строчка), точки, выходящей на поверхность  $K_I^{(1)}$  (вторая строчка), для различных значений  $\varepsilon$  и  $\lambda$ , а также отношение  $K_I^{(2)}/K_I^{(1)}$  (третья строчка).

Таблица 1 – Значения КИН в МПа $\sqrt{м}$

$\lambda \setminus \varepsilon$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,1	26,9	25,5	24,0	22,6	21,2
	13,3	15,4	16,8	17,6	18,1
	2,03	1,66	1,43	1,28	1,17
0,3	30,0	27,7	25,6	23,7	22,1
	15,2	17,1	18,3	19,0	19,3
	1,97	1,62	1,40	1,25	1,15
0,5	35,7	31,5	28,4	25,8	23,6
	18,9	20,5	21,3	21,6	21,7
	1,89	1,54	1,33	1,19	1,09

Анализ табличных значений привел к следующей связи между  $K_I^{(1)}$  и  $K_I^{(2)}$ .

$$K_I^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} [0,901 - 0,141(\lambda - 0,1)] K_I^{(1)}. \quad (1)$$

Тогда зависимость КИН от угла приобретает следующий вид

$$K_I(\varphi) = K_I^{(1)} \left( 1 - \frac{R(\varphi)}{a} \sin \varphi \right) + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} [0,901 - 0,141(\lambda - 0,1)] K_I^{(1)} \frac{R(\varphi)}{a} \sin \varphi =$$

$$= K_I^{(1)} \left[ 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} [0,901 - 0,141(\lambda - 0,1)] - 1 \right) \frac{R(\varphi)}{a} \sin \varphi \right].$$

В этом случае уравнение для определения КИН в точке, выходящей на поверхность, будет

$$\sigma \cdot \frac{d \cdot h}{2} - A_{10} = A_{11} K_I^{(1)},$$

где

$$A_{10} = \int_0^{\pi/2} \int_{R(\varphi)}^{S(\varphi)} \left( \sigma - \frac{2\sigma}{\pi} \arcsin \frac{R(\varphi)}{r} \right) r dr d\varphi,$$

$$A_{11} = \int_0^{\pi/2} \int_{R(\varphi)}^{S(\varphi)} \left( 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} [0,901 - 0,141(\lambda - 0,1)] - 1 \right) \frac{R(\varphi)}{a} \sin \varphi \right) \sqrt{\frac{R(\varphi)}{\pi(r^2 - R^2(\varphi))}} r dr d\varphi.$$

Для оценки возможности использования изложенной методики определения КИН в полосе конечной ширины решим указанную задачу в конечно-элементном комплексе ANSYS. Для создания математической модели полосы с трещиной использовались 10-узловые тетраэдрические конечные элементы SOLID 187, а для описания особенности вдоль фронта трещины – специальные сингулярные 15-узловые призматические конечные элементы SOLID 186. Количество элементов: 15 277.

В качестве иллюстрации на рисунке 2 приведено распределение КИН по фронту трещины для отношений глубины к полудлине 0,3 и отношения глубины трещины к толщине равной 0,1.

В таблице 2 представлены результаты сравнения значений КИН, полученных методом сечений и МКЭ. В первой строке каждой ячейки таблицы представлен  $K_I^{(2)}$ , во второй  $K_I^{(1)}$ . Указана погрешность метода сечений по отношению к МКЭ.

Таблица 2 – Значения КИН в МПа $\sqrt{м}$

$\lambda \setminus \varepsilon$	0,3			0,4		
	МКЭ	Метод сечений	Погрешность, %	МКЭ	Метод сечений	Погрешность, %
0,1	11,07	11,08	0,09	10,40	10,17	2,26
	7,49	6,71	11,62	7,84	7,11	10,26
0,2	16,82	15,85	6,12	15,15	14,51	4,41
	10,43	9,73	7,19	11,54	10,28	12,25

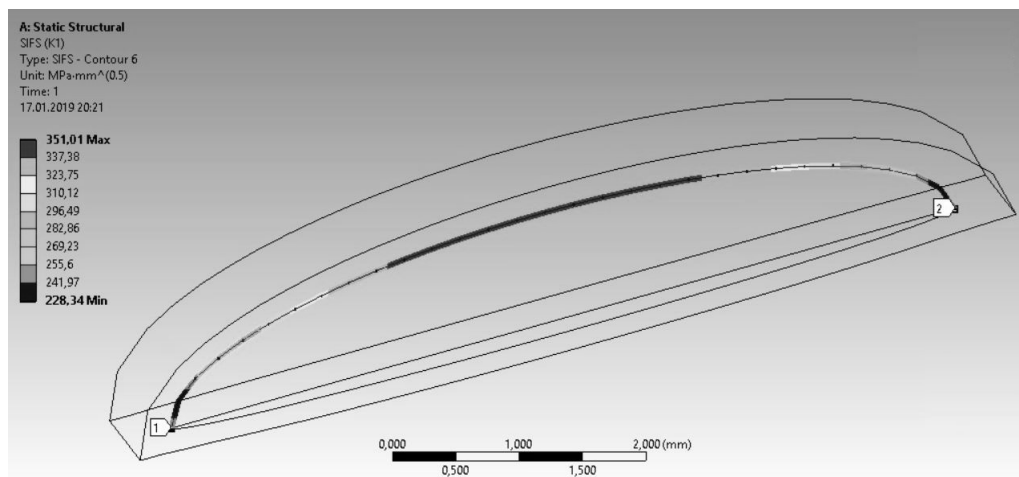


Рисунок 2 – Распределение КИН по фронту трещины для  $\varepsilon = 0,3$

Из таблицы видно, что наибольшая погрешность вычисления КИН, методом сечений по отношению к МКЭ наблюдается для точки, выходящей на поверхность, и достигает 12,25 %. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о возможности использования формулы (1) для связи между  $K_I^{(1)}$  и  $K_I^{(2)}$  и применения метода сечений для определения КИН в изложенной постановке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-18050/18.

#### Литература

1. Черепанов Г.П. Механика разрушения / Г.П. Черепанов. – Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 872 с.
2. Саврук М.П. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие / М.П. Саврук. – Киев: Наукова думка, 1988. – 620 с.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – Москва: Мир, 1990. – 1016 с.
4. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г. Матвиенко. – Москва: Физматлит, 2006. – 328 с.
5. Партон В.З. Механика упругопластического разрушения: основы механики разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – Москва: ЛКИ, 2008. – 352 с.
6. Покровский А.М. Термопрочность цельнокованых и бандажированных прокатных валков / А.М. Покровский. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 272 с.

#### References

1. Cherepanov G.P. Mekhanika razrusheniya. – Moscow, Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2012. – 872 p.
2. Savruk M.P. Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov. – Kiev: Naukova dumka, 1988. – 620 p.
3. Spravochnik po koeffitsientam intensivnosti napryazhenii. – Moscow: Mir, 1990. – 1016 p.
4. Matvienko Yu. G. Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya. – Moscow: Fizmatlit, 2006. – 328 p.

5. Parton V.Z., Morozov E.M. Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya: osnovy mekhaniki razrusheniya. – Moscow: LKI, 2008. – 352 p.

6. Pokrovskii A.M. Termoprochnost tselnokovanykh i bandazhированных прокатных валков. – Moscow: Bauman MSTU Press, 2017. – 272 p.

УДК 538.9

**НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ  
ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ  
МНОГООСНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

© А. А. Попов<sup>1</sup>, Н. Н. Берендеев<sup>2</sup>, М. С. Болдин<sup>3</sup>, Е. А. Ланцев<sup>4</sup>

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского

603022, Россия, г. Н. Новгород, пр-т Гагарина, д. 23к3.

E-mail: <sup>1</sup>feel-host@yandex.ru, <sup>2</sup>earl13@gmail.com, <sup>3</sup>boldim@nifti.unn.ru,  
<sup>4</sup>elancev@nifti.unn.ru

*Разработан новый экспериментально-расчетный метод оценки прочности перспективных мелкозернистых керамик эксплуатирующихся в условиях сложного многоосного напряженно-деформированного состояния (НДС), получаемых с использованием новых производственных технологий. Методом конечных элементов смоделировано НДС, возникающее в перспективных керамиках при испытаниях по схеме b3b (Ball on three balls test), исследовано влияние условий нагружения и механических свойств керамик на НДС. Разработана и изготовлена оснастка для проведения испытаний керамики, а также сформулирован критерий изгибной прочности перспективных керамик для их эксплуатации в условиях многоосного НДС. Проведены сравнительные испытания стандартных (промышленных) керамик и новых наноструктурированных и ультрамелкозернистых керамик, для получения которых использована новая перспективная технология высокоскоростного спекания «Spark Plasma Sintering» (SPS).*

**Ключевые слова:** конструкционные керамики, эксплуатация, многоосное напряженно-деформированное состояние (НДС), прочность на изгиб, технология «Spark Plasma Sintering» (SPS).

**NEW TECHNIQUE FOR ESTIMATION OF STRENGTH OF PERSPECTIVE  
NANO STRUCTURAL CONSTRUCTIONAL CERAMICS  
IN CASE OF MULTIPLE STRESS-DEFORMED CONDITION**

A. A. Popov<sup>1</sup>, N. N. Berendeev<sup>2</sup>, M. S. Boldin<sup>3</sup>, E. A. Lantsev<sup>4</sup>

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

603022, Russia, Nizhniy Novgorod, pr. Gagarina, h. 23.

E-mail: <sup>1</sup>feel-host@yandex.ru, <sup>2</sup>earl13@gmail.com, <sup>3</sup>boldim@nifti.unn.ru,  
<sup>4</sup>elancev@nifti.unn.ru

*A new experimental method was developed for assessing the strength of perspective fine-grained ceramics operating in a complex multiaxial stress-strain state (SSS). This ceramics are obtained using new production technologies. The finite element method was used to simulate the SSS arising in perspective ceramics when tested according to the b3b scheme (Ball on three balls test), and the effect of loading conditions and mechanical properties of ceramics on the SSS was investigated. Equipment was designed and manufactured for testing ceramics, and a criterion for the flexural strength of prospective ceramics was formulated for their operation*

*under conditions of multi-axis SSS. Comparative tests of standard (industrial) ceramics and new nanostructured and ultrafine-grained ceramics have been carried out, for the preparation of which a new promising high-speed sintering technology "Spark Plasma Sintering" (SPS) has been used.*

*Keywords: flexural strength, construction ceramics, exploitation, multiaxial stress state is present, Spark Plasma Sintering*

В настоящее время в машиностроении существует большой интерес к новым конструкционным керамикам, которые могли бы обеспечивать длительную эксплуатацию высокоответственных изделий и конструкций в условиях больших изгибных нагрузок и сложного многоосного напряженно-деформированного состояния (НДС). К таким изделиям можно отнести керамические пары трения газовых центрифуг для разделения изотопов, современный керамический металло-режущий инструмент, керамические узлы современных газотурбинных двигателей и др. Новые инновационные устройства и отдельные изделия общего и специального машиностроения для рекордного повышения КПД также предполагают использование современных высокопрочных керамик, работающих в условиях сложного НДС и высоких механических нагрузок.

Отметим, что в случае высокопрочных керамик, в отличие от высокопластичных металлов, фактор НДС зачастую имеет решающее значение для прогноза эксплуатационной надежности. В следствие этого, традиционные попытки «интерполяции» результатов, получаемых при стандартных испытаниях на трехточечный изгиб в условиях простого одноосного НДС, приводят к существенным ошибкам в оценке их эксплуатационной надежности. Это, в частности, приводит к известным предубеждениям конструкторов и разработчиков против любых попыток использовать результаты лабораторных испытаний для прогноза поведения керамических материалов в эксплуатационных условиях.

Целью работы является разработка методики оценки прочности в условиях сложного многоосного НДС образцов новых нано- и ультрамелкозернистых керамических материалов на основе оксида алюминия и карбида вольфрама, обладающих высокими (рекордными) механическими свойствами.

В основе новой методики испытаний на прочность лежит методика испытаний на изгиб «Ball on three balls test» [1], при которой плоский цилиндрический образец располагается на трех точках опоры, образующих равносторонний треугольник (рисунок 1), и нагружается до разрушения с заданной скоростью [2]. Опорные шары в оснастке располагаются в направляющих, что по сравнению с классическим вариантом позволяет варьировать размер шаров и, как следствие, изменять характер НДС в испытываемом образце.

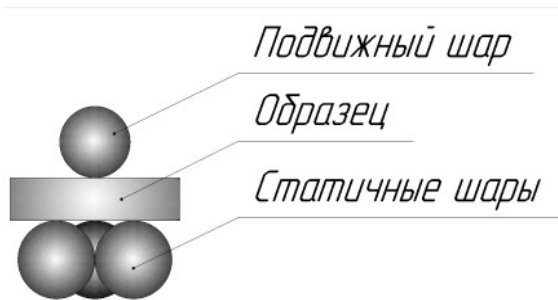


Рисунок 1 – Схема нагружения b3b

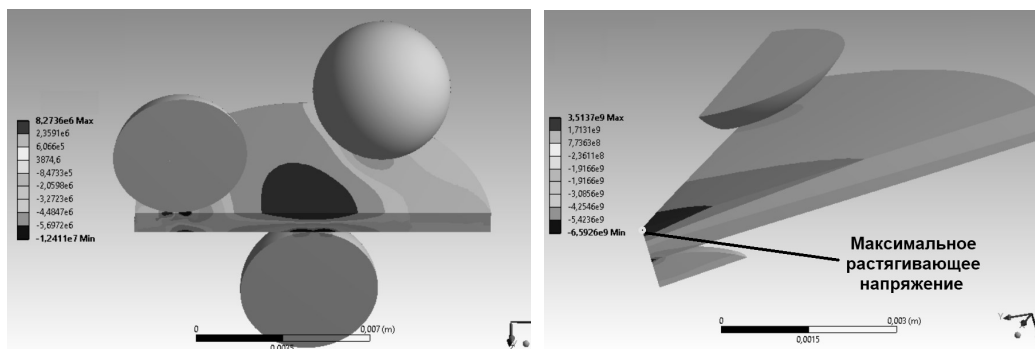


Моделирование НДС проводилось методом конечных элементов с использованием возможностей пакета «ANSYS Workbench». Для измерения твердости использована методика Виккерса. Исследование структуры образцов проводится методами растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Для определения упругих модулей керамик, необходимых для проведения расчетов на прочность, используется методика акустических исследований.

В качестве объекта исследования выступили промышленные керамики различного состава, а также перспективные нано- и ультрамелкозернистые керамики на основе оксида алюминия, карбида вольфрама и различные композиты на их основе. Керамики получены методом электроимпульсного плазменного спекания (Spark Plasma Sintering, SPS), в основе которого лежит способ высокоскоростного нагрева материала за счет пропуска последовательности импульсов постоянного тока с одновременным приложением давления. Имеющаяся в распоряжении установка «Dr. Sinter model SPS-625», оснащенная прецизионными системами контроля усадки и температуры, позволяет эффективно управлять плотностью, пористостью, размером зерен и структурно-фазовым состоянием границ зерен и межфазных границ. Это позволяет провести исследования влияния состава и параметров микроструктуры новых конструкционных керамик на прочность и трещиностойкость в условиях сложного НДС.

Проведено развернутое исследование возможностей и границ применимости новой методики, сформулированы пределы применения для исследования изгибной прочности и вязкости разрушения мелкозернистых керамик. Показано, что максимальное растягивающее напряжение расположено на противоположной нагружающему шару поверхности образца (см. рисунок 2а). Проведен анализ влияния на максимальные главные напряжения (см. рисунок 2б) высоты образца при фиксированной опорной окружности, в ходе которого установлено, что геометрическая функция слабо меняется при уменьшении соотношения высоты образца к радиусу опорной окружности. Установлена зависимость максимальных растягивающих напряжений от геометрических параметров исходного дефекта, коэффициента трения и модуля Юнга. Показано, максимальные главные напряжения не зависят от модуля Юнга до  $E=200$  ГПа, после чего наблюдается степенная зависимость максимальных главных напряжений от величины  $E$ . Установлено, что данный эффект реализуется в том случае, если жесткость контакта между шарами и образцом становится сопоставимой с жесткостью испытываемого керамического материала.

Для объяснения полученных результатов для хрупких материалов был предложен критерий прочности напряженного состояния, в основе которого лежит расширенная модель Друкера-Прагера [3], в которой учитывается влияние степени многоосности напряженного состояния и знака главных напряжений. Полученный критерий прочности устанавливает зависимость от максимального растягивающего напряжения и давления в зависимости от напряженного состояния образца и структурного состояния материала.



а) – зона растягивающих напряжений, б) – максимальное растягивающее напряжение  
Рисунок 2

Анализ изломов промышленных керамик на основе оксида алюминия показывает, что при испытаниях по схеме b3b разрушение материала начинается в области максимальных растягивающих напряжений, а трещины в дальнейшем распространяются вдоль фронта разрушения образца. Характер разрушения керамик – межкристаллитный, что соответствует характеру разрушения керамик в условиях эксплуатации. Анализ результатов проведенных исследований и расчетов показывает, что для получения алюмооксидной керамики с оптимальным соотношением изгибной прочности, твердости и трещиностойкости необходимо обеспечить оптимальный размер зерна ~1-2 мкм.

Во второй части работы проведены исследования изгибной прочности перспективных конструкционных керамик и композитов на основе оксида алюминия и карбида вольфрама. Исследовано влияние пористости и размера зерна на изгибную прочность керамик при их испытаниях по схеме b3b. Определены оптимальные режимы спекания, обеспечивающие формирование нано- и ультрамелкозернистой композиционной структуры в исследуемых керамиках с максимальной изгибной прочностью в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Результаты испытаний новых перспективных керамик, использование которых предполагается в ряде отраслей общего и специального машиностроения, сопоставлены с результатами определения стандартных характеристик твердости по Виккерсу, трещиностойкости по Палмквисту и результатами стандартных испытаний по ГОСТ 24409-80.

В заключение следует отметить, что изготовление образцов из высокопрочных керамик для стандартной методики испытаний по схеме «трехточечный изгиб» является сложной методической и технической задачей. При разрезке и механической обработке высокопрочной хрупкой керамики велик риск повреждения поверхности и появления стыковых микро- и нанотрещин, которые практически не обнаруживаются с использованием металлографических методов контроля поверхности, но оказывают существенное влияние на достоверность и разброс результатов испытаний. С этой точки зрения, использование для b3b-методики плоских цилиндрических образцов, непосредственно получаемых методом «Spark Plasma Sintering» (для подготовки поверхности которых используется только полировка) является удобным решением для устранения артефактов и повышения достоверности получаемых результатов.

*Литература*

1. *Borger A., Supancic P.* // Journal of the European Ceramic Society. – 2002. – Т. 22. – С. 1425-1436.
2. *Strobl S., Rasche S.* // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – Т. 34. – С. 1637-1642.
3. *Drucker D. C., Prager W.* // Brown University. – 1952. – С. 157-165.

*References*

1. *Borger A., Supancic P.* // Journal of the European Ceramic Society. – 2002. – V. 22. – P. 425-1436.
2. *Strobl S., Rasche S.* // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – V. 34. – P. 1637-1642.
3. *Drucker D. C., Prager W.* // Brown University. – 1952. – P. 157-165.

УДК 539.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ  
СЖАТЫХ КОЛЕЦ С ТРЕЩИНОПОДОБНЫМИ ДЕФЕКТАМИ  
ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© А. С. Чермошентсева<sup>1,a</sup>, А. М. Покровский<sup>1,b</sup>, А. А. Иванов<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5/1

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40

E-mail: <sup>a</sup>asch-13@ya.ru, <sup>b</sup>pokrovsky@bmstu.ru, <sup>c</sup>alexchemtsu@rambler.ru

*Расслоение является одним из наиболее распространенных режимов разрушения композиционных материалов. Это может произойти вследствие несовершенства производственного процесса или влияния внешних факторов в течение срока службы композиционных элементов конструкций. В данной работе представлены результаты механических испытаний слоистых композитных моделей тонкостенных сжатых колец с трещиноподобными дефектами.*

**Ключевые слова:** слоистые композитные материалы, тонкостенные сжатые кольца, дефект.

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF MODELS OF THIN-WALLED-COMPRESSED  
RINGS WITH CRACK DEFECTS FROM LAYERED COMPOSITE MATERIALS**

A. S. Chermoshentseva<sup>1,a</sup>, A. M. Pokrovskiy<sup>1,b</sup>, A. A. Ivanov<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University

105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya St., 5/1

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave., 40

E-mail: <sup>a</sup>asch-13@ya.ru, <sup>b</sup>pokrovsky@bmstu.ru, <sup>c</sup>alexchemtsu@rambler.ru

*Delamination is one of the most common failure modes of composite materials. It may occur as a consequence of imperfections in the production process or the effects of external factors during the operational life of the composite laminates. This paper presents the results of mechanical tests of models of thin-walled-compressed rings with defects type of delamination of layered composite materials.*

**Keywords:** layered composite materials, thin-walled-compressed rings, defect.

Устойчивость конструкций из слоистых композиционных материалов с трещиноподобными дефектами, в частности тонкостенного кольца, остается наиболее интересной и малоизученной из всех проблем теории устойчивости [1-3]. Задачи об устойчивости кругового кольца с различными дефектами рассмотрены в работах [4-6]. В настоящей работе рассмотрена задача о нелинейной устойчивости тонких отслоений, расположенных вблизи внутренней поверхности сжатого кольца. Для оценки устойчивости изделий из слоистых композиционных материалов необходимо провести экспериментальное исследование, позволяющее прогнозировать их долговечность.

В работе рассматривается элемент конструкции в виде модели тонкостенного сжатого кольца с трещиноподобным дефектом из слоистых композиционных материалов (рисунок 1). Модели изготавливались из препрегов стеклоткани промышленной марки Т-10 ГОСТ 19170-73, 19170-2001, ТУ 6-48-53-90. Стеклопластики на основе стеклоткани Т-10 применяются для изготовления труб, лодок, цистерн под агрессивные среды и ряда других изделий, где требуются материалы повышенной прочности и коррозионной устойчивости.

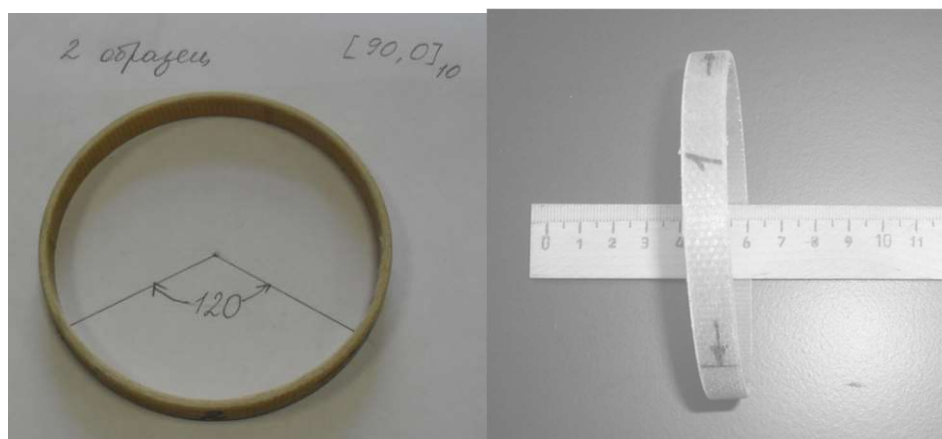


Рисунок 1 – Кольцо с заложенным дефектом типа отслоение

Для изготовления моделей в формообразующую оснастку (пресс-форму), в форме стального кольца, смазанного антиадгезионным покрытием, выкладывался предварительно раскроенный препрег в десять слоёв. Затем в сердцевину кольца вставлялся силиконовый вкладыш для создания необходимого внутреннего давления. Трещиноподобный дефект, для имитации межслойного отслоения, создавался путем прокладки фторопластовой пленки между слоями.

Для экспериментального исследования разработаны специальные модели нагружающих устройств и зажимов, которые помещались в разрывную машину ИР5057-50 мощностью 5 т (рисунок 2). Затем сборка подвергалась статическим усилиям на сжатие [7-10].



Рисунок 2 – Специальные модели нагружающих устройств и зажимов

Были проведены испытания моделей тонкостенных колец с заложенным технологическим дефектом, определялась средняя критическая сила до потери устойчивости – образования трещиноподобного дефекта. Были сделаны фотографии образцов до и после эксперимента (рисунок 3).

На рисунке 4 представлены результаты испытаний тонкостенных кольцевых образцов с трещиноподобными дефектами: значение критической силы для кольца диаметром 90 мм с углом залегания дефекта  $\varphi = 120^\circ$  и с укладкой волокон  $[0_5, 90_5]$  и  $[45_5, -45_5]$  для материала Т-10.

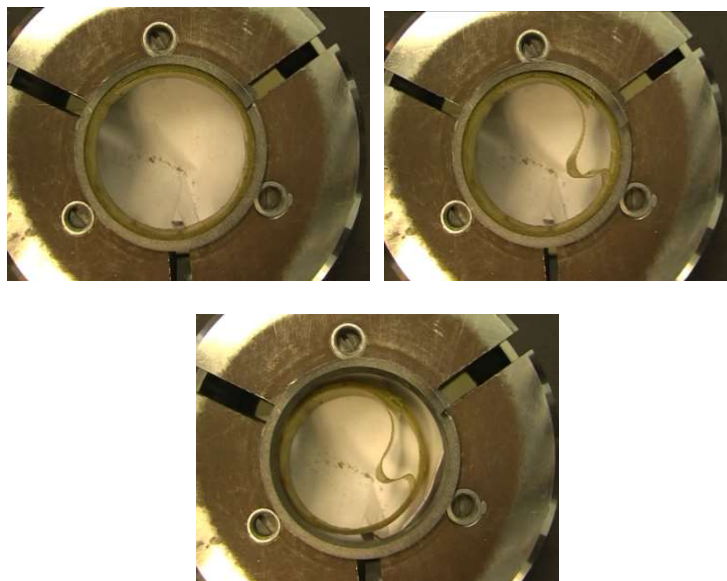


Рисунок 3 – Испытание образцов

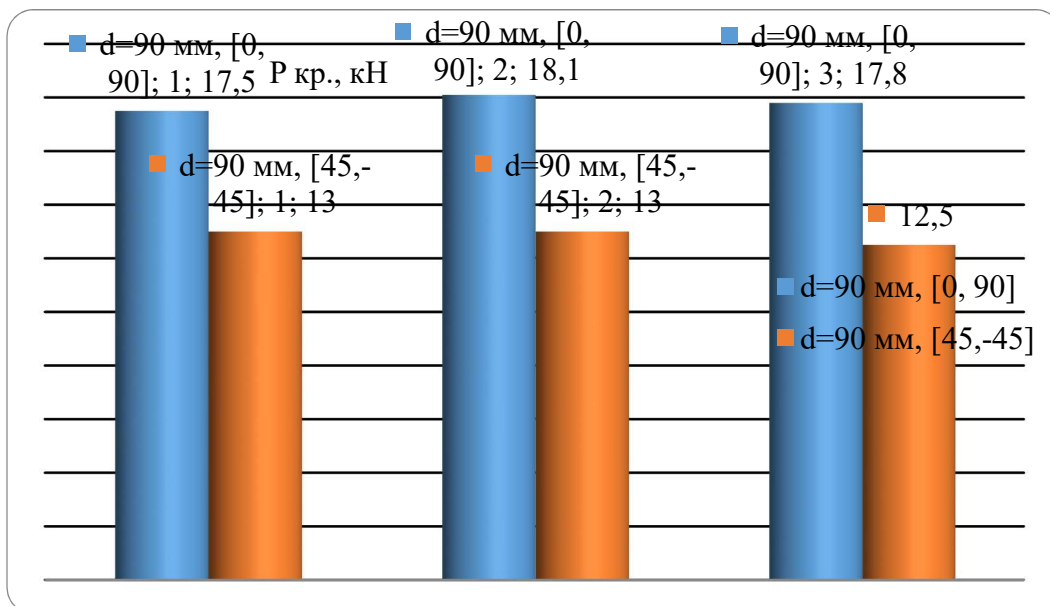


Рисунок 4 – Диаграмма распределения значений критической силы при испытаниях образцов кольца диаметром 90 мм с укладкой волокон [0<sub>5</sub>, 90<sub>5</sub>] и [45<sub>5</sub>, -45<sub>5</sub>]

На рисунке 5 представлены результаты испытаний тонкостенных кольцевых образцов с трещиноподобными дефектами: значение критической силы для кольца диаметром 50 мм с углом залегания дефекта  $\varphi = 120^\circ$  и с укладкой волокон [0<sub>5</sub>, 90<sub>5</sub>] и [45<sub>5</sub>, -45<sub>5</sub>] для материала Т-10.

В таблице 1 представлены результаты сравнения экспериментальных значений критической нагрузки для тонкостенных колец диаметром 50 мм и диаметром 90 мм.

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных значений критической нагрузки для тонкостенных колец диаметром 50 мм и диаметром 90 мм

Стеклопластик с укладкой волокон [0 <sub>5</sub> , 90 <sub>5</sub> ]				Стеклопластик с укладкой волокон [45 <sub>5</sub> , -45 <sub>5</sub> ]			
d = 90 мм	P <sub>кр.</sub> , кН	d = 50 мм	P <sub>кр.</sub> , кН	d = 90 мм	P <sub>кр.</sub> , кН	d = 50 мм	P <sub>кр.</sub> , кН
	17,5		16,4				
18,1	17,8	13,0	12,1				
17,8	16,6	12,5	12,4				

Механические испытания на сжатие слоистых композитных моделей тонкостенных сжатых колец с трещиноподобными дефектами показали, что кольцевые образцы из стеклопластика Т-10 диаметром 90 мм с дефектами, заложенными под углом  $\varphi = 120^\circ$ , с укладкой волокон [0<sub>5</sub>, 90<sub>5</sub>] выдерживают нагрузку в среднем на 20-25 % больше, чем образцы с укладкой волокон [45<sub>5</sub>, -45<sub>5</sub>]; диаметры образцов колец практически не влияют на значение критической нагрузки потери устойчивости дефекта.

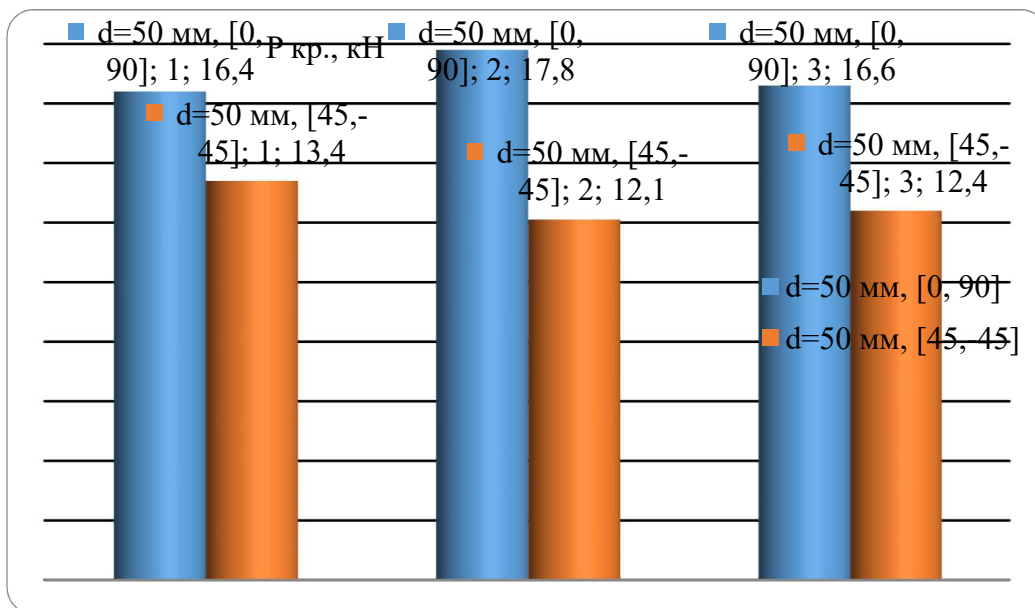


Рисунок 5 – Диаграмма распределения значений критической силы при испытаниях образцов кольца диаметром 50 мм с укладкой волокон [0<sub>5</sub>, 90<sub>5</sub>] и [45<sub>5</sub>, -45<sub>5</sub>]

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-18050/18.

#### Литература

1. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян. – Москва: Наука, 1974. – 448 с.
2. Ванин Г.А. Устойчивость оболочек из армированных материалов / Г.А. Ванин, Н.П. Семенюк, Р.Ф. Емельянов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 212 с.
3. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир. – Москва: Наука, 1972. – 432 с.
4. Лейзерович Г.С. Об особенностях собственных изгибных колебаний круговых колец с начальными неправильностями / Г.С. Лейзерович, Н.А. Тарануха // Прикладная математика и механика. – 2012. – Т. 76. – № 2. – С. 304-310.
5. Muc A. Identification of damage in composite multilayered cylindrical panels with delaminations / A. Muc, A. Stawiarski // Composite structures. – 2012. – Т. 94. – № 5. – С. 1871-1879.
6. Muc A. Modelling of fatigue damage evolution in composite multilayered cylindrical shells / A. Muc, A. Bondyra, S. Miarka // International Journal of Automotive Composites (IJAUTOC). – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 60-74.
7. Chermoshentseva A.S. Experimental research of models of thin-walled-compressed rings with defects type of delamination of layered composite materials / A.S. Chermoshentseva, L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov // Proceedings of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016). – 2016. – Часть 1. – С. 112-114.
8. Покровский А.М. Экспериментальная оценка устойчивости моделей тонкостенных сжатых колец из слоистых композиционных материалов с межслойными сквозными дефектами / А.М. Покровский, А.С. Чермошентцева // Механика и математическое моделирование в технике: материалы II Всероссийской научно-технической конференции. – 2017. – С. 267-272.

9. *Бохоева Л.А.* Испытание на прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами / Л.А. Бохоева, А.Г. Пнев, А.С. Чермошнцева // Вестник Бурятского государственного университета. – 2011. – № 9. – С. 230-236.

10. *Чермошнцева А.С.* Испытание образцов труб из слоистых композиционных материалов с дефектами // А.С. Чермошнцева, Е.С. Булдакова // Современная техника и технологии: тезисы докладов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. – Т. 1. – С. 331-332.

#### References

1. *Ambartsumyan S.A.* Obshchaya teoriya anizotropnykh obolochek. – Moscow: Nauka, 1974. – 448 p.

2. *Vanin G.A., Semenyuk N.P., Emelyanov R.F.* Ustoichivost obolochek iz armirovannykh materialov. – Kiev: Naukova dumka, 1978. – 212 p.

3. *Volmir A.S.* Nelineinaya dinamika plastinok i obolochek. – Moscow: Nauka, 1972. – 432 p.

4. *Leizerovich G.S., Taranukha N.A.* // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – V. 76. – No. 2. – P. 304-310.

5. *Muc A., Stawiarski A.* // Composite structures. – 2012. – V. 94. – No. 5. – P. 1871-1879.

6. *Muc A., Bondyra A., Miarka S.* // International Journal of Automotive Composites (IAUTOC). – 2016. – V. 2. – No. 1. – P. 60-74.

7. *Chermoshentseva A.S., Bokhoeva L.A., Rogov V.E.* // Proceedings of 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016). – 2016. – Part 1. – P. 112-114.

8. *Pokrovskii A.M., Chermoshentseva A.S.* // Mekhanika i matematicheskoe modelirovanie v tekhnike: Proceedings of II All-Russian Scientific and Technical Conference. – 2017. – P. 267-272.

9. *Bokhoeva L.A., Pnyov A.G., Chermoshentseva A.S.* // Bulletin of Buryat state university. – 2011. – No. 9. – P. 230-236.

10. *Chermoshentseva A.S., Buldakova E.S.* // Modern technics and technologies: Proceedings of XVIII International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Press, 2012. – V. 1. – P. 331-332.

УДК 533.662

### НОВЫЙ СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЯГИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

© **Т.-О. Эрдэнэбат**<sup>1</sup>, преподаватель, **Б. Эрдэнэбат**<sup>2</sup>, профессор, **Д. Ганбат**<sup>3</sup>, профессор  
Монгольский университет науки и технологии  
14191, Монголия, Улан-Батор, Сухбаатарский район, 8-й округ, ул. Бага тойруу, 34  
E-mail: <sup>1</sup>jonon@must.edu.mn, <sup>2</sup>erdenebatb@must.edu.mn, <sup>3</sup>ganbatda@must.edu.mn

*Воздушные винты, используемые на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), работают в области малых чисел Рейнольдса. Аэродинамическая сила, возникающая на лопасти при работе воздушного винта, является переменной. В случае значений числа Рейнольдса, меньших, чем  $5 \cdot 10^5$ , в некоторых местах на внешней поверхности работающего винта возникает явление, подобное отрыву ламинарного течения. С целью устранения этого явления, повышения подъёмной силы лопасти и тем самым уменьшения пограничного турбулентного слоя изобретена биллопастная конструкция воздушного винта, защищенная патентом. Данный винт имеет*



дополнительную лопасть над основной. С использованием компьютерной программы «ANSYS Fluent» были исследованы образцы билопастных воздушных винтов и установлено, в каких случаях уменьшится индуктивное сопротивление и пограничный турбулентный слой, и в каких случаях увеличится подъёмная сила при работе этого винта. Также в лабораторных условиях проведено исследование статической силы тяги билопастного воздушного винта с использованием инструмента, измеряющего величину крутящего момента при скорости вращения винта 2000-4500 оборотов в минуту. В выводах исследования проведен сравнительный анализ билопастного воздушного винта и классического винта.

**Ключевые слова:** билопастной воздушный винт, аэродинамика малых скоростей, турбулентное течение, отрыв ламинарного течения.

### NEW METHOD FOR INCREASING PROPELLER THRUST DUE TO ADDITIONAL BEARING SURFACE

T.-O. Erdenebat<sup>1</sup>, lecturer, B. Erdenebat<sup>2</sup>, professor, D. Ganbat<sup>3</sup>, professor  
Mongolian University of Science and Technology  
14191, Mongolia, Ulaanbaatar, Sukhbaatar district, 8<sup>th</sup> area, Baga Toiruu St., 34  
E-mail: <sup>1</sup>jonon@must.edu.mn, <sup>2</sup>erdenebatb@must.edu.mn, <sup>3</sup>ganbatda@must.edu.mn

*The propellers used on small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) operate in the field of small Reynolds numbers. The aerodynamic force arising on the blade when the propeller operates is variable. In the case of values of the Reynolds number less than  $5 \cdot 10^5$ , in some places on the outer surface of the working propeller a phenomenon similar to the laminar flow separation occurs. In order to eliminate this phenomenon, increase the lift force of the blade and thereby reduce the boundary turbulent layer, a bilop propeller construction is invented, protected by a patent. This propeller has an additional blade above the main one. Using the ANSYS Fluent computer program, samples of bilop propellers were investigated and it was established in which cases the inductive resistance and the turbulent boundary layer would decrease, and in which cases the lift force would increase during the operation of this propeller. Also under laboratory conditions, a static thrust force of a bilop propeller was studied using a tool that measures the torque at a propeller rotation speed of 2000-4500 revolutions per minute. The findings of the study conducted a comparative analysis of the bilop propeller and the classic propeller.*

**Keywords:** bilop propeller, low velocity aerodynamics, turbulent flow, separation of laminar flow.

**Введение.** В прошлом веке достаточно интенсивно проводились исследования воздушных винтов летательных аппаратов. В настоящее время в связи с технологическим прогрессом изготовление новых малогабаритных конструкций многовинтовых дронов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стало легкой и доступной задачей, поэтому возникла необходимость углубленного исследования воздушных винтов при малых скоростях вращения [1, 2].

Для улучшения аэродинамического качества и тяги БПЛА, снижения шума вращения воздушных винтов в работе [3] проводились исследования винтов БПЛА при малых скоростях вращения. В работе [4] для достижения указанных целей был представлен воздушный винт из легких и прочных композиционных материалов, выбран профиль лопасти с хорошими аэродинамическими показателями, изменена конструкция воздушного винта.

Основной причиной снижения аэродинамических характеристик воздушного винта является отрыв ламинарного течения от внешней поверхности лопасти [5,

6]. Это явление происходит при малых числах Рейнольдса. Турбулентное течение увеличивает силу трения на несущей поверхности, вызывает обратный поток воздуха (вихрь у задней кромки основной лопасти), что приводит к уменьшению силы тяги винта [1, 5, 7-8]. Изменение скорости и переход ламинарного течения в турбулентное вокруг твёрдого тела для любого газа, воздуха или жидкости определяются числом Рейнольдса (PIV) или с использованием дымовых завес [9].

Течение воздуха и подъёмная сила на несущей поверхности тесно связаны с изменением числа Рейнольдса. Для улучшения аэродинамических характеристик воздушного винта необходимо определить геометрические параметры поперечного сечения лопасти. Поперечное сечение лопасти имеет профиль, идентичный профилю крыла самолёта [10, 11].

В данной работе проведено исследование билопастного воздушного винта, который состоит из основной и дополнительной лопастей. Нижняя лопасть является основной, а верхняя – дополнительной (рисунок 1).



Рисунок 1 – Билопастной воздушный винт

При работе билопастного воздушного винта уменьшается энергия вихревого потока по поверхности задней части основной лопасти и увеличивается область возникновения подъёмной силы на поверхности дополнительной лопасти.

**Геометрические параметры профиля билопастного воздушного винта.** Билопастной воздушный винт имеет двойную поверхность течения воздуха. Геометрические параметры билопастного воздушного винта представлены на рисунке 2. Геометрическими параметрами профиля основной лопасти являются длина хорды, радиус кривизны верхней и нижней поверхности, средняя линия, передняя и задняя кромки. Геометрическими параметрами профиля дополнительной лопасти являются длина хорды, угол установки лопасти, положение центра вращения.

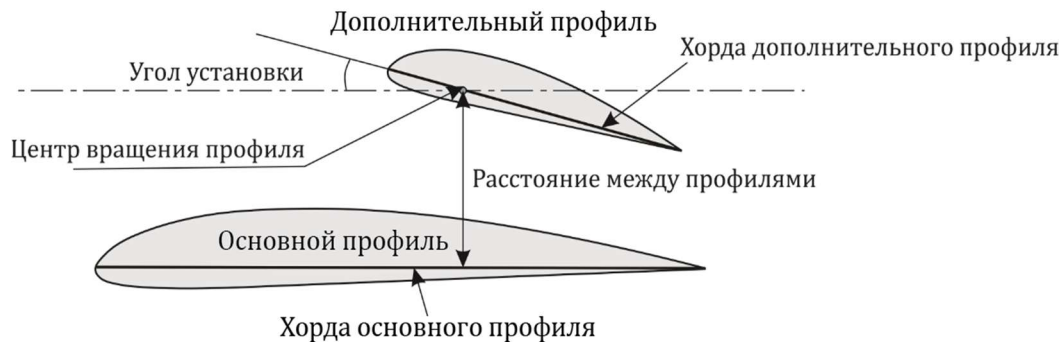


Рисунок 2 – Основные геометрические параметры профиля билопастного воздушного винта

На аэродинамическое качество билопастного воздушного винта оказывают влияние такие геометрические параметры, как расстояние между основной и дополнительной лопастями и их относительное расположение.

**Влияние расположения дополнительной лопасти на аэродинамическое качество билопастного воздушного винта.** Для исследования влияния расположения дополнительной лопасти на характеристики воздушного течения и величину аэродинамических сил, возникающих на билопастном винте, было выбрано три варианта расположения дополнительной лопасти над основной лопастью. Эти варианты представлены на рисунке 3.

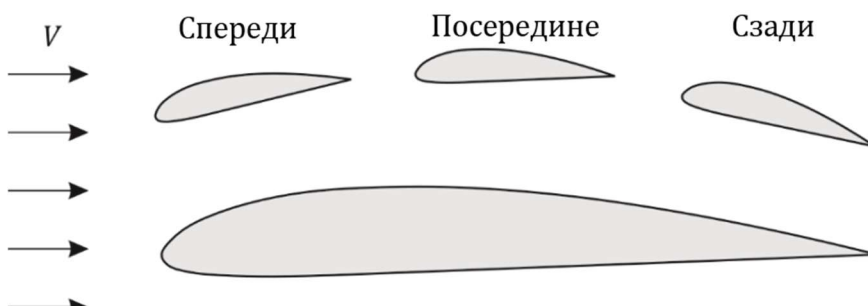


Рисунок 3 – Три варианта расположения дополнительной лопасти билопастного воздушного винта

Моделирование разных вариантов билопастного воздушного винта с изменением всех геометрических характеристик выполнено в программном комплексе SolidWorks. Модели были экспортированы в программу ANSYS Fluent, где было проведено моделирование скоростного воздушного течения в аэродинамической трубе при малых числах Рейнольдса.

При нулевом угле атаки ( $0^\circ$ ) ламинарное течение не изменяется как на обычном, так и на билопастном воздушном винте. Выявлено, что на билопастном воздушном винте характеристики течения воздуха повышены, а аэродинамические показатели улучшились по сравнению с обычным винтом.

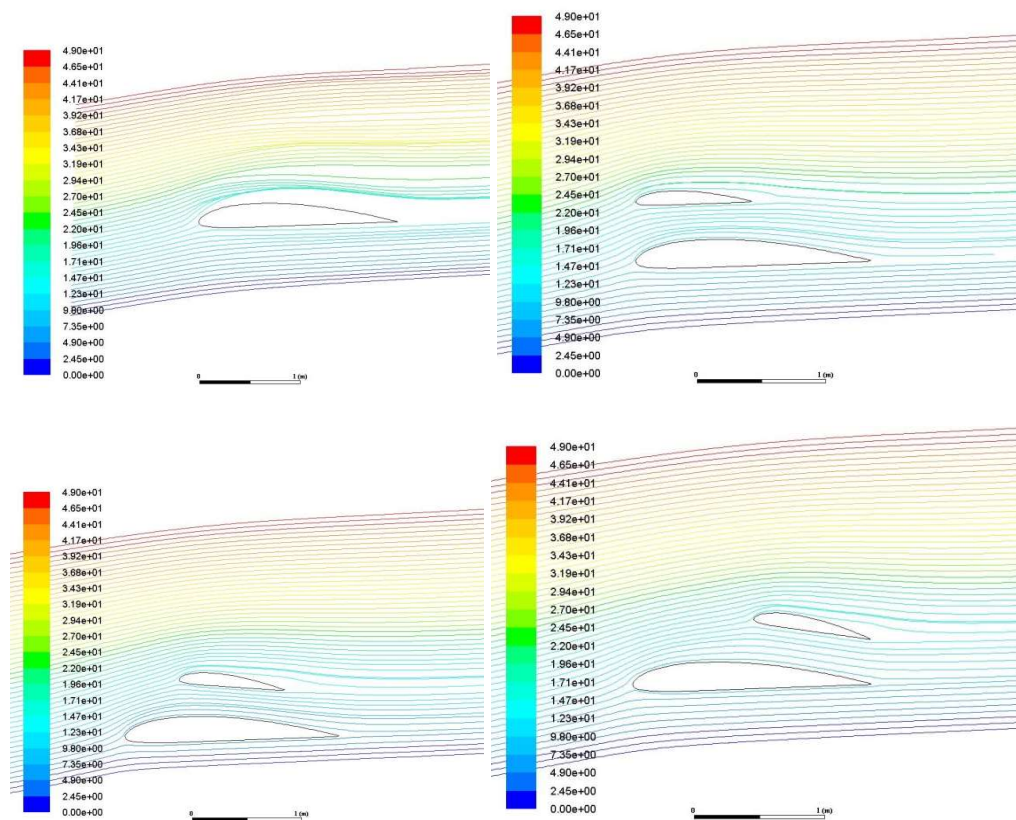


Рисунок 4 – Ламинарное течение при угле атаки  $6^\circ$

При увеличении угла атаки у профиля дополнительной лопасти возникает область перемещения ламинарного течения (рисунок 4). При увеличении угла атаки до  $10^\circ$  область перемещения ламинарного течения возникает у основного профиля винта. Кроме того, независимо от угла атаки, ламинарное течение над дополнительной лопастью не меняется, что приводит к уменьшению вихрей в воздушном потоке. При уменьшении вихрей понижается крутящий момент.

**Кривые коэффициентов подъёмной силы.** Графики коэффициентов подъёмной силы для различных вариантов расположения дополнительной лопасти, а также для обычного винта показаны на рисунке 5.

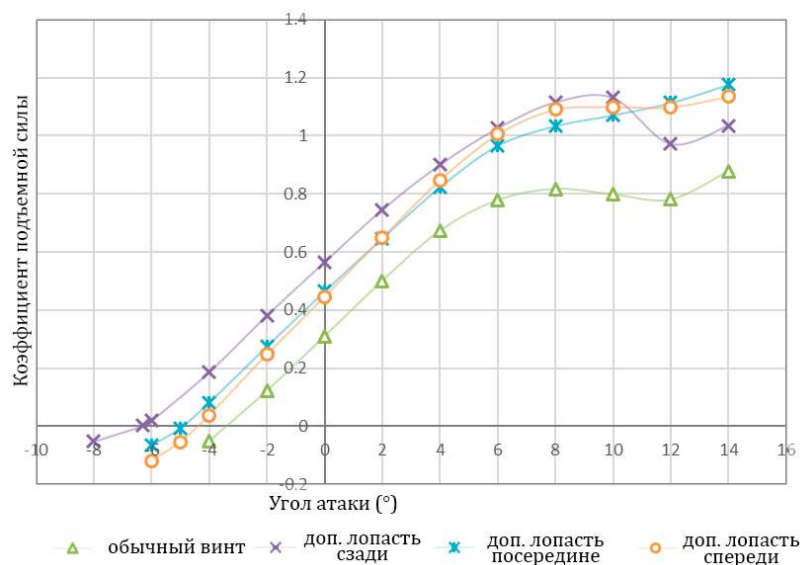


Рисунок 5 – Кривые коэффициентов подъемной силы обычного воздушного винта и билопастного воздушного винта

Из графика видно, что коэффициент подъемной силы на профилях билопастного воздушного винта выше, чем на профиле обычного винта. При углах атаки от  $8^\circ$  до  $10^\circ$  у би-лопастного винта с передним и средним расположением профилей дополнительной лопасти коэффициенты подъемной силы одинаковы, но меньше, чем у билопастного винта с задним расположением профиля дополнительной лопасти. При углах атаки выше  $10^\circ$  коэффициент подъемной силы билопастного винта с задним расположением профиля дополнительной лопасти резко падает. Это явление объясняется резким увеличением области и энергии турбулентности основной лопасти. Поэтому дальнейшие исследования проводились для билопастного винта с задним расположением дополнительной лопасти.

**Изготовление опытного образца билопастного воздушного винта на 3D-принтере.** Был выполнен чертёж опытного образца билопастного воздушного винта в пакете CAD и выбран профиль лопасти Clark Y (рисунок 6).

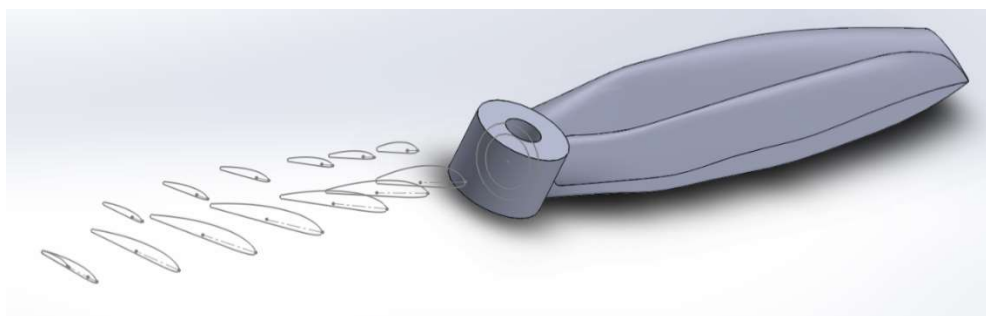


Рисунок 6 – Пространственный 3D-вид билопастного воздушного винта

Согласно трёхмерной модели с использованием картриджа из полимерного материала ABS диаметром 1,75 мм на 3D-принтере был напечатан билопастной

воздушный винт. Шероховатость несущих поверхностей билопастного винта зависит от качества печати 3D-принтера. Для проведения экспериментальных работ было изготовлено 20 экземпляров би-лопастного винта с различными геометрическими характеристиками: изменяющимся углом установки дополнительной лопасти относительно основной, расстоянием между лопастями и длиной хорды дополнительной лопасти.

**Эксперимент для определения статической тяги воздушного винта.** Для определения статической тяги билопастного воздушного винта был изготовлен стенд, представленный на рисунке 7. Для эксперимента на 3D-принтере изготовлен билопастной воздушный винт диаметром 260 мм. Диаметр втулки – 20 мм, профиль винта – Clark Y.

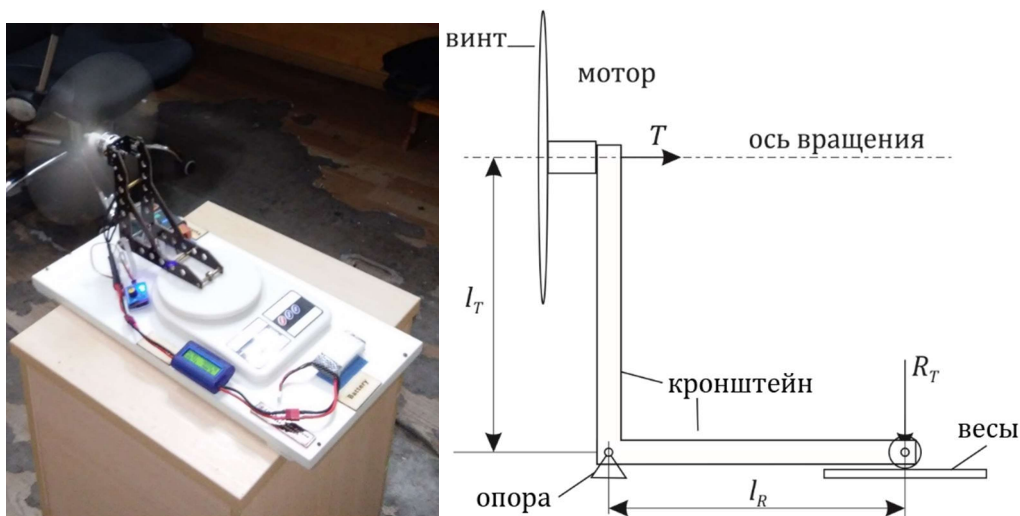


Рисунок 7 – Стенд и схема для определения статической тяги

Принцип работы стенда для определения статической тяги  $T$  основан на измерении давления с помощью весов. Механическая энергия двигателя от вала передается на винт, который с усилием  $R_T$  давит на весы, показывающие тягу винта в граммах. Зависимость тяги от коэффициента тяги определяется следующим образом [7]:

$$T = m_T \cdot 10^{-3} \cdot g ,$$

$$C_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} .$$

Здесь  $m_T$  – измеренное значение тяги (гр),  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность воздуха,  $n$  – частота вращения винта,  $D$  – диаметр винта.

На рисунке 8 представлена зависимость коэффициентов тяги обычного винта и билопастного винта одинаковых размеров от числа Рейнольдса.

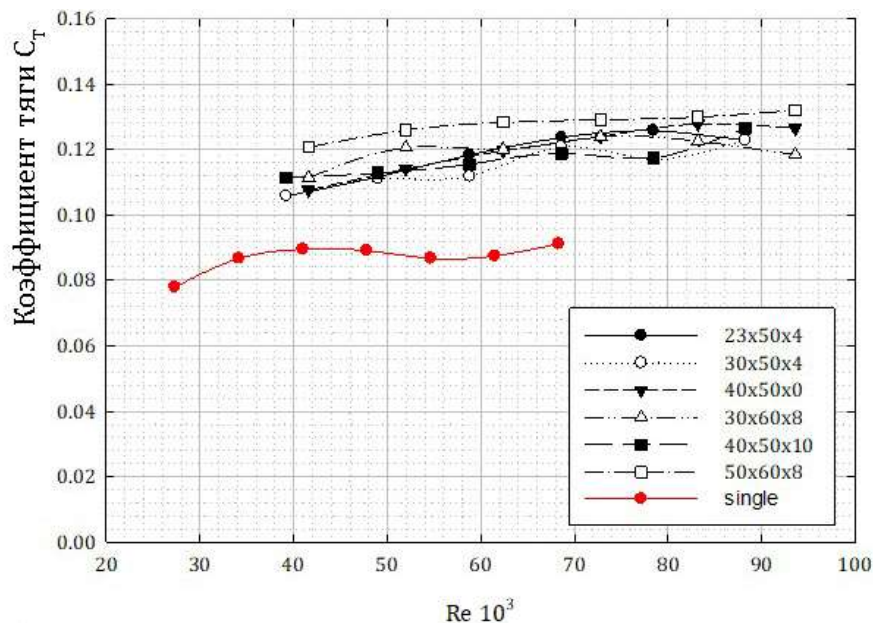


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента тяги простого воздушного винта и коэффициента тяги билопастного воздушного винта от числа Рейнольдса

Коэффициент тяги билопастного винта больше, чем коэффициент тяги обычного винта, на 0,04.

**Выводы.** Разработанная конструкция билопастного воздушного винта с дополнительной лопастью позволяет уменьшить отрыв ламинарного течения на задней кромке основной лопасти. Дополнительная лопасть, представляющая собой дополнительную несущую поверхность, не только гасит отрыв ламинарного течения, но и создает дополнительную аэродинамическую силу, чем повышает тягу. Благодаря разработке новой конструкции билопастного винта была решена задача по увеличению тяги винта. Кроме того, из-за дополнительной лопасти увеличивается коэффициент полезного действия винта.

#### Литература

1. Герасимов О.В. Расчет воздушного винта беспилотного летательного аппарата с учетом числа Рейнольдса и степени редукции / О.В. Герасимов, Б.С. Крицкий // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 200. – С. 79-85.
2. Mueller T.J. Aerodynamics of small vehicles / T.J. Mueller, J.D. DeLaurier // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2003. – Т. 35. – № 1. – С. 89–111.
3. Brandt J.B. Propeller performance data at low Reynolds numbers / J.B. Brandt, M.S. Selig // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting. – 2011.
4. Экспериментальное исследование зависимости характеристик воздушного винта от числа Рейнольдса / А.В. Липин [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. – Т. XXXVIII. – С. 57.
5. Отрыв потока на прямом крыле при повышенной внешней турбулентности / А. П. Брыляков [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. – 2004. – Т. XXXV.
6. Трунев А. Теория и константы пристенной турбулентности / А. Трунев // Научный журнал КубГАУ. – 2010. – № 58.
7. Deters R.W. Reynolds number effects on the performance of small-scale propellers / R.W. Deters, G.K. Ananda, M.S. Selig // 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. – 2014.
8. Selig M.S. Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines / M.S. Selig, B.D. McGranahan. – NREL/SR-500-34515. – 2004.

9. *Ruiz-Calavera L.P.* CFD based aeroelastic calculation of propeller loads / L.P. Ruiz-Calavera // 28th International congress of the aeronautical sciences. – 2012.
10. *Wald Q.R.* The aerodynamics of propellers / Q.R. Wald // Progress in Aerospace Sciences. – 2006. – № 42. – C. 85–128.
11. *Batzorigt E.* Bi-blade high efficiency propeller / E. Batzorigt, E. Yondon // ICMAR. – 2016.

#### References

1. *Gerasimov O.V., Kritskii B.S.* // Civil Aviation High Technologies. – 2014. – № 200. – C. 79–85.
2. *Mueller T.J., DeLaurier J.D.* // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2003. – V. 35. – No. 1. – P. 89–111.
3. *Brandt J.B., Selig M.S.* Propeller performance data at low Reynolds numbers // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting. – 2011.
4. *Lipin A.V. et al.* Eksperimentalnoe issledovanie zavisimosti kharakteristik vozdušnogo vinta ot chisla Reinoldsa // Uchyonye zapiski TsAGI. – V. XXXVIII. – P. 57.
5. *Brylyakov A.P. et al.* Otryv potoka na pryamom kryle pri povyshennoi vneshnei turbulentnosti // Uchyonye zapiski TsAGI. – 2004. – V. XXXV.
6. *Trunev A.* Teoriya i konstanty pristennoi turbulentnosti // Scientific Journal of KubSAU. – 2010. – No. 58.
7. *Deters R.W., Ananda G.K., Selig M.S.* Reynolds number effects on the performance of small-scale propellers // 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. – 2014.
8. *Selig M.S., McGranahan B.D.* Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines. – NREL/SR-500-34515. – 2004.
9. *Ruiz-Calavera L.P.* CFD based aeroelastic calculation of propeller loads // 28th International congress of the aeronautical sciences. – 2012.
10. *Wald Q.R.* // Progress in Aerospace Sciences. – 2006. – No. 42. – P. 85–128.
11. *Batzorigt E., Yondon E.* Bi-blade high efficiency propeller // ICMAR. – 2016.



# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

---

УДК 004.94

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО МОСТА ЧЕРЕЗ РЕКУ СУХАЯ

© **И. А. Арапова**, студент, **В. Ю. Курохтин**, старший преподаватель  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*Целью данной работы является проведение замены деревянной конструкции моста на стальную с последующим расчетом на прочность ферменной мостовой конструкции. Трехмерная модель моста была создана с использованием программных комплексов ANSYS, SolidWorks, SCAD Office. Был проведен расчет конструкции на прочность, по итогам которого выяснилось, что металлическая конструкция моста способна выдержать эксплуатационные нагрузки. Сделан вывод о целесообразности замены деревянной конструкции моста на металлическую.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, мост, пространственная ферма, прочностной расчет, SolidWorks, ANSYS, SCAD.

## COMPUTER MODELING OF THE DESIGN OF CAR BRIDGE OVER THE SUKHAYA RIVER

**I. A. Arapova**, student, **V. Yu. Kurokhtin**, senior lecturer  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., +7(3012)431415  
e-mail: kurokhtin91@gmail.com

*The aim of this work is to replace a wooden bridge structure with a steel one, followed by strength analysis of the truss bridge structure. The three-dimensional model of the bridge was created using the software systems ANSYS, SolidWorks, SCAD Office. A strength analysis of the structure was carried out, according to the results of which it became clear that the metal construction of the bridge is able to withstand operational loads. It is concluded that it is advisable to replace the wooden bridge structure with a metal one.*

**Keywords:** computer modeling, bridge, spatial truss, strength analysis, SolidWorks, ANSYS, SCAD.

Правительством Российской Федерации предусмотрено существенное развитие дорожной сети, что в свою очередь связано с мостостроением малых, средних и больших пролетов. Современное мостостроение на стадии проектирования требует высокой профессиональной подготовки инженеров-мостостроителей, имеющих большой опыт работы с конструкциями, методами расчета, в том числе с применением электронно-вычислительных машин. Во многом это связано с

созданием новых конструктивных решений, которые в основном направлены на проектирование металлических мостов минимальной металлоемкости [1]. В этой связи целью данной работы является проведение замены деревянной конструкции моста на стальную с последующим расчетом на прочность фермы в программных пакетах ANSYS, Solidworks, SCAD Office.

В качестве проектируемого объекта был выбран мост через р. Сухая на км 12+570 автомобильной дороги «Туран – водолечебница «Нилова Пустынь» – Хойто-Гол» в Тункинском районе Республики Бурятия. На основе проекта производится реконструкция деревянного моста, который находился в неудовлетворительном состоянии для эксплуатации. Деревянный мост будет заменен на аналогичный по размерам металлический мост САРМ. Средний автодорожный разборный мост САРМ разработан для создания новых и восстановления разрушенных высоководных мостов на автомобильных дорогах в короткий период времени [2]. Расчет ферменной конструкции моста на прочность позволяет найти недостатки конструкции моста на стадии проектирования, для того чтобы в ходе эксплуатации не произошло обрушения конструкции [3]. Значения нагрузок, которые были использованы при расчетах в программных комплексах, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения нагрузок

Название	Значение
Ветровая нагрузка	32 кгс/м <sup>2</sup>
Снеговая нагрузка	56 кгс/м <sup>2</sup>
Нормативное давление грунта от веса насыпи опоры мостов	8.85 кН
Нормативная временная нагрузка от воздействия автомобилей	класс Н13
Нагрузка от пешеходов	300 кгс/м <sup>2</sup>

Автомобильная нагрузка принимается состоящей из расчетных колонн автомобилей, установленных на проезжей части сооружения в невыгоднейшем положении, при этом продольные оси всех автомобилей должны быть параллельны продольной оси сооружения.

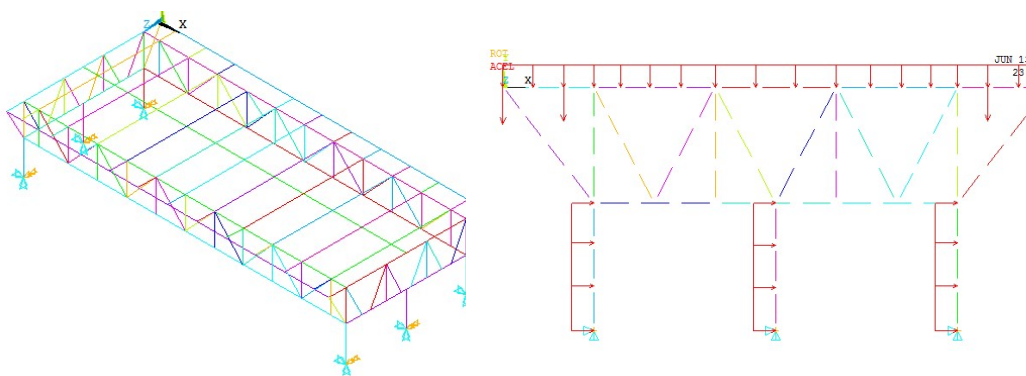
Расчетная колонна принимается состоящей из ряда автомобилей, следующих друг за другом в установленном порядке, расстояние между автомобилями 8 м, расстояние между осью колес 4 м; автомобили имеют одинаковый вес, за исключением одного (утяжеленного), вес которого превышает вес нормального на 30 %. Основные показатели для автомобилей нагрузки Н13 представлены в таблице 2. Настил тротуара, помимо расчета на нормативную нагрузку от толпы, должен быть проверен на сосредоточенный груз равный 130 кг [4].

Таблица 2 – Показатели для автомобилей расчетной колонны для нагрузки класса Н13

Наименование основных показателей	Утяжеленный автомобиль	Нормальный автомобиль
Вес нагруженного автомобиля, т	169	13

Давление на заднюю ось, т	12,35	9,1
Давление на переднюю ось, т	4,55	3,9
Ширина кузова, м	2,7	2,7
База автомобиля, м	4	4

Для выполнения расчетов конструкции САРМ была использована программа ANSYS. В данной программе было выполнено объемное построение расчетной схемы мостовой конструкции согласно рисунку 1а. Для оптимизации анализа конструкции моста было принято решение создать в Ansys расчетную схему в виде плоской фермы и произвести необходимые расчеты. На этапе задания нагрузок происходит нагружение элементов, с помощью опций осуществляется выбор шага по нагрузке, затем следует получение результатов расчетов [5]. К плоской ферме приложены нагрузки, которые были рассмотрены ранее в таблице 1 (рисунок 1б).



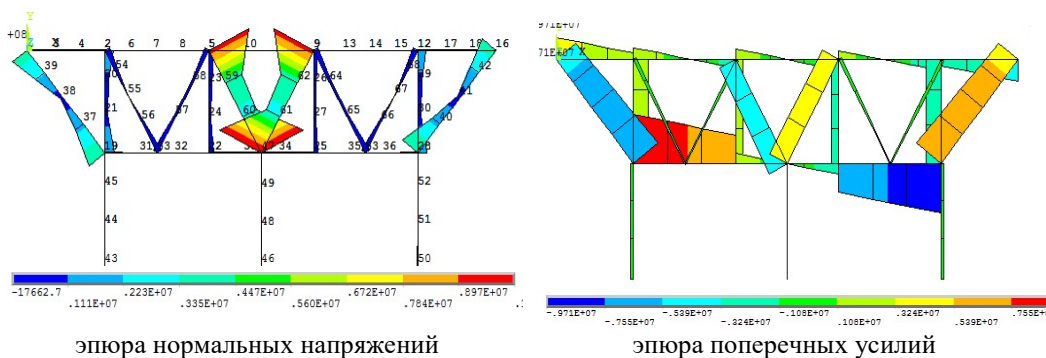
а

б

а – пространственная схема конструкции моста, б – поперечное сечение моста в виде плоской фермы с приложенными нагрузками и закреплениями

Рисунок 1

После выполнения решения на экран можно вывести результаты расчета в виде эпюр (рисунок 2).



эпюра нормальных напряжений

эпюра поперечных усилий

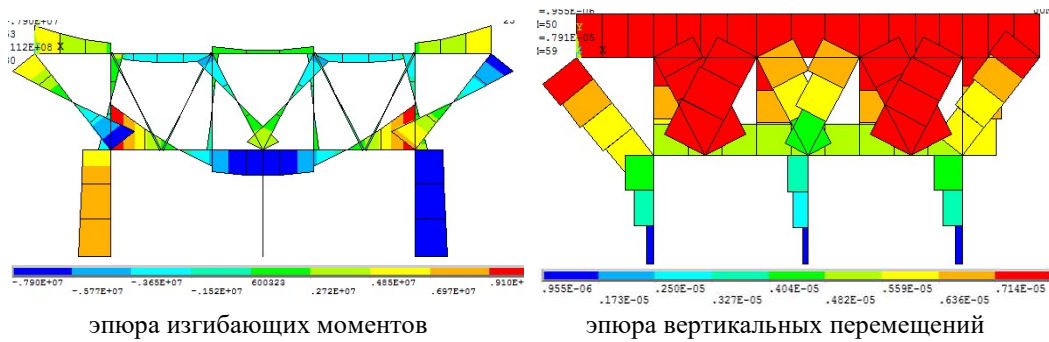


Рисунок 2

В программе SolidWorks была создана 3D-модель моста согласно всем заданным размерам (в соответствии с рисунком 3).

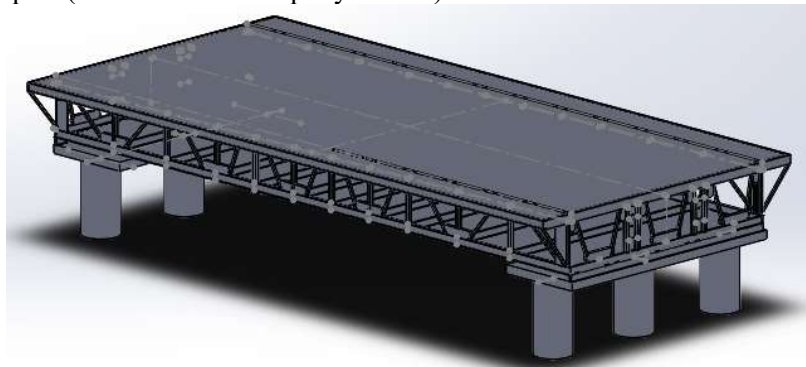
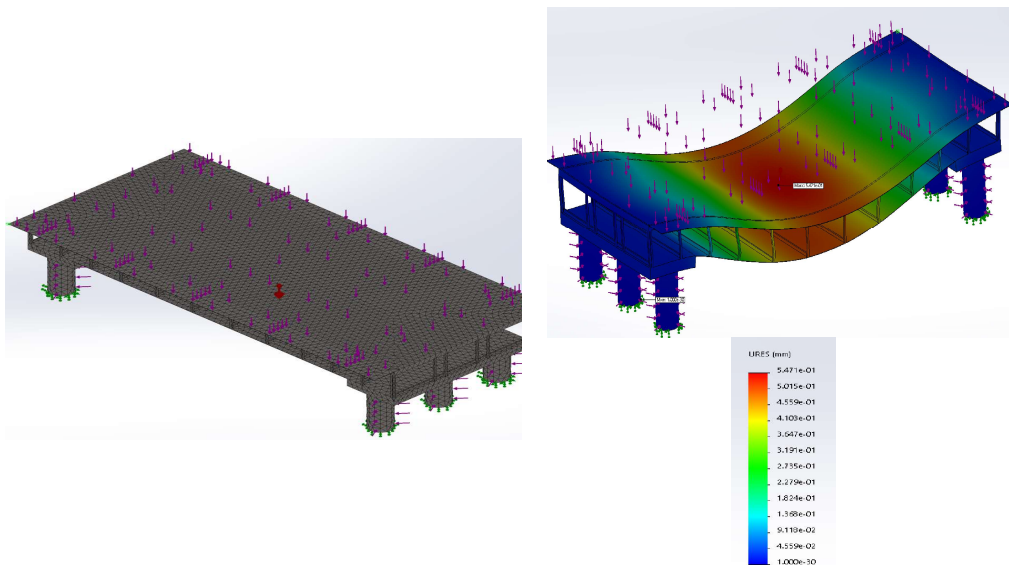
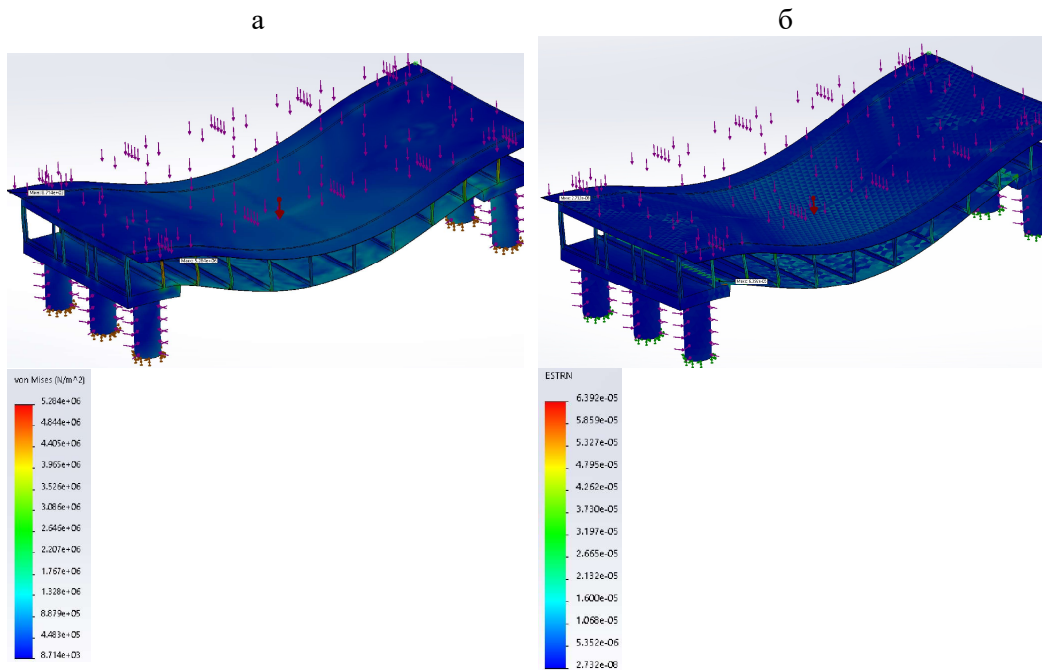


Рисунок 3

После разбиения модели на конечные элементы (рисунок 4а) и окончания расчёта программа выдает распределение перемещений, напряжений и деформаций в конструкции [6] (рисунки 4б-4г).

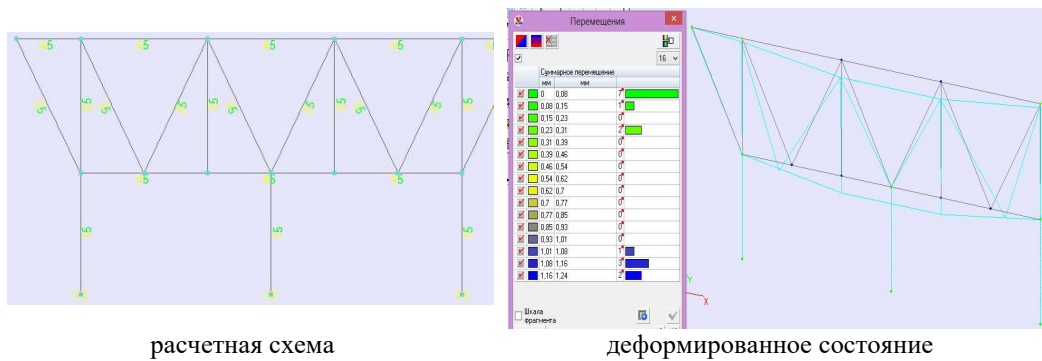


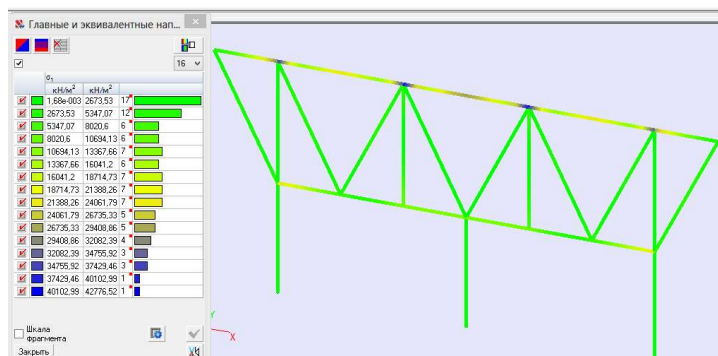


а – конечно-элементная модель моста с приложенными нагрузками и закреплениями, б – распределение перемещений в конструкции, в – распределение напряжений в конструкции, г – распределение деформаций в конструкции

Рисунок 4

Для сравнения результатов расчетов было выполнено построение плоской фермы и дальнейший ее расчет в программе SCAD (рисунок 5).





распределение суммарных напряжений  
Рисунок 5

Для анализа результатов, полученных в ходе решения в программных комплексах Ansys, SolidWorks, SCAD, все полученные данные объединены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов в программных комплексах

Параметр		Программный комплекс		
		ANSYS	SolidWorks	SCAD
Перемещение	Максимальное	7,97 мм	0,547 мм	1.24 мм
	Минимальное	1,34 мм	0	0
Нормальное напряжение	Максимальное	1010 кН/м <sup>2</sup>	5284 кН/м <sup>2</sup>	42776 кН/м <sup>2</sup>
	Минимальное	-17 кН/м <sup>2</sup>	8,714 кН/м <sup>2</sup>	1,68 · 10 <sup>-3</sup> кН/м <sup>2</sup>
Запас прочности	Максимальное	-	1,174 · 10 <sup>2</sup>	-
	Минимальное	-	7,12 · 10 <sup>4</sup>	-
Изгибающий момент	Максимальное	11,2 кН · м	-	4,24 кН · м
	Минимальное	-7,9 кН · м	-	-6,01 кН · м

Проведя анализ всех полученных данных, можно сделать вывод о том, что мост САРМ является достаточно прочным и способен выдержать нагрузки, которые будут действовать во время его эксплуатации. Замена деревянного моста на САРМ является целесообразной и дает новые возможности при строительстве и эксплуатации.

Наиболее удобной программой для моделирования и расчетов является SolidWorks, так как она позволяет создавать сборные конструкции из отдельных деталей и проводить все необходимые расчеты.

#### Литература

1. Картопольцев В.М. Проектирование металлических мостов / В.М. Картопольцев, С.А. Пуризова. – Томск: Издательство Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2012. – 96 с.
2. Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.029-2013. Методические рекомендации по использованию комплекта среднего автодорожного разборного

моста (САРМ) на автомобильных дорогах в ходе капитального ремонта и реконструкции капитальных искусственных сооружений. – Москва: Росавтодор, 2013. – 61 с.

3. Курохтин В. Ю. Определение усталостных прочностных характеристик авиационных изделий на основе ресурсных испытаний / В. Ю. Курохтин // Механики XXI века: научное периодическое издание по материалам XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (13–14 мая 2015 г., г. Братск). – Братск: Издательство БрГУ, 2015. – С. 22-28.

4. Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах Н-106-53. – Москва: Госстройиздат, 1953. – 17 с. – Введены 01.04.1953.

5. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Шамраева. – Москва: Libroком, 2015. – 270 с.

6. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК-Пресс, 2010. – 784 с.

#### References

1. Kartopol'tsev V.M., Purizova S.A. Proektirovanie metallicheskih mostov. – Tomsk: Tomsk state university of architecture and building press, 2012. – 96 p.

2. Industrial road methodical document ODM 218.2.029-2013. Metodicheskie rekomendatsii po ispolzovaniyu komplekta srednego avtodorozhnogo razbornogo mosta (SARM) na avtomobilnykh dorogakh v khode kapitalnogo remonta i rekonstruktsii kapitalnykh iskusstvennykh sooruzhenii. – Moscow: Rosavtodor, 2013. – 61 p.

3. Kurokhtin V.Yu. // Mechanical engineers to XXI century: proceedings of XIV All-Russian scientific and technical conference with international participation (May 13-14, 2015, Bratsk). – Bratsk: Bratsk state university press, 2015. – P. 22-28.

4. Normy podvizhnykh vertikalnykh nagruzok dlya raschyota iskusstvennykh sooruzhenii na avtomobilnykh dorogakh N-106-53. – Moscow: Gosstroizdat, 1953. – 17 p. – Introduced 01.04.1953.

5. Kaplun A.B., Morozov E.M., Shamraeva M.A. ANSYS v rukakh inzhenera. Prakticheskoye rukovodstvo. – Moscow: Librokom, 2015. – 270 p.

6. Alyamovskii A.A. COSMOSWorks. Osnovy raschyota konstruktsii na prochnost v srede SolidWorks. – Moscow: DMK-Press, 2010. – 784 p.

УДК 519.61

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ

© Т. А. Ашыров, студент

Витебский государственный университет имени П. М. Машерова

210038, Беларусь, г. Витебск, Московский проспект, 33

E-mail: t.asyrow99@gmail.com

*В статье рассмотрены уравнение теплопроводности, задача Стефана в трехмерном случае при процессе плавления проволоки от точечного источника тепла.*

**Ключевые слова:** стержень, диффузия, фаза.

## MATHEMATICAL MODELING OF HEAT CONDUCTION PROCESSES DURING METAL MELTING

T. A. Ashyrov, student

P. M. Masherov Vitebsk State University

*The article considers the equation of heat conduction, the Stefan problem in the three-dimensional case during the process of melting wire from a point source of heat.*

**Keywords:** rod, diffusion, phase.

Решение задачи распределения температур в металлах и особенно в сплавах сопряжено с появлением ряда дополнительных задач. В частности, необходимо учитывать изменение фазовых состояний в отдельных областях, диффузию (и, как следствие, изменения состава и его свойств), а также значительные изменения формы материала, связанные с его плавлением.

Как следствие, математическая модель, описывающая процессы, возникающие при значительном точечном нагреве обыкновенной проволоки, становится чрезмерно сложной.

Уравнение теплопроводности для трехмерного случая представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных [1]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + f(x, y, z),$$

где  $f(x)$  или  $f(x, y, z)$  – некоторая функция источника тепла (которая сама может быть температурой) и времени, координаты  $x, y, z$ ,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $k = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коэффициент тепло-

проводности. Множителем при частных производных по пространственным координатам  $k(u)$  является коэффициент диффузии, и чем больше этот коэффициент, тем быстрее распространяется тепло в среде – в данном случае в стержне. Коэффициент диффузии  $k$  сам может быть функцией от температуры  $U$ .

Для моделирования процессов о фазовом переходе рассматривается задача Стефана.

Металлы, находящиеся в различных фазовых состояниях, имеют различные коэффициенты теплопроводности, получаем сопряженные области с различными коэффициентами, границы движутся в результате фазового перехода.

Задача Стефана в трехмерном двухфазном случае. Фазовый переход происходит при заданной температуре  $T$ . Пусть фазовый переход происходит на границе раздела фаз, которую мы обозначим  $\xi = \xi(t)$ . Эту границу разделим на две границы  $\xi^+(t)$  и  $\xi^-(t)$ .  $\xi^+(t)$  – это область, которая занята жидкой фазой, где температура превышает температуру фазового перехода, и описываемая выражением  $\xi^+(t) = \{(x, y, z) \in \xi, T(x, y, z) > T\}$ ;  $\xi^-(t)$  – это область, занятая твердой фазой и описываемая выражением  $\xi^-(t) = \{(x, y, z) \in \xi, T(x, y, z) < T\}$ . Запишем уравнение теплопроводности в твердой фазе [2]:



$$c^- \rho^- \frac{\partial T^-}{\partial t} = \operatorname{div}(k^- \operatorname{grad} T^-) + f^-, \quad (x, y, z) \in Q^-.$$

Для жидкой фазы:

$$c^+ \rho^+ \frac{\partial T^+}{\partial t} = \operatorname{div}(k^+ \operatorname{grad} T^+) + f^+ \quad (x, y, z) \in Q^+.$$

Так, в случае двух фаз 1 и 2 распределение температуры в них описывается уравнениями [3]

$$c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(k_1 \cdot \operatorname{grad} T) + f_1, \quad T < T^*;$$

$$c_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(k_2 \cdot \operatorname{grad} T) + f_2, \quad T > T^*.$$

В случае, если точка лежит на поверхности фазового перехода,  $\bar{r} = \bar{R}$  и  $\xi(\bar{R}(t), t) = 0$ . Условие теплового баланса (условие Стефана) на поверхности фазового перехода задается в виде [4]:

$$\left( (\lambda \cdot \operatorname{grad} T)_1 - (\lambda \cdot \operatorname{grad} T)_2, \operatorname{grad} \xi \right) + L \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0, \quad T = T^*,$$

где  $L$  – энтальпия фазового перехода.

На внешних поверхностях областей, занятых соответственно фазами 1 и 2, заданы граничные условия для моментов времени  $t > 0$ ; задано также начальное распределение температуры при  $t = 0$ .

Для решения будем использовать численные методы. В основу положим воксельное представление формы исходного объекта. Минимальный линейный размер области, имеющей одинаковую фазу, и, соответственно, размер вокселя примем за 0,5 мкм.

Каждый выделенный элемент имеет собственное фазовое состояние, температуру и молекулярный состав, что позволит после каждой итерации перестраивать сетку и сохранять изначальный объем исходного материала.

#### Литература

1. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Издательство ТПУ, 2007. – 172 с.
2. Рубцов Н.А. Однофазная задача Стефана для полупрозрачной среды с учетом отражения излучения / Н.А. Рубцов, Н.А. Саввинова, С.Д. Слепцов // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10. – № 2. – С. 255-264.
3. Павлов А.Р. Решение задачи Стефана сведением ее к задаче теплопроводности с движущимся источником тепла / А.Р. Павлов, Е.А. Слепцова // Математические заметки СВФУ. – 2005. – Т. 12. – С. 87-94.
4. Квазилинейное уравнение теплопроводности в 3D и задача Стефана в вечномерзлых грунтах в рамках конечно-разностной схемы переменных направлений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.simmakers.ru/kvazilineinoe-uravnenie-teploprovodnosti/> (дата обращения 29.07.2019).

5. Парфентьева Н.А. Решение задачи Стефана при промерзании трубопроводов / Н.А. Парфентьева, О.Д. Самарин // Вестник МГСУ. – 2007. – № 1. – С. 67-70.

6. Данилюк И.И. О задаче Стефана / И.И. Данилюк // Успехи математических наук. – 1985. – Т. 40. – Выпуск 5 (245). – С. 133-185.

7. Шиловский М.В. Метод решения задачи Стефана с использованием несогласованных сеток / М.В. Шиловский // Материалы XI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – Новосибирск, 2010. – 80 с.

#### References

1. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti. – Tomsk: Tomsk polytechnic university press, 2007. – 172 p.

2. Rubtsov N.A., Savvinova N.A., Speptsov S.D. // Thermophysics and Aeromechanics. – 2003. – V. 10. – No. 2. – P. 255-264.

3. Pavlov A.R., Sleptsova E.A. // Mathematical notes of NEFU – 2005. – V. 12. – P. 87-94.

4. Kvazilineinoe uravnenie teploprovodnosti v 3D i zadacha Stefana v vechnomyozrylykh gruntakh v ramkax konechno-raznostnoi skhemy peremennykh napravlenii [Electronic resource]. – URL: <https://blog.simmakers.ru/kvazilineinoe-uravnenie-teploprovodnosti/> (date of the application 29.07.2019).

5. Parfentjeva N.A., Samarina O.D. // Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture. – 2007. – No. 1. – P. 67-70.

6. Danilyuk I.I. // Russian Mathematical Surveys. – 1985. – V. 40. – Issue 5. – P. 133-185.

7. Shilovskii M.V. Metod resheniya zadachi Stefana s ispolzovaniem nesoglasovannykh setok // Proceedings of XI Vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchyonykh po matematicheskomu modelirovaniyu i informatsionnym tekhnologiyam. – Novosibirsk, 2010. – 80 p.

УДК 539.3, 004.04

### СПОСОБ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВИДЕОДАНЫХ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ В ОБРАЗЦАХ

© С. А. Базарон

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670033, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, строение 1  
E-mail: seseg003@gmail.com

*Предложен способ обработки видеозаписи разрушения образцов с целью определения скорости роста трещин в процессе усталостного разрушения. Разработанный алгоритм был реализован на языке программирования Python. Проведены вычислительные эксперименты, в результате которых были определены геометрические параметры трещин и скорость изменения их габаритов.*

**Ключевые слова:** развитие трещины, программирование, моделирование.

### METHOD FOR PROCESSING EXPERIMENTAL VIDEO DATA OF CRACK GROWTH IN SAMPLES

S. A. Bazaron

East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya St., 40v, building 1  
E-mail: seseg003@gmail.com

*An algorithm has been developed for processing video records of specimens' fracture in order to determine the growth rate of cracks in the process of fatigue fracture. The developed algorithm was implemented in the Python programming language. Computational experiments were carried out, as a result of which the geometric parameters of the cracks and the rate of change of their dimensions were determined.*

**Keywords:** crack development, programming, modeling.

**Введение.** Во всех отраслях машиностроения, особенно там, где аварии вследствие разрушения ответственных деталей ведут к катастрофическим последствиям, существует проблема своевременного обнаружения и предотвращения усталостных разрушений. В работе [1] описана методика распознавания трещин в изделиях авиационной техники. На основе данной работы был разработан и реализован способ обработки видеозаписи развития трещины в образцах.

Постановка задачи.

Исходные данные – видеозапись развития трещины ( $V$ ).

Необходимо обработать видеозапись  $V$ .

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести кадрирование видеозаписи (получить множество  $Cdr$ ),
- 2) провести анализ полученных кадров (анализ множества  $Cdr$ ).

**Кадрирование видеозаписи.** Для кадрирования видеозаписи можно воспользоваться готовыми программами, например специальной программой Free Video to JPG Converter.

В результате кадрирования видеозаписи было получено 13 кадров, т.е. было получено множество  $Cdr$ , мощность которого равна  $|Cdr| = 13$ . Пример кадра приведен на рисунке 1.

**Анализ кадров.** Анализ полученных кадров будем проводить по следующему алгоритму:

- 1) бинаризация кадра, т.е. преобразование цветного изображения в черно-белое;
- 2) определение границ трещины;
- 3) определение геометрических параметров трещины (длина  $d$ , площадь  $S$ ).



Рисунок 1 – Фрагмент кадра с трещиной

Для бинаризации и определения границ трещины была написана компьютерная программа на языке программирования Python [2], фрагмент листинга которой приведен на рисунке 2. Порог бинаризации был принят равным  $P = 100$ .

```

import random
from PIL import Image, ImageDraw #Подключим необходимые библиотеки.
def ProcessImage(f):
    FileName="New/"+f+".jpg"
    image = Image.open(FileName) #Открываем изображение.
    draw = ImageDraw.Draw(image) #Создаем инструмент для рисования.
    width = image.size[0] #Определяем ширину.
    height = image.size[1] #Определяем высоту.
    pix = image.load() #Выгружаем значения пикселей.
    print (height)
    print (width)
    P = 100

    for i in range(width):
        for j in range(height):
            a = pix[i, j] [0]
            b = pix[i, j] [1]
            c = pix[i, j] [2]
            s = (a + b + c) // 3
            if S>P:
                draw.point((i, j), (255, 255, 255))
            else:
                draw.point((i, j), (0, 0, 0))
pr="Process/"+f+"-BW.jpg"
pr1="Process/"+f+".txt"
pr2="Process/"+f+"1.txt"
image.save(pr, "JPEG")
myfile = open(pr1, "w")
img=[]
for i in range(width):
    v=[]
    for j in range(height):
        a = pix[i, j] [1]
        if a==0:
            v.append(1)
            myfile.write(str(1))
        else:
            v.append(0)
            myfile.write(str(0))
    img.append(v)
    myfile.write("\n")
del draw

```

Рисунок 2 – Листинг программы бинаризации изображения

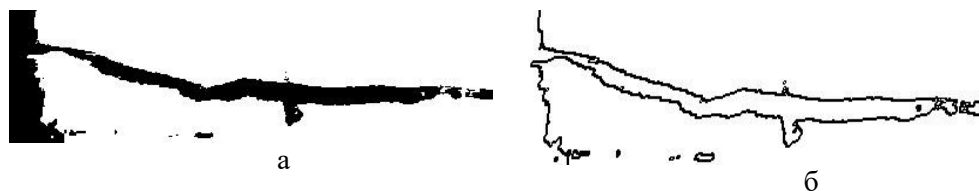
Для определения границ трещины экспериментальным путем были выделены две маски для фильтрации изображения согласно (1) – вертикальный и горизонтальный градиентные фильтры Собеля [3].

$$IPL\_SOBEL\_3x3\_V = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$IPL\_SOBEL\_3x3\_H = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$$

В результате работы программы для каждого изображения  $Cdr_i$  были получены 4 файла:  $i$ -BW.jpg – бинарное изображение,  $i$ -gr.jpg – границы изображения,  $i$ .txt – матрица бинарного изображения  $F$ ,  $il$ .txt – матрица граничного изображения  $V$ .

Примеры изображений, полученных в результате работы программы, приведены на рисунке 3.



а – бинарное изображение, б – границы трещины  
Рисунок 3 – Бинаризованная трещина и ее границы

Для определения геометрических параметров трещины также была написана программа, которая обрабатывает матрицу бинарного изображения  $F$  и матрицу граничного изображения  $V$ .

Длина  $d$  определяется по формуле (2), а площадь трещины  $S$  – по формуле (3).

$$d = \begin{cases} \sum_i \sum_j 1, & \text{если } v[i, j] \neq 0 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $v[i, j] \in V$  – элемент матрицы граничного изображения.

$$S = \begin{cases} \sum_i \sum_j f[i, j], & \text{если } f[i, j] = 1 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $f[i, j] \in F$  – элемент бинарной матрицы.

В результате работы программы получаем два файла: `dlina.txt` и `ploshchad.txt`.

Полученные данные в дальнейшем можно использовать для определения динамики роста трещины.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки России, проект № 9.11221.2018/11.12.

#### Литература

1. Бохоева Л.А. Исследование роста трещин в изделиях авиатехники на основе натуральных испытаний / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, В.Е. Рогов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. – 2016. – № 2-3. – С. 63-68.
2. PIL на Python от простого к сложному [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/451074/> (дата обращения 08.08.2019).
3. Введение в цифровую обработку сигналов и изображений: повышение качества и оценивание геометрических параметров изображений: учебное пособие / В.А. Сойфер [и др.]. – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2006. – 108 с.

#### References

1. Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Rogov V.E. // BSU bulletin. Chemistry. Physics. – 2016. – No. 2-3. – P. 63-68.
2. PIL na Python ot prostogo k slozhnomu [Electronic resource]. – URL: <https://habr.com/ru/post/451074/> (date of the application 08.08.2019).

3. *Soifer V.A. et al. Vvedenie v tsifrovuyu obrabotku signalov i izobrazhenii: povyshenie kachestva i otsenivanie geometricheskikh parametrov izobrazhenii. – Samara: Samara State Aerospace University Press, 2006. – 108 p.*

УДК 539.1.01

### **РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© **С. А. Базарон, С.С. Гуртовой**

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670033, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, строение 1  
E-mail: [seseg003@gmail.com](mailto:seseg003@gmail.com)

*Космический мусор – это все инородные объекты и их осколки в космосе, которые уже не эксплуатируются, не работают и больше не смогут служить полезным целям, но являются причиной механического негативного воздействия на находящиеся в эксплуатации космические аппараты. В работе проведен расчет на прочность защитного экрана для космического аппарата. Расчет на прочность выполнен в программном комплексе ANSYS. Также проведены расчеты жесткостных характеристик слоистого пакета.*

**Ключевые слова:** защитные экраны, космический мусор, космический аппарат, слоистые пластины.

### **STRENGTH CALCULATION OF A PROTECTIVE SCREEN FOR A SPACECRAFT FROM LAYERED COMPOSITE MATERIALS**

**S. A. Bazaron, S. S. Gurtovoi**

East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya St., 40v, building 1  
E-mail: [seseg003@gmail.com](mailto:seseg003@gmail.com)

*Space debris is all foreign objects and their fragments in space that are no longer in operation, no longer working and will no longer be able to serve useful purposes, but are the cause of mechanical negative effects on the spacecraft in use. Strength calculation of the protective screen for the spacecraft is carried out in the paper. Strength calculation is performed in the ANSYS software package. The stiffness characteristics of the layered package were also calculated.*

**Keywords:** protective screens, space debris, spacecraft, layered plates.

**Введение.** Проблема засорения околоземного космического пространства «космическим мусором» как чисто теоретическая возникла по существу сразу после запусков первых искусственных спутников Земли в конце пятидесятых годов. На данный момент на рынке мало защитных экранов, удовлетворяющих таким критериям как: малый вес, высокая прочность. Как правило, из-за высокой прочности используют тяжелые металлы, которые стоят достаточно много [1]. А использование слоистых композиционных материалов может решить проблему веса, при этом сохраняя одинаковую прочность [2].

**Расчет жесткостных характеристик.** Слоистые композитные элементы конструкций изготавливают из нескольких монослоев, ориентируя их в разных

направлениях. Многослойный пакет образует монолитный неоднородный материал с некоторыми прочностными и жесткостными характеристиками. Требуемые значения этих характеристик достигаются соответствующим подбором структурных параметров, таких как число слоёв  $n$ , их толщины  $\delta$ , углы ориентации  $\varphi$ .

Для расчета на прочность в программном комплексе ANSYS Workbench необходимо рассчитать прочностные характеристики пакета композиционного материала. Данный расчет был проведен в программе MathCad [3].

Ниже приведён пример расчета жесткостных характеристик трехслойного пакета углепластика с заданными характеристиками:

Исходные данные:

Модули упругости углепластика:  $E_1 = 11600$ ,  $E_2 = 1000$ .

Модуль сдвига углепластика:  $G_{12} = 380$ .

Коэффициент Пуассона углепластика:  $\mu_{12} = 0,28$ .

Толщина одного слоя углепластика:  $\delta = 1$ .

Расчет жесткостных характеристик пакета из трех слоев углепластика с направлением углов  $[0;90;45]$ :

$$\mu_{21} = \mu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1}; \quad \mu_{21} = 0.024;$$

$$\lambda = \frac{1}{1 - \mu_{12} \cdot \mu_{21}} \rightarrow \lambda = 1,0068;$$

$$K = 1; \quad \phi = 0; \quad n_1 = 1;$$

$$C_{111} = \lambda \cdot \left( E_1 \cdot \cos(\varphi)^4 + E_2 \cdot \sin(\varphi)^4 \right) + \frac{1}{2} \cdot \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \sin(2\varphi)^2 + G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{111} = 1.168 \cdot 10^4;$$

$$C_{122} = \lambda \cdot \left( E_1 \cdot \sin(\varphi)^4 + E_2 \cdot \cos(\varphi)^4 \right) + \frac{1}{2} \cdot \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \sin(2\varphi)^2 + G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{122} = 1.007 \cdot 10^3;$$

$$C_{112} = \lambda \cdot \left[ (E_1 + E_2) \cdot \cos(\varphi)^2 \cdot \sin(\varphi)^2 + \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \left( \cos(\varphi)^4 + \sin(\varphi)^4 \right) \right] - G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{112} = 281.905;$$

$$C_{166} = \frac{\lambda \cdot \sin(2 \cdot \varphi)^2}{4} \cdot (E_1 + E_2 - 2 \cdot \mu_{12} \cdot E_2) + G_{12} \cdot \cos(2 \cdot \varphi)^2 \rightarrow C_{166} = 380;$$

$$K = 2; \varphi = \frac{\pi}{2}; n_2 = 1;$$

$$C_{211} = \lambda \cdot (E_1 \cdot \cos(\varphi)^4 + E_2 \cdot \sin(\varphi)^4) + \frac{1}{2} \cdot \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \sin(2\varphi)^2 + G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{211} = 1.007 \cdot 10^3;$$

$$C_{222} = \lambda \cdot (E_1 \cdot \sin(\varphi)^4 + E_2 \cdot \cos(\varphi)^4) + \frac{1}{2} \cdot \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \sin(2\varphi)^2 + G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{222} = 1.168 \cdot 10^4;$$

$$C_{212} = \lambda \cdot \left[ (E_1 + E_2) \cdot \cos(\varphi)^2 \cdot \sin(\varphi)^2 + \mu_{12} \cdot E_2 \cdot (\cos(\varphi)^4 + \sin(\varphi)^4) \right] - G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{212} = 281.905;$$

$$C_{166} = \frac{\lambda \cdot \sin(2 \cdot \varphi)^2}{4} \cdot (E_1 + E_2 - 2 \cdot \mu_{12} \cdot E_2) + G_{12} \cdot \cos(2 \cdot \varphi)^2 \rightarrow C_{266} = 380;$$

$$K = 3; \varphi = \frac{\pi}{4}; n_2 = 1.$$

$$C_{311} = \lambda \cdot (E_1 \cdot \cos(\varphi)^4 + E_2 \cdot \sin(\varphi)^4) + \frac{1}{2} \cdot \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \sin(2\varphi)^2 + G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{311} = 3.962 \cdot 10^3;$$

$$C_{322} = \lambda \cdot (E_1 \cdot \sin(\varphi)^4 + E_2 \cdot \cos(\varphi)^4) + \frac{1}{2} \cdot \mu_{12} \cdot E_2 \cdot \sin(2\varphi)^2 + G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{322} = 3.962 \cdot 10^3;$$

$$C_{312} = \lambda \cdot \left[ (E_1 + E_2) \cdot \cos(\varphi)^2 \cdot \sin(\varphi)^2 + \mu_{12} \cdot E_2 \cdot (\cos(\varphi)^4 + \sin(\varphi)^4) \right] - G_{12} \cdot \sin(2\varphi)^2$$

$$\rightarrow \rightarrow C_{312} = 2.932 \cdot 10^3;$$

$$C_{366} = \frac{\lambda \cdot \sin(2 \cdot \varphi)^2}{4} \cdot (E_1 + E_2 - 2 \cdot \mu_{12} \cdot E_2) + G_{12} \cdot \cos(2 \cdot \varphi)^2 \rightarrow$$

;

$$n = n_1 + n_2 + n_3 \rightarrow \quad ; \delta = n_1 \cdot \delta \rightarrow \delta = 3;$$



$$A_{11} = \frac{1}{\delta} \cdot [(n_1 \cdot C_{111}) + (n_2 \cdot C_{211}) + (n_3 \cdot C_{311})] \rightarrow \quad ;$$

$$A_{22} = \frac{1}{\delta} \cdot [(n_1 \cdot C_{122}) + (n_2 \cdot C_{222}) + (n_3 \cdot C_{322})] \rightarrow A_{22} = 5.459 \cdot 10^3 ;$$

$$A_{12} = \frac{1}{\delta} \cdot [(n_1 \cdot C_{112}) + (n_2 \cdot C_{212}) + (n_3 \cdot C_{312})] \rightarrow \quad ;$$

$$A_{66} = \frac{1}{\delta} \cdot [(n_1 \cdot C_{166}) + (n_2 \cdot C_{266}) + (n_3 \cdot C_{366})] \rightarrow \quad ;$$

$$E_x = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}}.$$

Аналогичным образом были рассчитаны жесткостные характеристики углепластика, состоящего из трех, пяти и десяти слоев с различным углом направления волокон. В таблице 2 приведены результаты расчета.

Таблица 2 – Результаты расчета жесткостных характеристик

№	Кол-во слоев	Пакет КМ	Углепластик		Модуль сдвига	Модуль упругости $E_x$	Модуль упругости $E_y$
			Коэффициент Пуассона	Коэффициент Пуассона $\mu_{yx}$			
1	3	[0 <sub>1</sub> ;90 <sub>1</sub> ;45 <sub>1</sub> ]	0,213	0,213	1,263·10 <sup>3</sup>	5,211·10 <sup>3</sup>	5,211·10 <sup>3</sup>
2		[90 <sub>1</sub> ;+45 <sub>2</sub> ]	0,322	0,142	2,147·10 <sup>3</sup>	5,837·10 <sup>3</sup>	2,179·10 <sup>3</sup>
3	5	[0 <sub>1</sub> ;90 <sub>2</sub> ;45 <sub>2</sub> ]	0,318	0,211	1,44·10 <sup>3</sup>	5,932·10 <sup>3</sup>	4,735·10 <sup>3</sup>
4		[90 <sub>3</sub> ;+45 <sub>2</sub> ]	0,158	0,039	1,44·10 <sup>3</sup>	3,369·10 <sup>3</sup>	2,017·10 <sup>3</sup>
5	10	[0 <sub>3</sub> ;90 <sub>3</sub> ;45 <sub>4</sub> ]	0,254	0,254	1,309·10 <sup>3</sup>	5,945·10 <sup>3</sup>	5,945·10 <sup>3</sup>
6		[90 <sub>4</sub> ;+45 <sub>6</sub> ]	0,272	0,103	1,07·10 <sup>3</sup>	6,036·10 <sup>3</sup>	6,473·10 <sup>3</sup>

**Расчет на прочность.** Расчет на прочность защитного экрана, состоящего из различных вариаций пакетов углепластика, выполнен в программном комплексе ANSYS в среде Workbench.

На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчета деформации пакета углепластика, состоящего из трех слоев.

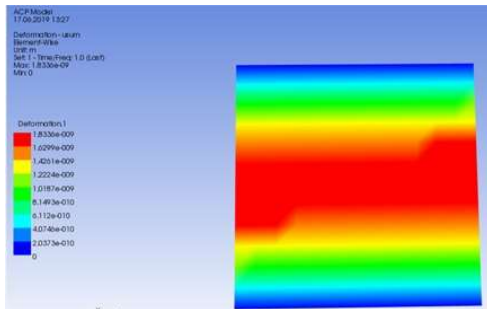


Рисунок 1 – Деформация защитного экрана из углепластика, имеющего углы укладки волокон [0;90;45]

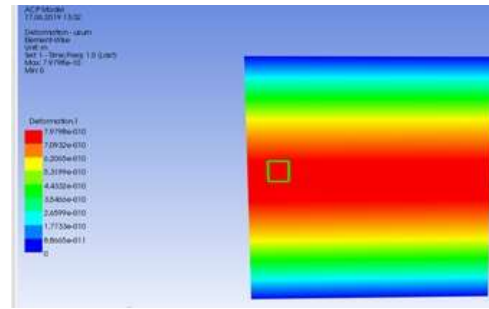


Рисунок 2 – Деформация защитного экрана из углепластика, имеющего углы укладки волокон [90;45;-45]

На рисунках 3 и 4 представлены результаты расчета деформации пакета углепластика, состоящего из пяти слоев.

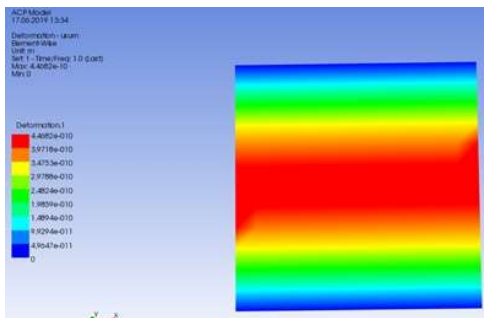


Рисунок 3 – Деформация защитного экрана из углепластика, имеющего углы укладки волокон [0;45;90;45;0]

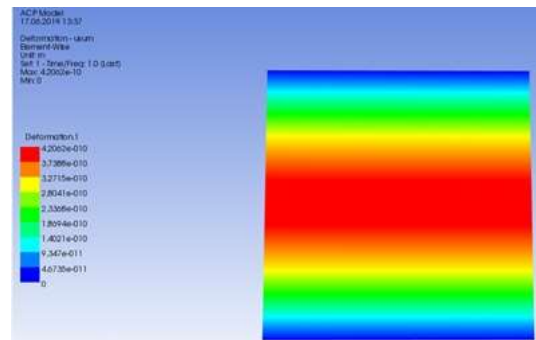


Рисунок 4 – Деформация защитного экрана из углепластика, имеющего углы укладки волокон [90;45;90;-45;90]

На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчета деформации пакета углепластика, состоящего из десяти слоев.

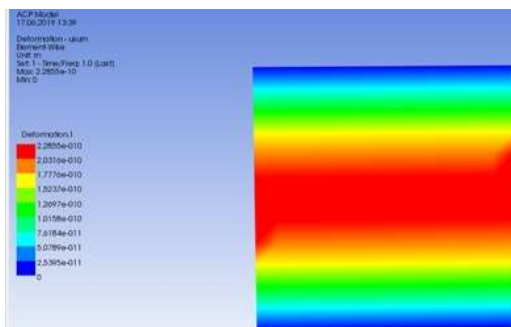


Рисунок 5 – Деформация защитного экрана из углепластика, имеющего углы укладки волокон [45;0;90;45;0;90;45;0;90;45]

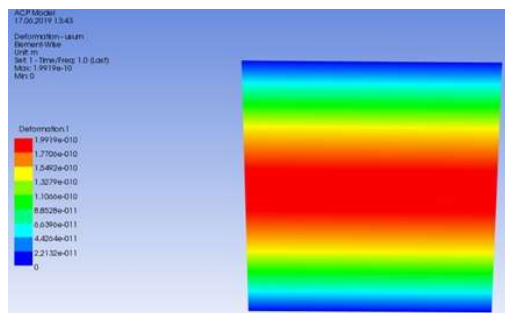


Рисунок 6 – Деформация защитного экрана из углепластика, имеющего углы укладки волокон [90;-45;45;90;-45;45;90;-45;45;90]

Также был рассчитан экран из алюминия (рисунок 7).

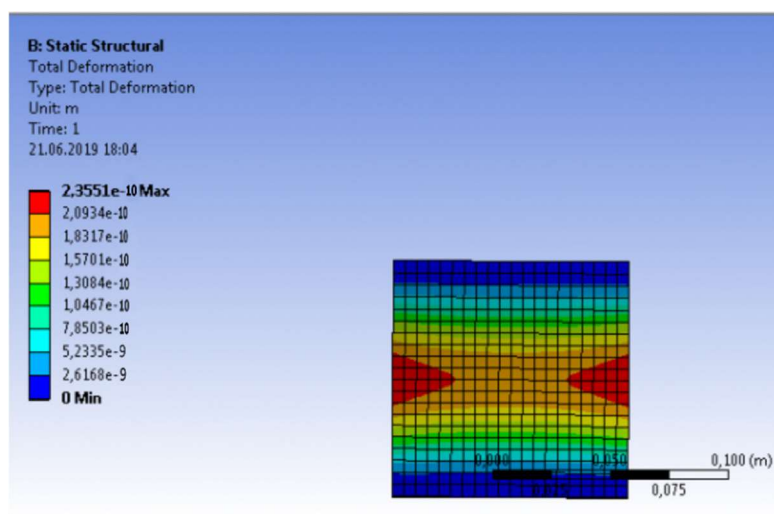


Рисунок 7 – Деформация защитного экрана из алюминия, толщина которого равняется 3,7 мм

В таблице 2 приведены результаты расчета на прочность.

Таблица 2 – Максимальная деформация испытываемых пакетов

№ пакета	Кол-во слоев	Угол укладки волокон	Материал	Максимальный прогиб (м)	Толщина
1	3	[0 <sub>1</sub> ;90 <sub>1</sub> ;45 <sub>1</sub> ]	углепластик	$7,8336 \cdot 10^{-10}$	3 мм
2		[90 <sub>1</sub> ;+45 <sub>2</sub> ]	углепластик	$7,9797 \cdot 10^{-10}$	3 мм
3	5	[0 <sub>1</sub> ;90 <sub>2</sub> ;45 <sub>2</sub> ]	углепластик	$4,4082 \cdot 10^{-10}$	5 мм
4		[90 <sub>3</sub> ;+45 <sub>2</sub> ]	углепластик	$4,2062 \cdot 10^{-10}$	5 мм
5	10	[0 <sub>3</sub> ;90 <sub>3</sub> ;45 <sub>4</sub> ]	углепластик	$2,2655 \cdot 10^{-10}$	10 мм
6		[90 <sub>4</sub> ;+45 <sub>6</sub> ]	углепластик	$1,9919 \cdot 10^{-10}$	10 мм
7	-	-	алюминий	$2,0934 \cdot 10^{-10}$	3,7 мм

Вывод: экраны из углепластика (10 слоев) по прочности сравнимы с экранами из алюминия, из которого в настоящее время изготавливаются защитные экраны. Толщина экрана из алюминия 3,7 мм; толщина экрана из углепластика 10 мм, но вес этого экрана на 30% легче, чем из алюминия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-18050/18.

#### Литература

1. Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора / В.В. Зеленцов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 06. – С. 123–142.
2. Бохоева Л.А. Анализ современного состояния многослойных защитных конструкций из композиционных материалов / Л.А. Бохоева, Г.П. Садовский, С.С. Гуртовой // Механика XXI века. – 2019. – № 18. – С. 280-285.
3. Официальный сайт ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 16.08.2019).

#### References

1. Zelentsov V.V. // Science and Education of Bauman MSTU. – 2015. – No. 06. – P. 123–142.
2. Bokhoeva L.A., Sadovskii G.P., Gurtovoi S.S. // Mechanical engineers to XXI century. – 2019. – No. 18. – P. 280-285.
3. ANSYS official site [Electronic resource]. – URL: <https://www.ansys.com/> (date of the application: 16.08.2019).

УДК 539.1.01

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© С. А. Базарон, Я. А. Шевченко, Г. П. Садовский

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670033, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, строение 1  
E-mail: seseg003@gmail.com

*В наше время космонавтика – это неотъемлемая часть деятельности человечества. Мусор в космосе представляет большую опасность для действующих спутников и других космических аппаратов, так как его количество невероятно огромно, а средняя скорость отдельных частиц составляет 10 км/с. Защита космического аппарата от воздействия частиц мелкого космического мусора может быть решена только за счет применения защитных экранов. В работе построена трехмерная модель защитного экрана космического аппарата средствами программного комплекса SolidWorks.*

**Ключевые слова:** защитные экраны, космический мусор, космический аппарат, слоистые пластины.

### COMPUTER SIMULATION OF THE PROTECTIVE SCREEN OF THE SPACE VEHICLE

S. A. Bazaron, Ya. A. Shevchenko, G. P. Sadovskii

East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya St., 40v, building 1  
E-mail: seseg003@gmail.com

*Nowadays, space exploration is an integral part of human activity. Debris in space is a great danger to operating satellites and other spacecraft, since its amount is incredibly huge, and the average speed of individual particles is 10 km/s. The protection of the spacecraft from the effects of particles of small space debris can be solved only through the use of protective screens. In the work, a three-dimensional model of the spacecraft's protective screen was built using SolidWorks software package tools.*

**Keywords:** protective screens, space debris, spacecraft, layered plates.

**Введение.** От того, насколько безопасно и эффективно будет изучаться космос, зависит многое. Развитие космоса позволило человеку продвинуться далеко вперед. С помощью спутников ведут телепередачи, узнают прогноз погоды, помогают геологам находить новые месторождения полезных ископаемых. Одна из основных проблем изучения космоса – космический мусор. Космический мусор – это все искусственные объекты в космосе, которые не функционируют и не смогут более служить каким-либо полезным целям [1].

Ввиду сосредоточения на низких орбитах большого количества космического мусора для низкоорбитальных космических аппаратов задача проектирования многослойных корпусов и защитных экранов из композиционных материалов особенно актуальна. Повреждение космических аппаратов зависит от свойств материала и интенсивности потоков сверхскоростных частиц. Встречи космических аппаратов с крупными фрагментами космического мусора редки и однозначно заканчиваются катастрофой. Повреждение космических аппаратов зависит от интенсивности потоков сверхскоростных частиц и свойств материала. Столкновение космических аппаратов с объектами космического мусора в ряде случаев сегодня является неизбежным [2].

**Создание защитного экрана космического аппарата.** В программном комплексе SolidWorks была создана 3D-модель защитного экрана космического аппарата (КА), состоящая из трех слоев: передней стенки из углепластика, сотового заполнителя из стеклопластика, задней стенки из углепластика. Размеры передней и задней стенок 100×100 мм и имеют нулевую толщину, то есть являются оболочкой. Это сделано с той целью, чтобы в дальнейшем в программном комплексе ANSYS можно было сделать их расчет как композиционного материала.

Вначале была создана оболочка из твердотельной детали путем выделения поверхности детали и ее сохранения в формате IGES.

Элемент экрана между двумя листами композитов представляет собой сотовый заполнитель. Панели, в состав которых входит сердцевина из легкого сотового заполнителя, представляют собой прочную и легкую конструкцию, пригодную для использования в производстве изделий ответственного назначения. На рисунке 1 изображен процесс создания соты в SolidWorks.

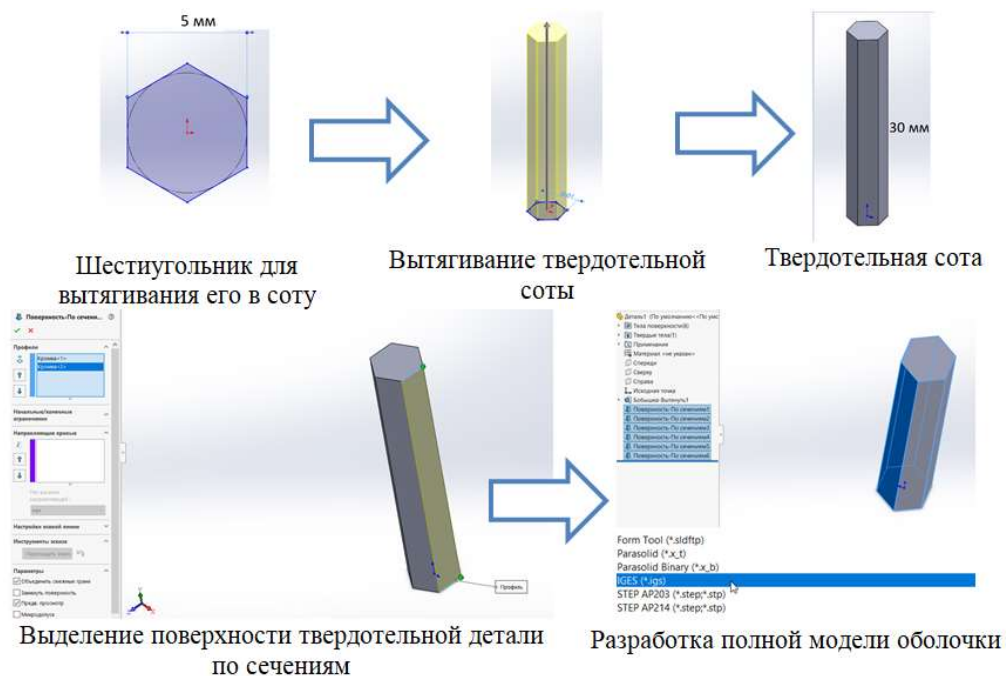
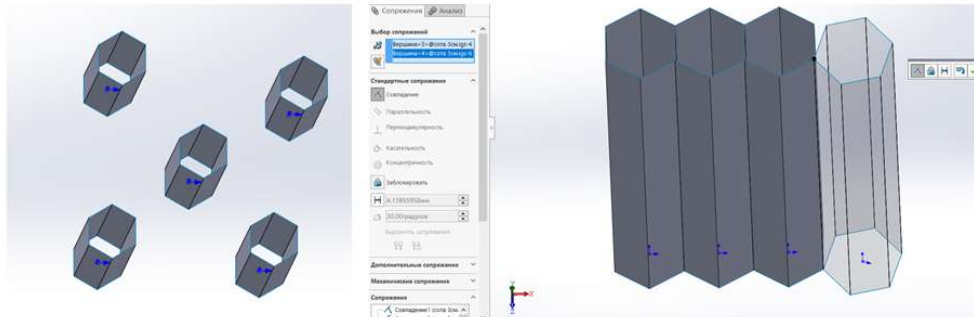


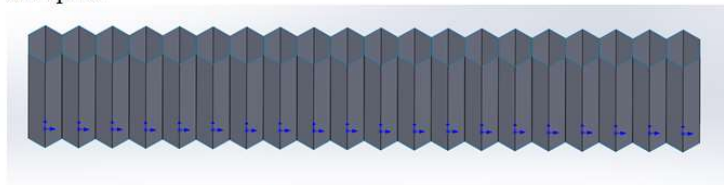
Рисунок 1 – Процесс создания соты

Объединение всех созданных комплектующих в полную 3D модель защитного экрана осуществляется в режиме «сборка» [3, 4]. На рисунке 2 изображен процесс сборки оболочечных сот в единый ряд.



Оболочки сот в режиме «сборка»

Соединение сот в единый ряд с помощью сопряжения



Полный ряд из сот

Рисунок 2 – Процесс сборки сот

По такому же принципу создается полная сотовая компоновка экрана. Весь сотовый наполнитель экрана изображен на рисунке 3.

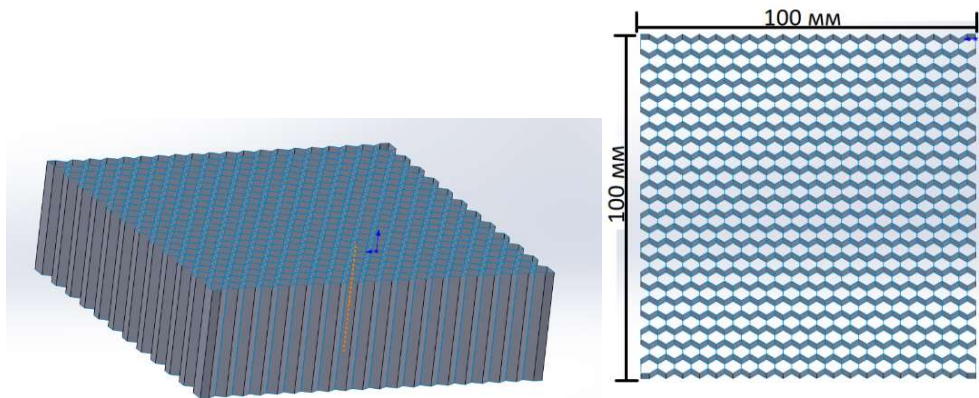


Рисунок 3 – Сотовый наполнитель защитного экрана

Следующим шагом три слоя защитного экрана скрепляются между собой в единый экран. Это изображено на рисунке 4. На рисунке 5 изображена 3D-модель защитного экрана, созданного в программном комплексе SolidWorks.

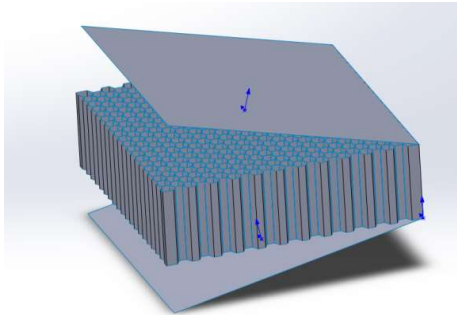


Рисунок 4 – Сборка итоговой модели защитного экрана

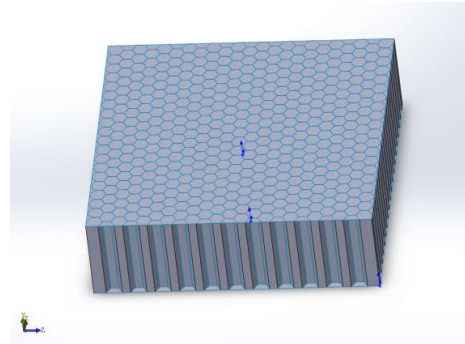


Рисунок 5 – 3D-модель защитного экрана космического аппарата

**Расчет на прочность защитного экрана.** Расчет на прочность выполнен в программном комплексе ANSYS в среде Workbench. Вначале необходимо было узнать жесткостные характеристики слоистого пакета. В связи с этим в программе MathCad выполнены расчеты жесткостных характеристик различных пакетов. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Исходные данные для расчета: пакет из трех слоев с укладкой [0; 90; 45].

Таблица 1 – Жесткостные характеристики слоистого пакета

Название показателя	Формула расчета	Результат расчета	
		углепластика	стеклопластика
Модуль упругости для трехслойного пакета по оси $Ox$	$E_x = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}}$	$E_x = 5,211 \cdot 10^3$	$E_x = 1,72 \cdot 10^3$
Модуль упругости для трехслойного пакета по оси $Oy$	$E_y = A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}}$	$E_y = 5,211 \cdot 10^3$	$E_y = 0,55 \cdot 10^3$
Модуль сдвига для трехслойного пакета	$G_{xy} = A_{66}$	$G_{xy} = 1,263 \cdot 10^3$	$G_{xy} = 0,029 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона $\mu_{xy}$	$\mu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}}$	$\mu_{xy} = 0,213$	$\mu_{xy} = 0,35$
Коэффициент Пуассона $\mu_{yx}$	$\mu_{yx} = \mu_{xy} \cdot \frac{E_y}{E_x}$	$\mu_{yx} = 0,213$	$\mu_{yx} = 0,35$

Аналогичным образом были проведены расчеты жесткостных характеристик для различного количества слоев и углов укладки слоистого пакета. Используя полученные расчеты, были рассчитаны на прочность защитные экраны из углепластика и стеклопластика. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Количество деформации углепластика и стеклопластика

Количество слоев	Угол укладки	Максимальная деформация	
		углепластика	стеклопластика
3	[0 <sub>1</sub> ; 90 <sub>1</sub> ; 45 <sub>1</sub> ]	$10,8336 \cdot 10^{-9}$ м	0,010407 м
	[90 <sub>2</sub> ; +45 <sub>2</sub> ]	$7,9798 \cdot 10^{-10}$ м	0,0090176 м
5	[0 <sub>2</sub> ; 90 <sub>1</sub> ; 45 <sub>2</sub> ]	$4,4682 \cdot 10^{-10}$ м	0,0054815 м
	[90 <sub>3</sub> ; +45 <sub>2</sub> ]	$4,2062 \cdot 10^{-10}$ м	0,0052349 м
10	[0 <sub>3</sub> ; 90 <sub>3</sub> ; 45 <sub>4</sub> ]	$2,2855 \cdot 10^{-10}$ м	0,0026964 м
	[90 <sub>4</sub> ; +45 <sub>6</sub> ]	$1,9919 \cdot 10^{-10}$ м	0,0025427 м

Вывод: разработана 3D-модель защитного экрана космического аппарата. Экран состоит из двух пластин, между которыми находится сотовый наполнитель. Проведен расчет на прочность.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-18050/18.

#### *Литература*

1. *Зеленцов В.В.* Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора / В.В. Зеленцов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2015. – № 06. – С. 123–142.
2. *Бохоева Л.А.* Анализ современного состояния многослойных защитных конструкций из композиционных материалов / Л.А. Бохоева, Г.П. Садовский, С.С. Гуртовой // Механика XXI века. – 2019. – № 18. – С. 280-285.
3. Веб-справка по SolidWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx> (дата обращения: 10.08.2019).
4. *Тику Ш.* Эффективная работа: SolidWorks / Ш. Тику. – Санкт-Петербург: Питер, 2005. – 768 с.

#### *References*

1. *Zelentsov V.V.* // Science and Education of Bauman MSTU. – 2015. – No. 06. – P. 123–142.
2. *Bokhoeva L.A., Sadovskii G.P., Gurtovoi S.S.* // Mechanical engineers to XXI century. – 2019. – No. 18. – P. 280-285.
3. SolidWorks Web Help [Electronic resource]. – URL: <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx> (date of the application: 10.08.2019).
4. *Tiku Sh.* Effektivnaya rabota: SolidWorks. – Saint-Petersburg: Piter, 2005. – 768 p.

УДК 621

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ «ТАРЕЛЬ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ANSYS LS-DYNA**

**© Е. С. Нестеренко<sup>1</sup>, А. И. Олейников<sup>2</sup>**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва» (Самарский университет)  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: <sup>1</sup>nesterenko77@mail.ru, <sup>2</sup>key63@bk.ru

*В статье представлено исследование вытяжки детали тарель в штампе на кривошипном прессе. Рассмотрен характер пластической деформации материала заготовки при вытяжке и произведен анализ напряженно-деформированного состояния. Деталь тарель в машиностроительном производстве относится к деталям высокой точности. Большое изменение толщины и высокая разнотолщинность по длине образующей является недопустимой при изготовлении тарели. Внедрение в штамп упругого прижимного кольца позволит улучшить качество поверхности данной детали и снизить гофрообразование фланца. В работе представлены результаты моделирования процессов вытяжка с прижимным упругим кольцом. Произведен анализ изменения толщины детали.*

**Ключевые слова:** вытяжка, моделирование, программный продукт ANSYS/LS-DYNA, конечный элемент, напряжения, деформации, разнотолщинность, усилие.



## SIMULATION OF DRAWING PROCESS OF A CYLINDRICAL WORKPIECE "PLATE" WITH THE USE OF ANSYS LS-DYNA

**E. S. Nesterenko<sup>1</sup>, A. I. Oleinikov<sup>2</sup>**  
Samara National Research University  
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia  
E-mail: <sup>1</sup>nesterenko77@mail.ru, <sup>2</sup>key63@bk.ru

*The article presents a study of the drawing of the part of the plate in the stamp on the crank press. The nature of plastic deformation of the workpiece material during extraction is considered and the stress-strain state is analyzed. The part of the tarel in the machine building industry refer to the details of high precision. A large change in thickness and high thickness of the length of the generatrix is unacceptable in the manufacture of packaging. The introduction of an elastic clamping ring into the die will improve the surface quality of this part and reduce the corrugation of the flange. The paper presents the result of modeling the processes of drawing with a clamping elastic ring. The analysis of the change in the thickness of the part.*

**Keywords:** *drawing, modeling, ANSYS/LS-DYNA software product, finite element, stresses, deformations, multi-thickness, force.*

Широкое применение в авиастроении имеют полые тонкостенные осесимметричные детали, например тарель. Детали типа тарель получают процессом вытяжки.

Вытяжка происходит за счет пластической деформации, которая сопровождается смещением значительного объема металла в область широкого фланца. При большой степени деформации, соответствующей глубокой вытяжке, и при малой разнотолщинности материала, смещенный объем является причиной образования гофров (волн) на деформированной заготовке.

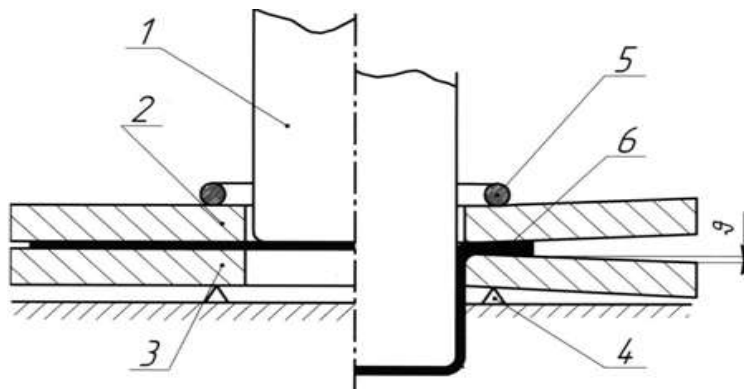
Вытяжка деталей с фланцем имеет особенности.

1. Вытягивается деталь с заданным диаметром фланца за первый переход;
2. При последующих операциях металл перераспределяется за счет увеличения высоты и уменьшения диаметра без смещения фланца [1].

*Штамп для вытяжки тарели с широким фланцем*

Учитывая особенности процесса вытяжки цилиндрической детали с фланцем и дефекты, возникающие с заготовкой в процессе деформирования, была разработана схема процесса вытяжки, на основе штампа для глубокой вытяжки осесимметричных заготовок [2].

Схема процесса вытяжки детали на штампе с упругими прижимом и матрицей приведена на рисунке 1 [3].



1 – пуансон, 2 – прижим, 3-матрица, 4 – опорное кольцо,  
5 – упругое прижимное кольцо, 6 – заготовка

Рисунок 1 – Схема процесса вытяжки в штампе с упругими прижимом и матрицей

Модель штамповой оснастки для вытяжки приведена на рисунке 2.

Моделирование проводилось в программном продукте ANSYS/LS-DYNA. Данная заготовка имеет физико-механические свойства бронзы БрБ2. Контактное взаимодействие моделей формообразующих заготовок инструментов и листовой заготовки с учетом коэффициента трения 0,12. Физико-механические свойства матрицы и пуансона заданы свойством стали У8А, прижима свойством стали 60Г [4]. Начальная толщина заготовки 0,3 мм, диаметр заготовки 28 мм.

Проведем процесс моделирования. Результаты интенсивности напряжений представлены на рисунке 3.

Из рисунка 3 следует, что процесс вытяжки проходит без гофрообразования фланца, без разрушения и напряжения не превышают предел прочности материала заготовки.

Результаты изменения толщины по образующей показаны на рисунке 4.



Рисунок 2 – Модель вытяжного штампа

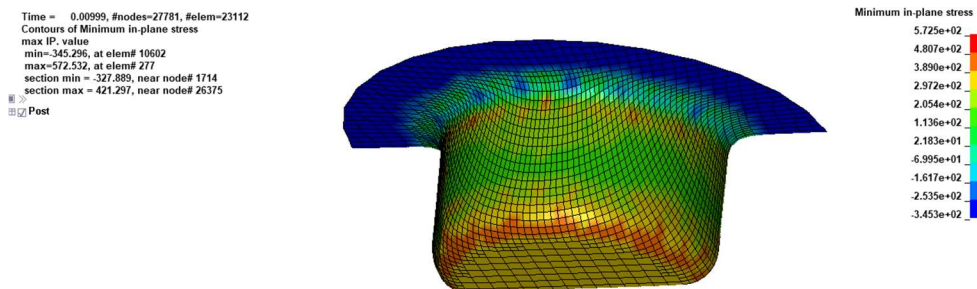


Рисунок 3 – Значение интенсивности напряжений ( $\sigma_{min} = -327,889$  МПа,  $\sigma_{max} = 421,297$  МПа)

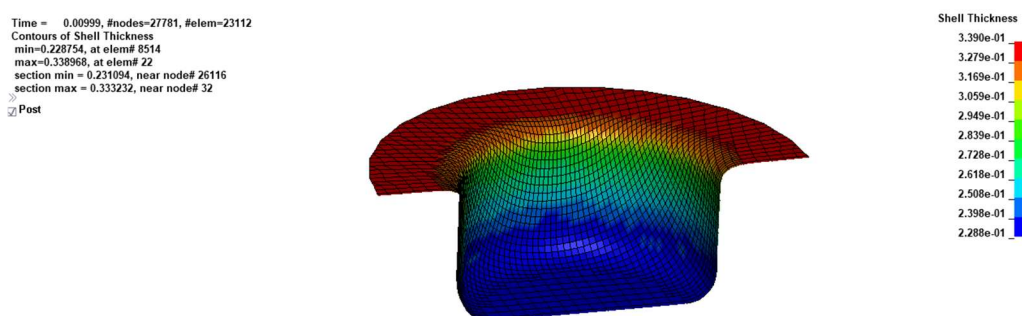


Рисунок 4 – Значения толщины детали при вытяжке ( $S_0 = 0,3$  мм,  $D_{oem} = 28$  мм)

На рисунке 4 представлено равномерное утонение заготовки по всей длине образующей, отсутствие образования гофров. Максимальная толщина детали составляет 0,3 мм по внешнему диаметру фланца, минимальная толщина детали достигла 0,28 мм в области дна детали. Разнотолщинность детали  $\Delta s = s_{max} - s_{min} = 0,3 - 0,28 = 0,02$  мм, что составляет 6%.

Таким образом, разнотолщинность детали тарель при вытяжке соответствует заданному параметру толщины согласно требованиям к точности изготовления детали.

#### Литература

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Ленинград: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Дикуша А.А. Способ штамповки деталей с широким фланцем / А. А. Дикуша, Е. С. Нестеренко // Тезисы докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения». – Москва: Издательство МАИ, 2018. – Т. 3. – С. 265.
3. Попов И.П. Штамп для глубокой вытяжки осесимметричных деталей / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, А.А. Кузина. – Патент России № 2494830. – 10.10.2013.
4. Маслов В.Д. Моделирование процессов листовой штамповки в программном комплексе ANSYS LS-DYNA / В.Д. Маслов. – Самара: Издательство СГАУ, 2007. – 80 с.

#### References

1. Romanovskii V.P. Spravochnik po kholodnoi shtampovke. – Leningrad: Mashinostroenie, 1979. – 520 p.

2. *Dikusha A.A., Nesterenko E.S. // Proceedings of XLIV Gagarin Science Conference. – Moscow: MAI Press, 2018. – V. 3. – P. 265.*

3. *Popov I.P., Nesterenko E.S., Kuzina A.A. Shtamp dlya glubokoi vytyazhki osesimmetrichnykh detalei. – Russia patent no. 2494830. – 10.10.2013.*

4. *Maslov V.D. Modelirovanie protsessov listovoi shtampovki v programnom komplekse ANSYS/LS-DYNA. – Samara: SSAU Press, 2007. – 80 p.*

УДК 004.94

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ФЕРМЫ ЦЕНТРА КУЛЬТУРНОГО РАЗВИТИЯ П. САГАН-НУР

© **Е. С. Банина**<sup>1,a</sup>, студент, **В. Ю. Курокhtин**<sup>1,b</sup>, старший преподаватель,  
**Н. Даваадорж**<sup>2,c</sup>, преподаватель

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415

<sup>2</sup>Монгольский университет науки и технологии  
14191, Монголия, Улан-Батор, Сухбаатарский район, 8-й округ, ул. Бага тойруу, 34  
E-mail: <sup>a</sup>baninag@mail.ru, <sup>b</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>c</sup>davaadorj@must.edu.mn

*В данной статье приводится описание процесса разработки трехмерной модели центра культурного развития. Проект реализован в программном комплексе ArchiCAD. Приведены общая характеристика проектируемого здания и исходные данные для его моделирования, описание местности, где планируется строительство здания, а также общие виды здания, полученные в программном комплексе ArchiCAD. Произведены расчеты на прочность стропильной фермы, которые необходимы для предотвращения обрушения крыши зрительного зала. В качестве вычислительных комплексов для проведения расчетов были использованы программы ANSYS и SCAD. Проведен сравнительный анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, строительство, ArchiCAD, прочностной расчет, ферма, ANSYS, SCAD.

## COMPUTER MODELING AND TRUSS STRENGTH CALCULATION OF THE CULTURAL DEVELOPMENT CENTER OF SAGAN-NUR VILLAGE

**E. S. Banina**<sup>1,a</sup>, student, **V. Yu. Kurokhtin**<sup>1,b</sup>, senior lecturer,  
**N. Davaadorj**<sup>2,c</sup>, lecturer

<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, 40v, +7(3012)431415

<sup>2</sup>The Mongolian University of Science and Technology  
14191, Mongolia, Ulaanbaatar, Sukhbaatar district, 8th khoroo, Baga toiruu St., 34  
E-mail: <sup>a</sup>baninag@mail.ru, <sup>b</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>c</sup>davaadorj@must.edu.mn

*This article describes the process of developing a three-dimensional model of the center of cultural development. The project was implemented in the ArchiCAD software package. The general characteristics of the projected building and initial data for its modeling, a description of the area where the building is planned to be built, as well as general views of the building obtained in the ArchiCAD software package are given. The strength calculations of the truss, which are necessary to prevent the collapse of the roof of the auditorium, are made. ANSYS and SCAD programs were used as computational complexes for calculations. A comparative analysis of the obtained results is carried out.*

**Keywords:** computer modeling, construction, ArchiCAD, strength analysis, truss, ANSYS, SCAD.

Проектируемое здание Центра культурного развития (ЦКР) расположено в поселке Саган-Нур Мухоршибирского района Республики Бурятия по ул. Спортивная (рисунок 1).

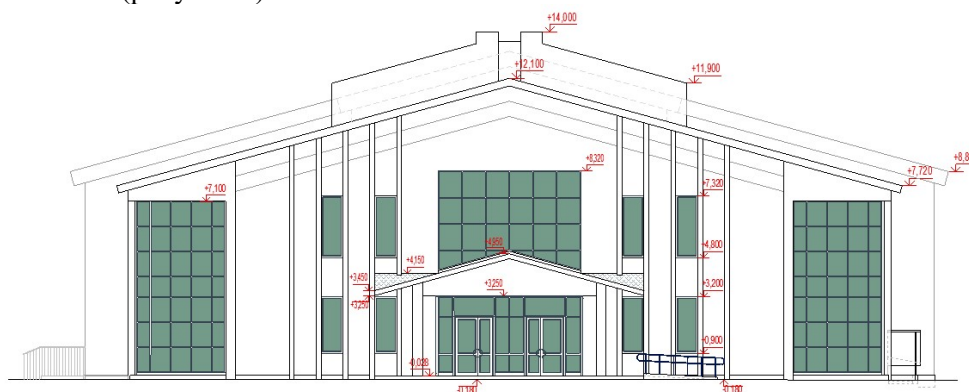


Рисунок 1 – Фасад ЦКР

Центр культурного развития имеет два этажа, с подвалом и техподпольем. В подвале располагаются помещения, предназначенные для инженерного оборудования, технические помещения (высота помещений до выступающих частей здания 2,4 – 2,5 м). Техподполье для прокладки инженерных коммуникаций с высотой помещений до выступающих частей 1,62 м. На первом этаже располагается фойе, буфетный зал, кружковая комната, эстрада, зрительный зал на 200 мест, гардеробная, а также служебные, подсобные и технические помещения, входная группа: две лестничные клетки и лифт для обслуживания инвалидов. В зрительном зале на 200 посадочных мест предусмотрено 4 места для маломобильных групп граждан, которые расположены рассредоточено. Предусмотрен также пандус в зрительном зале с уклоном 1:6 (по созданным условиям проектирования) с поручнем вдоль стены на высоте 0,9 м от пола.

Климат района строительства, как и климат всего Западного Забайкалья, резко-континентальный с большими годовыми и суточными колебаниями температуры воздуха. Зима продолжительная, холодная и малоснежная. Лето короткое и жаркое. По данным метеостанции с. Мухоршибирь, среднегодовая температура воздуха от  $-1^{\circ}\text{C}$  до  $-4^{\circ}\text{C}$ . Количество атмосферных осадков в различные годы изменяется от 148,6 до 468 мм, при среднемноголетних – 365 мм. Около 80% годового количества атмосферных осадков выпадает в июне-августе. Количество солнечных дней в году достигает 160-220. Продолжительность безморозного периода колеблется в пределах 81-106 дней. Зима малоснежная с сильными ветрами. Глубина снежного покрова составляет в среднем 15-20 см. Сплошной снежный покров ложится в конце октября – начале ноября, сходит в апреле. Преобладающее направление ветра – западное и северо-западное, средняя скорость 2-4 м/сек. Сезонное промерзание грунтов достигает глубины 3,0 – 3,6 м. Оттаивание начинается в апреле и полностью заканчивается в конце августа – начале сентября. Согласно карте А СП 14.13330.2014 сейсмичность площадки составляет на изучаемой территории 7 баллов. Грунты по сейсмическим свойствам относятся

ко II категории. Основанием фундаментом будут служить делювиально-пролювиальные и элювиальные отложения. По категориям сложности инженерно-геологических условий, согласно СП 11-105-97, приложение Б, изученная площадка относится ко II (средней) категории. По категориям опасности природных процессов площадка относится к опасным по землетрясениям (7 баллов – сейсмическая опасность).

В результате проведенного компьютерного моделирования получилась трехмерная модель здания центра культурного развития (рисунок 2). Заключительным этапом создания модели ЦКР является рендеринг изображения [1] (рисунок 3).

Рассчитываемая стропильная ферма должна соответствовать прочностным характеристикам несущей конструкции, то есть нагрузки, приходящиеся на нее от выше расположенных элементов дома, не должны привести к потере устойчивости и прочности фермы [2, 3]. Расчетная схема фермы представлена на рисунке 4.



Рисунок 2



Рисунок 3

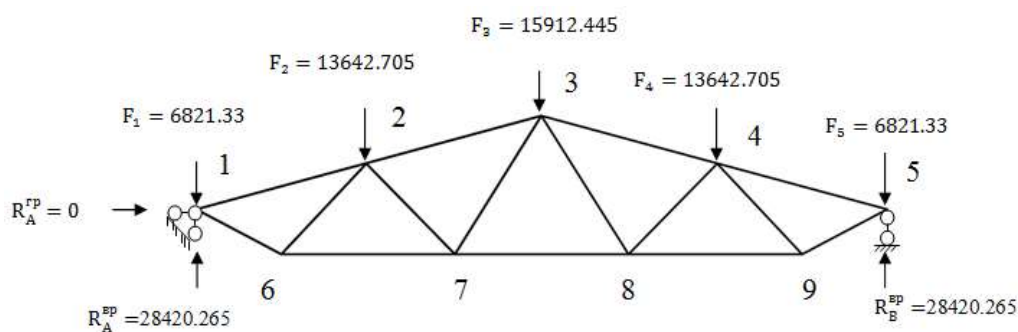
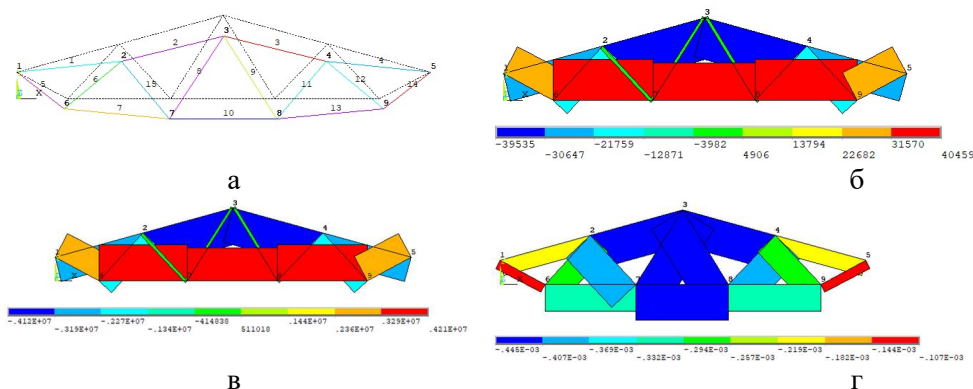


Рисунок 4

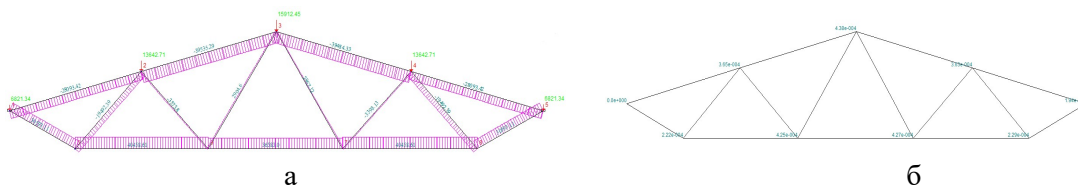
Была создана математическая модель фермы в программном комплексе ANSYS, после чего был произведен расчет полученной модели на прочность [4]. Полученные эпюры и деформированное состояние фермы представлены на рисунке 5.



а – деформированное состояние, б – эпюра усилий в стержнях фермы, в – эпюра напряжений в стержнях фермы, г – эпюра вертикальных перемещений стержней фермы  
Рисунок 5

Для сравнения был проведен расчет этой же фермы в программном комплексе SCAD [5]. Результаты представлены на рисунке 6.

Численные результаты расчетов в ANSYS и SCAD представлены в таблице 1.



а – эпюра внутренних усилий в стержнях фермы, б – деформированное состояние  
Рисунок 6

Таблица 1 – Сводная таблица результатов расчета фермы

	Усилия $N$ , Н		Напряжения $\sigma$ , Па		Перемещения $\Delta$ , м	
	max	min	max	min	max	min
ANSYS	40459	-39535	4214479	-4118229	-	-0,0004445
SCAD	40458,6	-39535	4214437,5	-4118229	0,0001065	-0,000207

В ходе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку максимальное напряжение, возникающее в стержнях фермы (4258 кПа), меньше, чем предел текучести материала стержней (245 МПа), то условие прочности выполняется, и ферма выдерживает прилагаемую к ней нагрузку.

2. Относительная погрешность полученных значений не превышает 1,02 %, что свидетельствует о корректности вычислений, выполненных в программных комплексах ANSYS и SCAD.

#### Литература

1. Малова Н. А. ArchiCAD 20 в примерах / Н. А. Малова. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2017. – 576 с.

2. Белов В.А. Моделирование и расчет металлических конструкций зданий и сооружений / В.А. Белов, К. Круль. – Москва: Издательство ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 2012. – 160 с.

3. Рогов В.Е. Оценка процесса роста усталостных трещин в лопастях винта вертолета [Электронный ресурс] / В.Е. Рогов, Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, А.Б. Балданов // Интернет-журнал «Наукovedение». – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 74. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/80TVN217.pdf> (дата обращения 09.08.2018).

4. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А.В. Жидков. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 115 с.

5. Бусыгина Г.М. Применение программного комплекса SCAD Office для расчета стержневых конструкций / Г.М. Бусыгина, О.В. Дремова. – Барнаул: Издательство Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 2015. – 39 с.

#### References

1. Malova N.A. ArchiCAD 20 v primerakh. – Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2017. – 576 с.

2. Belov V.A., Krul K. Modelirovanie i raschyot metallicheskih konstruksii zdaniy i sooruzheniy. – Moscow: Moscow State University of Civil Engineering Press, 2012. – 160 p.

3. Rogov V.E., Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Baldanov A.B. [Electronic resource] // “Naukovedenie” internet-journal. – 2017. – V. 9. – No. 2. – P. 74. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/80TVN217.pdf> (date of the application 09.08.2018).

4. Zhidkov A.V. Primemenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya. – Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Press, 2006. – 115 p.

5. Busygina G.M., Dryomova O.V. Primemenie programmnoy kompleksa SCAD Office dlya raschyota stержnevyykh konstruksii. – Barnaul: Polzunov Altai State Technical University Press, 2015. – 39 p.

УДК 519.6

### ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS: A MACHINE LEARNING EXAMPLE WITH NEUROPH

© M. Steinhauer<sup>1</sup>, V. Steinhauer<sup>2</sup>, doctor, L. Steinhauer<sup>2</sup>, doctor

<sup>1</sup>University of Giessen

35390, Germany, Giessen, 58 Goethestrasse, Erwin Stein Building

<sup>2</sup>Devoteam GmbH

64331, Germany, Weiterstadt, 10 Gutenbergstraße

E-mail: valentin\_de@mail.ru

*A good start for getting started with machine learning and neural networks (NN) is the Java Framework Neuroph. The 2013 Duke's Choice Awards Winner includes an open source Java Library for implementing fundamental NN concepts. The example below is that of an order management system and shows what one can achieve with machine learning in just a few steps.*

**Keywords:** neural networks, machine learning, Neuroph package.

#### **Machine learning and simple neural networks**

According to the latest Industry program (4.0) of the "Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung" (BMFW), we will face more and more tasks in the area of so-called machine learning. But what exactly is machine learning? In Wikipedia you



can find the following description: "...Machine learning (ML) is the scientific study of algorithms and statistical models that computer systems use to perform a specific task without using explicit instructions, relying on patterns and inference instead. It is seen as a subset of artificial intelligence." Thus, machine learning doesn't just memorize specific patterns. Instead, it uses the given patterns and rules so that unknown data can be assessed and predictions made. In the field of machine learning several solutions have already been developed, as can be seen in the UCI list [1]. Several entries in the list are based on neural networks. I myself have been confronted several times in my work with situations where functionalities that can be simulated with neural networks are needed [2]. In those cases, I used Neuroph as a NN framework (currently available with the latest version 2.92 [3]).

#### **Artificial neural networks with Neuroph**

Neuroph is not only a good choice for those who want to learn or experiment with the use of neural networks. It is also suitable for a quick integration into your own project. It is small, well documented, easy to use and very flexible. In addition, its performance is sufficient to help with recurring simple tasks.

Neuroph provides a GUI for experimenting with learning parameters. This is important as the parameters often have to be adjusted individually in order for the problem to be solved. In addition, the GUI allows you to try out and get to know different network architectures. In his development the Neuroph framework goes currently in direction of the so-called deep learning or adaptive multi-layered neural networks.

Anyone looking for an entry point into the world of neural networks is confronted with a wide variety of topics. Here we will use an example using the simplest network – the so-called perceptron. If you are curious about further examples, please refer to [4] and [5].

#### **Perceptron system control**

Our task: A constant analysis of operations in an order management system for processing disruptions and their quick solutions. The Processing of individual transactions in such systems usually consists of several steps. For example, consider the following processing steps/states:

- state 0: the orders are still in the input filestore;
- state 1 (NEW-REQUEST): order acceptance to the system, data storage in the transaction database and generation of the corresponding transactions;
- state 2 (CONVERT-REQUEST): order conversion of incoming formats (eg EDIFACT, XML) into the uniform internal format for further processing in the system;
- state 3 (MAP-REQUEST): data mapping of the incoming data model to the data model of the back-end system for processing;
- state 4 (SEND-REQUEST): sending the mapped data as an order to the back-end system;
- state 5 (WAIT-RESPONSE): receive the results from the back-end system and initiate the transactions;
- state 6 (MAP-RESPONSE): data mapping of the result data model to the data model of the original job;
- state 7 (CONVERT-RESULT): conversion of the uniform internal format into the corresponding output format (eg EDIFACT, XML) of the original request;
- state 8 (SEND-RESULT): sending the results.

Every transaction that is created in the system for processing an order runs through these steps sequentially. In addition, the processing of the transactions depends on certain system parameters, such as the available disk space (Files-PP), the free tablespace in the database (DB-TS) or the CPU load (CPU-A). Suppose that the processing of the transactions at each step above is done with a separate module (for example, an adapter). The solution to a critical situation can be the following actions, which will later be used as output values for neural networks:

- close input filestore (remove rights to set orders);
- send e-mail to the system managers;
- shut down all adapters;
- restart individual adapters;
- restart all adapters.

Of course, this list does not cover all possible actions, but shows how the automatic process control is used or how this task can be solved with neural networks.

At this point we have only one input vector (boolean) and one output vector (boolean). The perceptron fits perfectly to this task. So, let's start with 12 neurons (the aforementioned 9 states and the three system parameters mentioned above with the statues reached / not reached) as input vector and 5 neurons (as from the list above) as output vector.

The input neurons will only take the values 0 or 1. For each state 0 means that there is a transaction congestion for the adapter. If the number of pending transactions has reached a configured value a transaction congestion is detected and the state value is set to 1. For the system parameters, the values 0 and 1 must also be interpreted accordingly: 1, if a configured threshold has been reached and 0 if it has not yet been reached. Now this model can be visualized as a neural network, namely as a simple perceptron (figure 1).

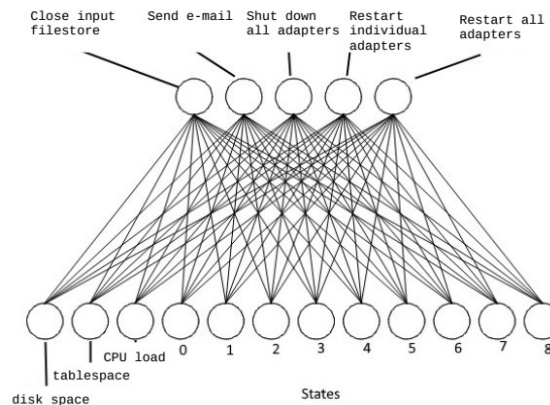


Figure 1 – Model of the order management system as a perceptron

The possible states of transaction processing in the system and the corresponding decisions are presented in vector form. So, how should we interpret this data? Take the following input / output vectors:

$$(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0) \rightarrow (0, 1, 0, 0, 0)$$

Disk space is sufficiently available. The size of the available tablespaces in the database is also sufficient. However, the CPU utilization of the machine is critical because the configured threshold is reached. Also State 3 in the transaction processing (MAP-REQUEST) contains too many transactions. So, a jam of transactions has formed before the mapping of orders. All other processing steps are not affected by the problem. Since a reboot of the corresponding adapter / module is not possible due to high CPU utilization, an e-mail with the respective information is sent to the system managers as a decision of the system or as an action resulting from the situation.

### Implementation and prediction

First, we create the project and include the following libraries:

- after downloading neuroph-2.92.zip, open a project and drop the following packages into the lib directory: neuroph-core-2.92.jar, slf4j-api-1.7.5.jar and slf4j-nop-1.7.6.jar;
- then copy the following methods into the project: main, testneuralNetwork and unknownCaseneuralNetwork (loadedPerceptron);
- let the project run.

The main method contains all the data you need, the machine learning call, the machine testing call (testneuralNetwork (loadedPerceptron, trainingSet)), and the machine predicted state (unknownCaseneuralNetwork (loadedPerceptron) call).

Table 1

Listing 1: Main Method	
1	public static void main(String[] args) {
2	
3	DataSet trainingSet = new DataSet(12, 5);
4	
5	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
6	double[]{1, 1, 0, 0, 0});//1
7	
8	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
9	double[]{1, 1, 1, 0, 0});//2
10	
11	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
12	double[]{0, 0, 0, 1, 0});//3
13	
14	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
15	double[]{1, 1, 0, 0, 0});//4
16	
17	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
18	double[]{0, 1, 0, 0, 0});//5
19	
20	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
21	double[]{0, 0, 0, 1, 0});//6
22	
23	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, new
24	double[]{0, 1, 0, 0, 0});//7
25	
26	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0}, new
27	double[]{0, 0, 0, 1, 0});//8
28	
29	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0}, new
30	double[]{0, 1, 0, 0, 0});//9
31	
32	trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0}, new

```

33 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//10
34
35 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0}, new
36 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//11
37
38 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0}, new
39 double[]{0, 0, 0, 1, 0});//12
40
41 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0}, new
42 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//13
43
44 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0}, new
45 double[]{0, 0, 0, 1, 0});//14
46
47 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0}, new
48 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//15
49
50 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0}, new
51 double[]{0, 0, 0, 1, 0});//16
52
53 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0}, new
54 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//17
55
56 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1}, new
57 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//18
58
59 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1}, new
60 double[]{0, 1, 0, 0, 0});//19
61
62 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, new
63 double[]{0, 0, 0, 0, 1});//20
64
65 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}, new
66 double[]{1, 1, 0, 0, 0});//21
67
68 // create perceptron neural network
69
70 NeuralNetwork myPerceptron = new Perceptron(12, 5);
71
72 // learn the training set
73
74 myPerceptron.learn(trainingSet);
75
76 // save trained perceptron
77
78 myPerceptron.save("mySamplePerceptron.nnet");
79
80 // load saved neural network
81
82 NeuralNetwork loadedPerceptron = NeuralNetwork.load("mySamplePerceptron.nnet");
83
84 // test loaded neural network
85
86 System.out.println("Testing loaded perceptron");
87
88 testNeuralNetwork(loadedPerceptron, trainingSet);
89
90 unknownCaseNeuralNetwork(loadedPerceptron);
91

```

	}
Listing 2: Test Method	
1	public static void testNeuralNetwork(NeuralNetwork neuralNet, DataSet testSet) {
2	
3	for (DataSetRow trainingElement : testSet.getRows()) {
4	neuralNet.setInput(trainingElement.getInput());
5	
6	neuralNet.calculate();
7	
8	double[] networkOutput = neuralNet.getOutput();
9	
10	System.out.print("Input: " + Arrays.toString(trainingElement.getInput()));
11	
12	System.out.println(" Output: " + Arrays.toString(networkOutput));
13	
14	}
15	
16	}
Listing 3: Prognose-Method	
1	public static void unknownCaseNeuralNetwork(NeuralNetwork neuralNet) {
2	
3	DataSetRow unknownElement = new DataSetRow();//to print only
4	
5	unknownElement.setInput(new double[]{1.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
6	0.0});//to print only
7	
8	neuralNet.setInput(new double[]{1.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0});
9	
10	neuralNet.calculate();
11	
12	double[] networkOutput = neuralNet.getOutput();
13	
14	System.out.print("unknown case, input: " + Arrays.toString(unknownElement.getInput()));
15	
16	System.out.println(" output: " + Arrays.toString(networkOutput));
17	
18	}

The situations described above are taken from practice and therefore do not cover all cases. Nevertheless, they are helpful in clarifying the use of a perceptron as process control. With the training data shown above, the process control perceptron is trained. If necessary, this data can be extended without having to adapt the software.

This simple perceptron application can make operational process control in production not only effective but also in a timely manner. What happens when an unexpected situation occurs? For example, if something is blocked and some values are 1?

(1.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0).

The perceptron returns:

1 1 0 0 0: (1.0,1.0,0.0,0.0,0.0).

This means that the input filestores must be closed and an e-mail sent to the system managers. It can be said that an artificial generation of knowledge has taken place.

As we have seen, the perceptron is capable of solving this simple logical task. In some other cases, the problem is not a simple logical task. To solve such problems, the so-called multi-layer perceptron (MLP) can be used (figure 2).

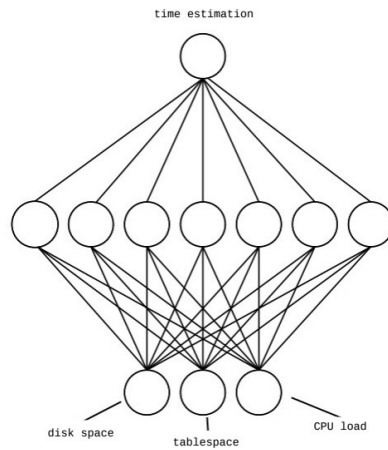


Figure 2 – MLP for time estimation

### Alarm-time assessment

In the previous chapter, we included the system parameters in the input vector and filled them with boolean values. If the value exceeds a limit, it is set to 1. The question arises as to how quickly the critical state can be reached. At this point, an MLP is the right choice; with one or more layers between the input and output layers. We will not go deep into the theory, but only deal with the following rule of thumb: A layer between input and output with  $2n + 1$  nodes, where  $n$  is the number of input parameters.

Let's build an MLP to estimate how long the system will not get into a critical condition. Let's take the three input parameters as above: the disk space, the free tablespace space in the database, and the remaining CPU usage (all three as percentage of free space compared to the total space).

This means, for the intermediate layer  $3 \cdot 2 + 1 = 7$ . The input / output parameter is the time until the alarm is normalized. In this case we take 24 hours.

Table 2

Listing 4: Main Method	
1	<code>DataSet trainingSet = new DataSet(3, 1);</code>
2	
3	<code>trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0.1, 0.1, 0.1}, new double[]{0.1}));</code>
4	
5	<code>trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0.2, 0.2, 0.2}, new double[]{0.2}));</code>
6	
7	<code>trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0.3, 0.3, 0.3}, new double[]{0.3}));</code>
8	
9	<code>trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0.4, 0.4, 0.4}, new double[]{0.4}));</code>
10	
11	<code>trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0.5, 0.5, 0.5}, new double[]{0.5}));</code>

```

12
13 trainingSet.addRow(new DataSetRow(new double[]{0.99, 0.99, 0.99}, new double[]{0.99}));
14
15 // create perceptron neural network
16
17 MultiLayerPerceptron myMIPerceptron = new MultiLayerPercep-
18 tron(TransferFunctionType.GAUSSIAN, 3, 7, 1);
19
20 // learn the training set
21
22 myMIPerceptron.learn(trainingSet);
23
24 // save trained perceptron
25
26 myMIPerceptron.save("mySampleMIPerceptron.nnet");
27
28 // load saved neural network
29
30 NeuralNetwork loadedPerceptron = NeuralNetwork.load("mySampleMIPerceptron.nnet");
31
32 // test loaded neural network
33
34 System.out.println("Testing loaded perceptron");
35
36 testNeuralNetwork(loadedPerceptron, trainingSet);
37
unknownCaseNeuralNetwork(loadedPerceptron);

```

Note: The interlayer is linked to a transfer function of the TransferFunctionType as Gaussian. Whether it should be the same transfer function in other cases, depends on the training data. This must be investigated before you can use this function. One recommendation is to test several feature types offered in the package to better match the test data to the predictions. For the Gaussian feature type above, we get the following (the testneuralNetwork method has not been changed):

```

Input: [0.1, 0.1, 0.1] Output: [0.181]
Input: [0.2, 0.2, 0.2] Output: [0.271]
Input: [0.3, 0.3, 0.3] Output: [0.373]
Input: [0.4, 0.4, 0.4] Output: [0.4723]
Input: [0.5, 0.5, 0.5] Output: [0.563]
Input: [0.99, 0.99, 0.99] Output: [0.919]

```

The first noticeable thing is that the accuracy is not very high. There are, of course, reasons for this, which lie both in the neural network and in the measurements. How to increase accuracy is a special topic and can be discussed later in another article. Now let's calculate the prediction.

Table 3

Listing 5: Prognose	
1	public static void unknownCaseNeuralNetwork(NeuralNetwork neuralNet) {
2	
3	DataSetRow unknownElement = new DataSetRow();//to print only
4	

```

5 unknownElement.setInput(new double[]{0.15, 0.2, 0.3}); //to print only
6
7 neuralNet.setInput(new double[]{0.15, 0.2, 0.3});
8
9 neuralNet.calculate();
10
11 double[] networkOutput = neuralNet.getOutput();
12
13 System.out.print("unknown case, input: " + Ar-
14 rays.toString(unknownElement.getInput()));
15
16 System.out.println(" output: " + Arrays.toString(networkOutput));
17
}
```

And the result is: unknown case, input: [0.15, 0.2, 0.3] output: [0.309].

We can interpret this as follows: The remaining disk space is 15 percent; 20 percent of the tablespace is free and the CPU load has a margin of 30 percent. If the percentage of data continues to increase, this can lead to a system crash in about eight hours (24 / 3.09). So here too an artificial generation of knowledge has taken place. So, the following e-mail can be sent to notify the system administrators: “Watch out! In about 8 hours, a system crash is expected: you have to close the input filestores. 10.07.2016 12:31 Your trained system”

### Conclusion

The implementation of machine learning applications with the Neuroph framework is well possible, effective and recommended. Many problems are already solved in the background if you use the Neuroph package.

### References

1. UCI, Machine Learning Archive [Electronic resource]. – URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html> (date of the application: 19.08.2019).
2. *Steinhauer M., Steinhauer V.* Neuroph: Neuronale Netze in Java [Electronic resource]. – 2012. – URL: <https://jaxenter.de/neuroph-neuronale-netze-in-java-4733> (date of the application: 19.08.2019).
3. Neuroph. Java Neural Network Framework [Electronic resource]. – URL: <http://neuroph.sourceforge.net/> (date of the application: 19.08.2019).
4. *Gupta M.M., Jin L., Homma N.* Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory. – John Wiley & Sons, 2003.
5. *Schwabe L.* Der Machine Learning Engineer // Java Magazin. – 2016.

УДК 669.231

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ СПЛАВА Cu–Au В КАЧЕСТВЕ БИТОВ В УСТРОЙСТВАХ РСМ ПАМЯТИ

© Д. А. Башкова, Ю. Я. Гафнер, И. С. Замулин  
Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова  
655017, Россия, г. Абакан, ул. Ленина, 90  
E-mail: bashkova.daria@yandex.ru



*В представленной работе исследовался потенциал применения нанокластеров сплава меди и золота в качестве рабочего слоя ячеек памяти с изменением фазового состояния носителя. Для этого проводилось компьютерное моделирование плавного охлаждения частиц различного химического состава из расплава до комнатной температуры методом молекулярной динамики с использованием модифицированного потенциала сильной связи TB-SMA. С целью определения роли размерных эффектов в процессах структурообразования исследовались кластеры диаметрами от 2.0 до 8.0 нм. Для анализа степени влияния скорости охлаждения использовались три значения темпа отвода тепловой энергии ( $30 \cdot 10^{11}$ ,  $12 \cdot 10^{11}$ ,  $3 \cdot 10^{11}$  K/c). В результате из всего ряда рассматриваемых частиц были выделены нанокластеры составов  $Cu_{90}Au_{10}$  и  $Cu_{10}Au_{90}$  и для них определены некоторые параметры, при которых возможно стабилизировать процессы формирования аморфной и кристаллической структур.*

**Ключевые слова:** нанокластеры, фазовые переходы, PCM память, медь, золото.

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING Cu – Au NANOCCLUSERS AS BITES IN PCM MEMORY DEVICES

**D. A. Bashkova, Yu. Ya. Gafner, I. S. Zamulin**

N.F. Katanov Khakas State University  
655017, Russia, Abakan, Lenin str., 90  
E-mail: bashkova.daria@yandex.ru

*In this work, we analyzed the potential of using copper and gold alloy nanoclusters as a material for phase charge memory cells. For this purpose, computer simulation was performed for smooth cooling of particles of different chemical composition from the melt to room temperature using the molecular dynamics method based on the modified tight-binding potential. To determine the role of size effects in the processes of structure formation, clusters with diameters from 2.0 to 8.0 nm were studied. To study the effect of the cooling rate, three values of the heat removal rate were used ( $30 \cdot 10^{11}$ ,  $12 \cdot 10^{11}$ ,  $3 \cdot 10^{11}$  K/s). As a result, nanoclusters of  $Cu_{90}Au_{10}$  and  $Cu_{10}Au_{90}$  compounds were isolated from the whole range of considered particles. Some parameters that contribute to the stabilization of the formation of the amorphous and crystalline structures of these nanoclusters were determined.*

**Keywords:** nanoclusters, phase transitions, PCM memory, copper, gold.

### Введение

Самым распространенным типом энергонезависимых устройств, на сегодняшний день, является планарная флеш-память, построенная на транзисторах с плавающим затвором. Однако масштабирование ячеек данного типа сопряжено с рядом проблем. Так при размерах элементов ниже 15 нм возрастают токи утечки, приводящие к деградации компонентов и потере информации. Кроме того, значительно ухудшается надежность, так как снижение количества хранимых в ячейках электронов влечет за собой рост вероятности возникновения стохастических эффектов, в том числе перекрестных помех от соседних элементов. И хотя ряд производителей выпускают планарную флеш-память, изготовленную по 10-ти нанометровым технологиям, очевидно, что данный тип твердотельных накопителей достиг пределов своего технологического развития. Таким образом, проблема создания альтернативных устройств энергонезависимой памяти по-прежнему остается актуальной.

В качестве одного из основных кандидатов на роль универсальной памяти специалисты рассматривают память с изменением фазового состояния носителя (*Phase Charge Memory, PCM*), принцип функционирования которой строится на

явлении резкого возрастания удельной проводимости вещества при переходе из аморфного состояния в кристаллическое. Данный тип накопителей обладает рядом положительных характеристик: высокими скоростями чтения и записи; значительным потенциалом масштабируемости ячеек и большим ресурсом службы (до  $10^{12}$  циклов перезаписи).

Элементарная ячейка РСМ памяти представляет собой систему из управляющего транзистора и рабочего фазоинверсного слоя, зажатого между двумя электродами (тип 1T1R). В процессе записи информации на электроды подается напряжение достаточное для возникновения электронного пробоя рабочего слоя и образования проводящего канала. Рассеиваемое в данной области тепло разогреет активную область выше температуры кристаллизации. После прекращения действия импульса РСМ материал переходит в состояние SET с низким сопротивлением, т.е. кристаллизуется. Для стирания информации необходимо подать короткий импульс тока большей амплитуды, т.к. требуется нагреть рабочую область выше температуры плавления, и осуществить относительно быстрый отвод тепла от активной области. За счет более интенсивного остывания осуществляется переход материала ячейки в аморфное состояние RESET.

В настоящее время в качестве рабочего слоя элементов РСМ памяти используют тройной сплав на основе теллура, например,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  или  $\text{Sb}_2\text{Te}$ , легированный Ag/In ( $\text{Ag}_5\text{In}_5\text{Sb}_{60}\text{Te}_{30}$ ) [1]. Однако данные халькогенидные сплавы имеют относительно низкую температуру кристаллизации, в следствие чего возникают проблемы с термостабильностью и сохранностью данных в аморфном состоянии. Кроме того, технологический процесс изготовления устройств с применением данных сплавов осложняется тем, что теллур имеет низкую температуру плавления и высокое давление пара, которые приводят к нежелательным взаимодействиям материалов, что влечет за собой неоднородности в составе рабочего слоя и сокращает срок службы ячеек [2]. Поэтому в последнее время активно изучаются свойства не халькогенидных сплавов, например, Ge–Sb [3], Ga–Sb [4], Al–Sb [5].

В данной работе исследуются процессы структурообразования нанокластеров сплава меди и золота, с целью анализа их потенциала для использования в качестве рабочего слоя в устройствах РСМ памяти.

### **1. Компьютерная модель**

Принцип функционирования устройств РСМ памяти обуславливает ряд требований, предъявляемых к материалу рабочего слоя ячеек. Во-первых, сопротивления активных элементов должны иметь четкую зависимость от типа внутренней структуры вещества. Во-вторых, необходимо четкое разграничение параметров системы, при которых происходит переход к аморфной и кристаллической фазам. В-третьих, стабильность этих состояний, т.е. отсутствие спонтанного фазового перехода при процессах чтения информации и в период ее длительного хранения. Кроме того, тенденции совершенствования устройств энергонезависимой памяти предполагают увеличение плотности записи данных. Поэтому интерес для изучения представляют малые нанокластеры диаметрами до 10 нм.

Так в данной работе путем компьютерного моделирования исследовались нанокластеры сплава Cu–Au диаметрами 2.0, 4.0, 6.0 и 8.0 нм. При этом был применен метод молекулярной динамики, который достаточно хорошо описывает широкий спектр свойств различных металлов и сплавов. Силы межатомного вза-

имодействия вычислялись на основе модифицированного потенциала сильной связи TB-SMA. При помощи скоростного алгоритма Верле (с шагом по времени  $h = 1$  фс) определялась средняя кинетическая энергия атомов, затем на ее основе вычислялась температура системы. Моделирование проводилось с использованием компьютерной программы MDNTP, разработанной Dr. Ralf Meyer (Universitat Duisburg, Germany).

Начальные сферические кластеры были получены путем вырезания из идеальной ГЦК решетки меди, в которой часть атомов Cu была случайным образом заменена на атомы Au в определенных процентных соотношениях. После все кластеры прошли обязательную процедуру термической релаксации при температуре 100 К.

## 2. Результаты и обсуждение

Помимо размерных эффектов, значительное влияние на свойства бинарных нанокластеров оказывает их химический состав. В некоторых случаях даже добавление одного примесного атома способно существенно повлиять на характеристики частицы. Если рассматривать данные кластеры с позиции применения в качестве рабочего слоя устройств РСМ памяти, то к первым двум факторам добавляется время охлаждения частиц из расплава, т.к. процессы формирования аморфной и кристаллической конфигураций сопряжены с более интенсивным или замедленным темпом отвода тепла соответственно.

В данной работе нами были исследованы все вышеперечисленные факторы. Диаметры кластера варьировались от 2.0 до 8.0 нм. Менялся химический состав кластеров, а именно доля содержания золота в сплаве (90 к 10, 70 к 30, 50 к 50, 30 к 70 и 10 к 90). На первом этапе моделирование производилось в рамках термостата Нозе. Кластеры ступенчато нагревались до температуры 1500 К (с шагом 50 К) с целью полного разрушения дальнего порядка в них, при каждом фиксированном значении и выдерживались в течении 0.3 нс. Во второй части эксперимента производилось плавное охлаждение исследуемых ансамблей с помощью термостата Андерсена до температуры 300 К с некоторыми фиксированными скоростями, соответствовавшими времени охлаждения 0.4, 1.0, 4.0 нс и темпам отвода тепловой энергии  $30 \cdot 10^{11}$ ,  $12 \cdot 10^{11}$ ,  $3 \cdot 10^{11}$  К/с. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Из анализа полученных результатов видно, что для кластеров  $\text{Cu}_{50}\text{Au}_{50}$  и  $\text{Cu}_{30}\text{Au}_{70}$  предпочтительной является аморфная конфигурация вне зависимости от темпа отвода тепловой энергии. Причем с ростом диаметра частиц данная зависимость становится более выраженной. Сплав  $\text{Cu}_{70}\text{Au}_{30}$  в целом демонстрирует похожие результаты. Так при темпе отвода тепловой энергии К/с доля кристаллических структур с ростом размера кластеров уменьшается с 90% до 60%. Частицы  $\text{Cu}_{90}\text{Au}_{10}$  демонстрируют более широкий спектр значений. Здесь при  $\Delta T / \Delta t = 30 \cdot 10^{11}$  К/с преобладающей является аморфная конфигурация (стабилизация наблюдается при  $d = 6.0$  нм), а при  $\Delta T / \Delta t = 3 \cdot 10^{11}$  К/с – кристаллическая (максимум достигается при  $d = 8.0$  нм). Однако наиболее интересной является конфигурация  $\text{Cu}_{10}\text{Au}_{90}$ . В данном случае тип субструктуры частиц фактически не зависит от диаметра кластера, а определяется темпом отвода тепловой энергии. При медленном охлаждении формируется кристаллическая

структура (в 100% случаев), при быстром и среднем темпах – аморфная (90–100%).

Таблица 1 – Результаты моделирования

Состав		Cu <sub>90</sub> Au <sub>10</sub>		Cu <sub>70</sub> Au <sub>30</sub>		Cu <sub>50</sub> Au <sub>50</sub>		Cu <sub>30</sub> Au <sub>70</sub>		Cu <sub>10</sub> Au <sub>90</sub>	
Диаметр кластера d, нм	Темп отвода тепла ΔT/Δt·10 <sup>11</sup> К/с	Доля кристаллических структур, %		Доля аморфных структур, %		Доля кристаллических структур, %		Доля аморфных структур, %		Доля кристаллических структур, %	
		2	30	70	30	40	60	0	100	0	100
	12	100	0	40	60	0	100	0	100	0	100
	3	100	0	90	10	30	70	40	60	100	0
4	30	30	70	0	100	0	100	0	100	0	100
	12	60	40	0	100	0	100	0	100	0	100
	3	100	0	80	20	30	70	20	80	100	0
6	30	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
	12	60	40	0	100	0	100	0	100	0	100
	3	90	10	70	30	20	80	0	100	100	0
8	30	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
	12	50	50	0	100	0	100	0	100	0	100
	3	100	0	60	40	0	100	0	100	100	0

Таким образом, по результатам исследования можно сделать вывод о том, что материалом рабочего слоя ячеек РСМ памяти могут выступать сплавы Cu<sub>90</sub>Au<sub>10</sub> и Cu<sub>10</sub>Au<sub>90</sub>, но с ограничением размера кластеров не менее 8.0 нм в первом случае и 4.0 нм во втором.

### 3. Заключение

Совершенствование устройств фазоинверсной памяти сопряжено с изучением свойств как различных сплавов на основе теллура, так и не халькогенидных соединений германия, гафния и свинца, а также с поиском новых материалов активного слоя ячеек. Особый интерес в этом отношении представляют металлические нанокластеры. Это связано в первую очередь с их относительно малой стоимостью и относительно высокой вероятностью получения частиц с требуемым распределением по размерам в процессе синтеза.

В данной работе исследовалась возможность применения нанокластеров Cu–Au в качестве рабочего слоя ячеек РСМ памяти. В результате моделирования методом молекулярной динамики с использованием потенциала сильной связи ТВ-SMA процесса охлаждения из расплава частиц различного диаметра и химического состава при вариации темпов отвода тепловой энергии (30·10<sup>11</sup>, 12·10<sup>11</sup>, 3·10<sup>11</sup> К/с) нами были выделены два наносплава: Cu<sub>9</sub>Au<sub>1</sub> и Cu<sub>1</sub>Au<sub>9</sub>. Причем в первом сплаве наблюдается значительное влияние размерных эффектов – формирование аморфной структуры стабилизируется при росте диаметра кластера. Таким образом, применение наносплавов Cu<sub>90</sub>Au<sub>10</sub> и Cu<sub>10</sub>Au<sub>90</sub> в качестве битов инфор-

мации в устройствах РСМ памяти возможно, однако существуют ограничения минимального размера кластера 8.0 и 4.0 нм соответственно.

Представленная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, номера грантов 18-42-190001 и 19-48-190002.

#### *Литература*

1. Phase change materials for non-volatile memory devices: from technological challenges to materials science issues / P. Noe [и др.]. – IOPscience, 2017. – 54 p.
2. Макушин М. Динамика развития технологий и рынка схем памяти / М. Макушин, О. Орлов // Электроника. – 2017. – № 10. – С. 52–64.
3. Irreversible altering of crystalline phase of phase-change Ge–Sb thin films / L. Krusin-Elbaum [и др.] // Applied Physics Letters. – 2010. – № 96.
4. In-situ crystallization of GeTe\GaSb phase change memory stacked films / A. Velea [и др.] // Journal of Applied Physics. – 2014. – № 116.
5. Phase transition characteristics of Al-Sb phase change materials for phase change memory application / Xilin Zhou [и др.] // Applied Physics Letters. – 2013. – № 103.

#### *References*

1. Noe P., Vallee C., Hippert F., Fillot F., Raty J-Y. Phase change materials for non-volatile memory devices: from technological challenges to materials science issues. – IOPscience, 2017. – 54 p.
2. Makushin M., Orlov O. // Elektronika. – 2017. – No. 10. – P. 52–64.
3. Krusin-Elbaum L., Shakhvorostov D., Cabral Jr. C. et al. // Applied Physics Letters. – 2010. – No. 96.
4. Velea A., Borca C. N., Socol G., Galca A. C. et al. // Journal of Applied Physics. – 2014. – No. 116.
5. Xilin Zhou, Liangcai Wu, Zhitang Song, Feng Rao, Kun Ren et al. // Applied Physics Letters. – 2013. – No. 103.

УДК 621.7

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ КОНСОЛИ КРЫЛА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЗА СЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО УГЛА УКЛАДКИ ВОЛОКОН**

© Л. А. Бохоева<sup>1,a</sup>, А. Б. Балданов<sup>1</sup>, В. Е. Рогов<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670033, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, стр. 1

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук  
670047, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

E-mail: <sup>a</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru

*Исследовано напряженно-деформированное состояние композитной слоистой консоли крыла беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Использована консоль крыла БПЛА аэродинамической схемы «летающее крыло». Разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое. Определена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА в системе ANSYS, обеспечивающая максимальную прочность и жесткость при заданных нагрузках. Данный подход может быть широко использован при проектировании и изготовлении элементов конструкций и изделий из композиционных материалов.*

**Ключевые слова:** крыло, модель, композиционные материалы, укладка волокон, беспилотный летательный аппарат.

## ENSURING THE STIFFNESS OF THE WING CONSOLE OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE DUE TO THE OPTIMAL FIBERS LAYING ANGLE

L. A. Bokhoeva<sup>1,a</sup>, A. B. Baldanov<sup>1</sup>, V. E. Rogov<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670033, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., building 1

<sup>2</sup>Baikal institute of nature management, Siberian branch of the Russian academy  
of sciences 670047, Russia, Ulan-Ude, Sakhyanovoy St., 6

E-mail: <sup>a</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>b</sup>rogov54v@mail.ru

*The paper presents the research of stress-strain state of the composite layered wing console of an unmanned aerial vehicle (UAV). UAV wing console of the «flying wing» aerodynamic configuration is used. An automated procedure has been developed for selecting the fibers laying angle in the layer. The optimal construction of the multilayer plating of the UAV wing console was determined in the ANSYS system. The construction provides maximum strength and stiffness at given loads. This approach can be widely used in the design and manufacture of structural elements and products made of composite materials.*

**Keywords:** wing, model, composite materials, fibers laying, unmanned aerial vehicle.

**Введение.** В настоящее время резко повысился интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), что вызвано с расширением сфер их использования. Первые БПЛА разрабатывались, как одноразовые или условно-многооборотные аппараты [1], потому при их проектировании, с точки зрения конструктивных параметров, не уделялось должного внимания, по сравнению с аэродинамикой и управлением. Для снижения стоимости и массы беспилотников изготавливают корпус из пенопласта, который обшивают специальной полимерной пленкой для имитации карбонового материала. В связи с применением на БПЛА дорогостоящего специального оборудования на сегодняшний день актуальны беспилотники с увеличенным сроком службы, надежной конструкции за счет стабильности прочностных характеристик, с максимальной полезной нагрузкой при минимальной массе самого аппарата.

В связи с этим при изготовлении корпуса БПЛА все большее применение находят современные легкие слоистые композитные материалы (КМ). Такие слоистые КМ сами представляют конструкцию, состоящую из слоев, специальным образом закрепленных между собой, при этом за счет различных углов укладки слоев имеется возможность нужным образом сочетать полезные свойства и получать материал, обеспечивающий высокую удельную жесткость и прочность силовых элементов.

В связи с этим научный интерес представляет анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций из многослойных КМ в зависимости от реальных нагрузок и расчет их параметров.

В качестве объекта исследования выбрана консоль крыла БПЛА аэродинамической схемы «летающее крыло», полуразмах крыла равен 1285 мм, корневая и концевая хорды – 500 и 137 мм, усредненный угол стреловидности по передней кромке составляет 18,86° со спрямленным участком и несимметричным аэродинамическим профилем.

**Моделирование крыла БПЛА.** Компьютерное моделирование крыла БПЛА аэродинамической схемы «летающее крыло» проводили в системе САПР SolidWorks [2]. На рисунке 1 представлена модель в формате IGS, выполненная с помощью 3D сканера с реального крыла, которая импортирована в виде оболочки расширением IGES в систему ANSYS.

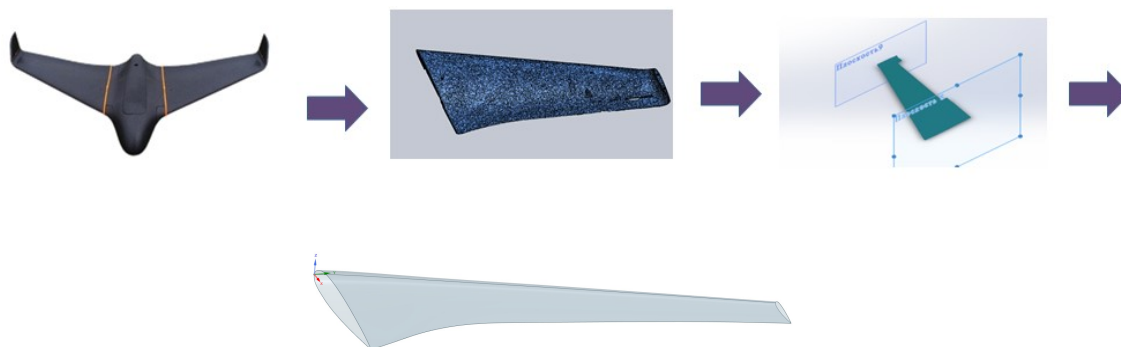


Рисунок 1 – Этапы моделирования геометрической модели крыла

Для определения сил, действующих на БПЛА во время полета, использовали модуль FluidFlow системы ANSYS. Установлено, что максимальная критическая нагрузка возникает при скорости  $180 \text{ км/ч} = 50 \text{ м/с}$ , угол атаки  $\alpha = 15^\circ$ . Конечно-элементная (КЭ) сетка модели была сгенерирована в автоматическом режиме, тип элементов – треугольный, количество элементов – 647895, количество узлов – 59259. Моделирование аэродинамического обтекания крыла проведено с переменным временным шагом. Параметры атмосферы (плотность, кинематическая вязкость) определены из [3]. Схема приложения нагрузок соответствует реальному нагружению.

**Выбор оптимальной укладки слоев.** Для оптимального выбора укладки слоев, обеспечивающей прочность и жесткость крыла от внешних максимальных нагрузок, выбран критерий для расчета на жесткость – максимальная деформация крыла не должна превышать 2,5 мм. В модуле Direct Optimization проведена оптимизация углов укладок слоев из КМ с использованием модуля Adaptive Single – Objective Optimization. Создана модель крыла, состоящая из четырех слоев. На рисунках 2, 3 представлено НДС четырехслойной модели крыла с максимальным прогибом 2,34 мм. Максимальное нормальное напряжение первого слоя – 9,55 МПа (рисунок 3а), второго слоя – 6,99 МПа (рисунок 3б), третьего слоя – 5,97 МПа (рисунок 3в), четвертого слоя – 6,23 МПа (рисунок 3г). При расчете крыла из двух полных и двух неполных слоев рассмотрены 64 варианта укладки волокон. Оптимальные варианты угла укладки волокон четырехслойной модели в зависимости от прогиба:

1. Первый слой  $102^\circ$ , второй слой  $69^\circ$ , третий слой  $104^\circ$ , четвертый слой  $71^\circ$  (перемещение 2,34 мм);
2. Первый слой  $82^\circ$ , второй слой  $111^\circ$ , третий слой  $87^\circ$ , четвертый слой  $62^\circ$  (перемещение 2,36 мм);
3. Первый слой  $89^\circ$ , второй слой  $116^\circ$ , третий слой  $58^\circ$ , четвертый слой  $59^\circ$  (перемещение 2,38 мм).

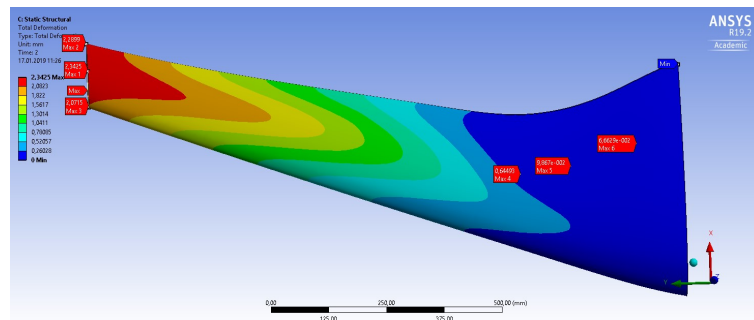
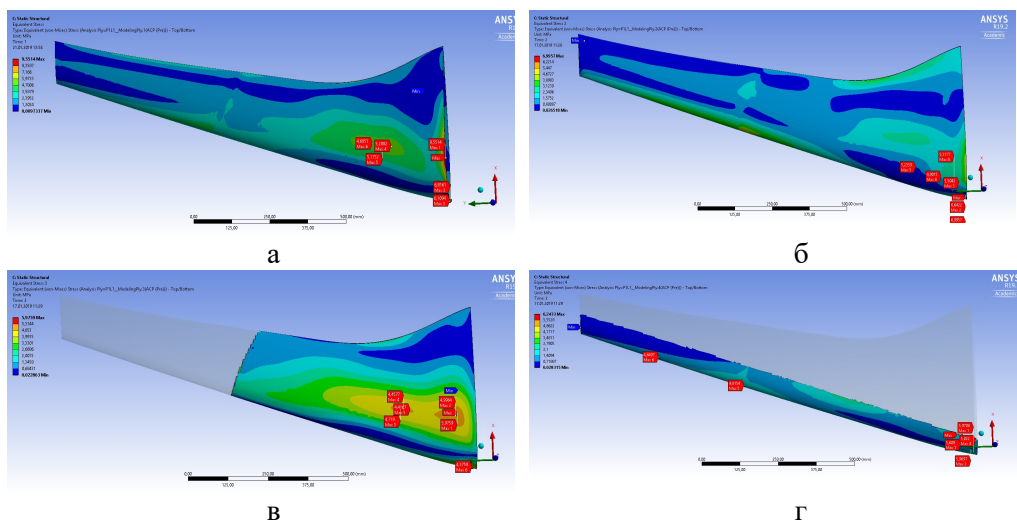


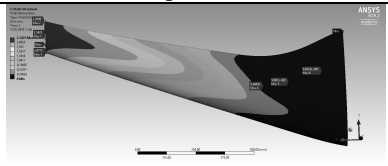
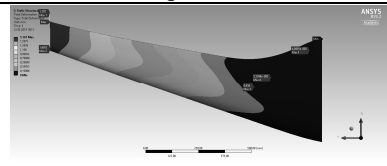
Рисунок 2 – Деформация



а – первый слой, б – второй слой, в – третий слой, г – четвертый слой  
Рисунок 3 – Распределение напряжений по слоям

В таблице 1 приведены сравнительные данные различных моделей крыла (деформация, расход материала и масса): а) модели, состоящей из двух полных слоев и двух укороченных (крыло 1); б) модели, выполненной из четырех полных слоев (крыло 2); в) модели, изготовленной из пенопласта (крыло 3).

Таблица 1 – Сравнительные данные различных моделей крыла

	Крыло 1	Крыло 2	Крыло 3
Деформация (мм)	 2,342 мм	 1,796 мм	Разрушилось
Расход материала	$S_{\text{крыло1}} = 2,036 \text{ м}^2$	$S_{\text{крыло2}} = 2,936 \text{ м}^2$	
Масса модели	$m_{\text{крыло1}} = 1,4349 \text{ кг}$	$m_{\text{крыло2}} = 2,599 \text{ кг}$	$m_{\text{крыло3}} = 1,24 \text{ кг}$



Из данных, представленных в таблице 1, видно, что модель консоли крыла, состоящая из четырех полных слоев, более чем на 1 кг тяжелее, чем спроектированная модель, при большем расходе материала. Максимальная деформация консоли крыла в обоих случаях не превышает 2,5 мм.

**Заключение.** В результате работы была разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое, в системе ANSYS определена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА, обеспечивающая максимальную прочность и жесткость при заданных нагрузках. Данный подход может быть широко использован при проектировании и изготовлении элементов конструкций и изделий из композиционных материалов.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект № 9.7667.2017/БЧ, проект № 9.11221.2018/11.12.

#### *Литература*

1. Фетисов В.С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В.С. Фетисов, Л.М. Неугодникова, В.В. Адамовский, Р.А. Красноперов. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.
2. Моделирование элементов конструкции беспилотного летательного аппарата в программном комплексе SolidWorks / Л.А. Бохоева [и др.] // Механики XXI века. – 2018. – № 1. – С. 211-215.
3. ГОСТ 4401. Атмосфера стандартная. Параметры. – Москва: Издательство стандартов ИПК, 2015. – 181 с. – Введен 01.07.1982.

#### *References*

1. Fetisov V.S., Neugodnikova L.M., Adamovskii V.V., Krasnoperov R.A. Pilotless aviation: terminology, classification, current state. – Ufa: FOTON, 2014. – 217 p.
2. Bokhoeva L.A., Butorin A.A., Bairov S.A., Kondratieva A.N., Ipatov D.N. // Mechanical engineers to XXI century. – 2018. – No. 1. – P. 211-215.
3. GOST 4401. Standart atmosphere. Parameters. – Moscow: Publishing house of standards IPK, 2015. – 181 p. – Introduced 01.07.1982.

УДК 629.783; 629.039.58

### **РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТЫХ ПЛОСКИХ ЭКРАНОВ ПРИ УДАРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САД/САЕ-СИСТЕМ**

© Л. А. Бохоева<sup>1</sup>, Е. Б. Бочектуева<sup>2</sup>, А. Б. Балданов<sup>3</sup>, В. Ю. Курохтин<sup>4</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1

E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>bochektueva.e@yandex.ru, <sup>3</sup>aldarbaldanov@gmail.com,  
<sup>4</sup>kurokhtin91@gmail.com

*В работе представлен расчет слоистых экранов из композиционных материалов на прочность при ударе. Расчет выполнен в программном комплексе Ansys с использованием модуля динамики – Explicit Dynamics. В расчетной модели методом конечных элементов получены максимальные напряжения и деформации в слоях. Рассмотрены плоские экраны, состоящие из семнадцати слоев с разными углами укладки волокон в слое. Результаты расчетов показали, что угол укладки волокон в слое влияет на прочность плоских экранов при соударении со скоростными частицами космического мусора.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, удар, напряжения, деформация, экраны, угол укладки волокон.

## CALCULATION OF STRENGTH OF LAMINATED FLAT SCREENS ON IMPACT WITH USAGE OF CAD/CAE SYSTEMS

L. A. Bokhoeva<sup>1</sup>, E. B. Bochektueva<sup>2</sup>, A. B. Baldanov<sup>3</sup>, V. Yu. Kurokhtin<sup>4</sup>

East Siberia State University of Technology and Management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., building 1

E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>bochektueva.e@yandex.ru, <sup>3</sup>aldarbaldanov@gmail.com,  
<sup>4</sup>kurokhtin91@gmail.com

*The paper presents a strength calculation of laminated screens made of composite materials upon impact. The calculation was performed in the Ansys software package using the dynamics module – Explicit Dynamics. In the calculation model by the finite element method, the maximum stresses and strains in the layers are obtained. Flat screens consisting of seventeen layers with different angles of fiber laying in the layer are considered. The calculation results showed that the angle of fiber laying in the layer affects the strength of flat screens in collision with high-speed particles of space debris.*

**Keywords:** polymeric composite materials, impact, stresses, deformation, screens, angle of fibers laying.

Армированные непрерывными высокопрочными волокнами полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в авиакосмической отрасли. Темпы внедрения армированных пластиков стремительно растут с каждым годом по сравнению с такими более распространенными конструкционными материалами, как алюминий, сталь и другие металлические сплавы. Полимерные композиционные материалы имеют высокую удельную прочность и модуль упругости, превосходную коррозионную стойкость и повышенную износостойкость. Помимо этого, затраты на изготовление конструкций из ПКМ довольно часто оказываются ниже, чем на производство аналогичных металлических изделий [1].

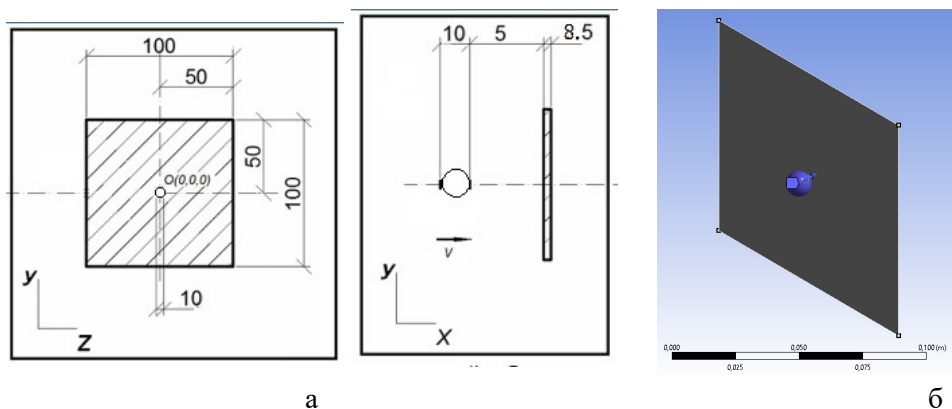
Однако ПКМ имеют также и ряд недостатков, наиболее важный среди них – это низкая сопротивляемость ударному воздействию (ударостойкость). Ввиду сосредоточения на низких орбитах большого количества космического мусора вероятность соударения с низкоорбитальными космическими аппаратами значительно возросла, поэтому задача упрочнения многослойных корпусов и защитных экранов из композиционных материалов стоит особенно остро. Скорость столкновения с метеоритами и осколками космического мусора варьируется в диапазоне 2 – 70 км/с. Наиболее опасные столкновения с осколками космического мусора происходят на скорости до 15 км/с при среднем значении 10,3 км/с [2, 3].

В последнее время решению проблем ударостойкости конструкционных материалов посвящено большое количество работ. Как правило, эти исследования включают изучение ударных характеристик композитов, армированных непрерывными волокнами, с использованием компьютерного моделирования [4]. Композиты, армированные непрерывными волокнами, наиболее широко используются в авиационно-космической технике при изготовлении защитных экранов, где случайные ударные воздействия могут привести к катастрофическим последствиям. Впервые в работе приводится расчет на прочность при ударе слоистых

экранов в виде пластин с различной укладкой волокон в слоях в программном комплексе Ansys.

Геометрия модели слоистой пластины и сферы, которая является частицей космического мусора, представлена на рисунке 1а. Изометрия двух тел разработана в модуле Ansys Design Modeler и представлена на рисунке 1б, в таблице 1 даны характеристики и параметры рассматриваемых объектов. Сделан расчет на прочность от удара пластин с разной укладкой волокон в слоях.

Первый пример: пластина имеет 17 слоев с укладкой волокон под углом 0 градусов в каждом слое. Объекты разбиваем на конечные элементы (рисунок 2а), геометрию объектов импортируем в модуль Ansys ACP для задания свойств композиционной панели и металлической сферы, таких как углы укладки, плотность, толщина одного слоя (согласно данным таблицы 1). После задания свойств материала данные из Ansys ACP передаются в модуль Explicit Dynamics, где задаются граничные условия, скорость движения частицы (сферы), конечное время отсчета. Начало удара приходится на 17-й слой.

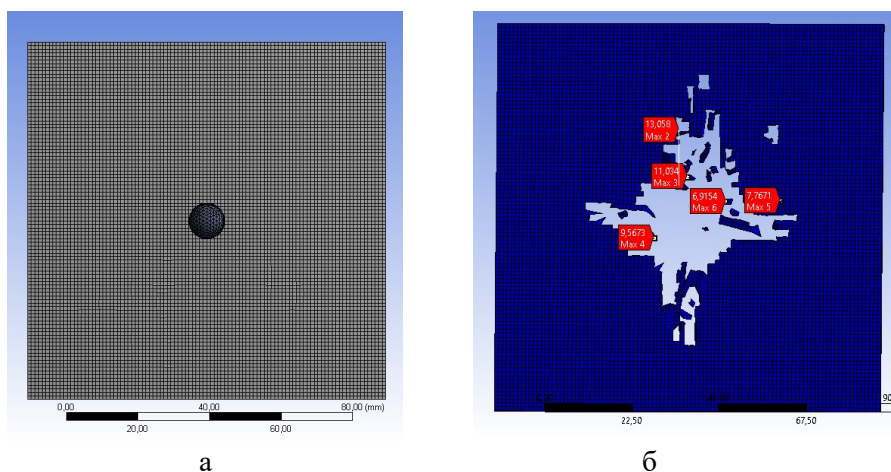


а – размеры образцов (мм), б – изометрический вид двух тел  
Рисунок 1 – Схема расчетной области

Таблица 1 – Параметры объектов

Материал 1. Structural Steel	Материал 2. Epoxy E-Glass UD
Стальная сфера $r = 5$ мм $V_z = 10$ км/с $P = 7\,850$ кг/м <sup>3</sup> $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па $\mu = 0,3$	Композитная пластина $[0]_{17}$ размером 10×10 см Толщина $m$ -го слоя = 0,5 мм Толщина пластины = 8,5 мм $P = 2\,000$ кг/м <sup>3</sup> $E_x = 45\,000$ МПа $E_y = 10\,000$ МПа $E_z = 10\,000$ МПа $\mu_{xy} = 0,3$ МПа $\mu_{yz} = 0,4$ МПа $\mu_{xz} = 0,3$ МПа $G_{xy} = 5\,000$ МПа $G_{yz} = 3\,846,2$ МПа $G_{yz} = 5\,000$ МПа

Расчет на прочность при ударе сделан в подпрограмме Explicit Dynamics методом конечных элементов с помощью приложения AUTODYN (Ansys Inc), которое предназначено для решения двух- и трехмерных задач нелинейной динамики, деформируемых тел. Приложение, имеет возможность моделировать элементы конструкций из композиционных материалов под нагрузками. Моделирование высокоскоростного удара, разрушение многослойной пластины представлены на рисунке 2б.



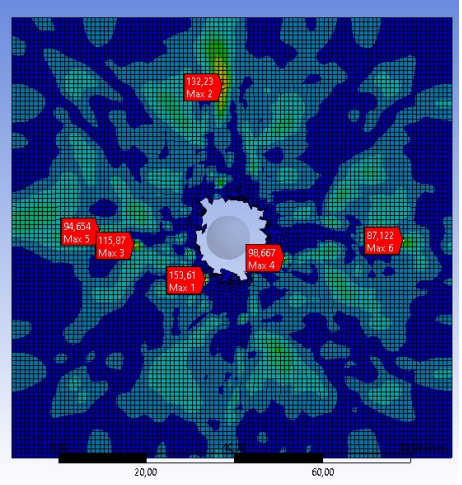
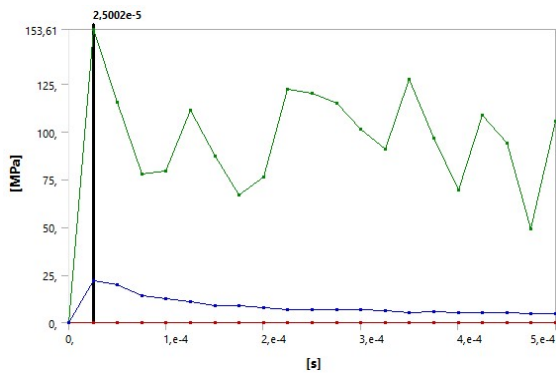
а – сетка конечных элементов, б – разрушение пластины из КМ  
Рисунок 2 – Создание расчетной модели в Ansys

Полученные максимальные эквивалентные напряжения (von Mises) по слоям, возникающие от удара при однонаправленной укладке волокон под углом 0 градусов в слоях  $[0]_{17}$ , даны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов при укладке  $[0]_{17}$

М-слои	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Напряжение $\sigma_{\max}$ , МПа	130,83	151,55	148,28	145,03	141,78	138,56	135,37	<b>153,61</b>	129,19	145,28	124,82	123,26	125,39	125,99	128,56	131,55	134,6

В момент времени  $t = 2,5 \cdot 10^{-5}$  с удара, при соприкосновении частицы с пластиной, максимальные напряжения возникают в 8-м слое (рисунок 3б). Пластины с данной укладкой волокон в слоях начинают до 8-го слоя прогибаться или частично разрушаться, остальные слои не разрушаются. На рисунке 3 приведены результаты расчета. Зависимость силы удара от времени соударения частицы с пластиной представлена на графике (рисунок 3а). Максимальные напряжения, возникающие от удара в пластине, представлены на рисунке 3б.



а б

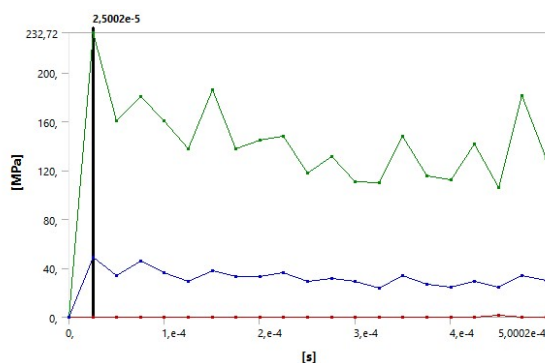
а – зависимость максимального напряжения от времени для 8-го слоя, б – эквивалентные напряжения (von Mises) (МПа) для 8-го слоя в момент времени  $2,5 \cdot 10^{-5}$  с  
Рисунок 3 – Расчет на удар при укладке [0]<sub>17</sub>

Второй пример: пластина имеет 17 слоев с укладкой волокон под углом  $\pm 45^\circ$  и  $90^\circ$  в каждом слое ([45,-45,0,90]<sub>4</sub>[45]). Результаты расчета на прочность при ударе представлены в таблице 3.

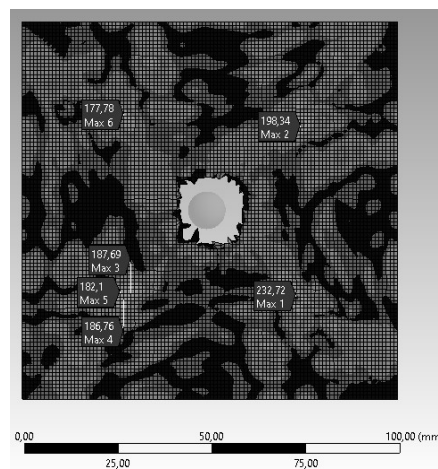
Таблица 3 – Результаты расчетов при укладке [45,-45,0,90]<sub>4</sub>[45]

М-слой	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Угол укладки	45	-45	0	90	45	-45	0	90	45	-45	0	90	45	-45	0	90	45
Напряжение $\sigma_{max}$ , МПа	191,82	152,21	127,77	218,69	189,09	102,97	111,88	210	185,04	104,22	108,34	210,05	202,16	129,83	165,64	217,89	<b>232,72</b>

В момент времени  $t = 2,5 \cdot 10^{-5}$  с удара при соприкосновении частицы с пластиной максимальные напряжения возникают в 17-м слое (рисунок 4б). Пластины с данной укладкой волокон в слоях выдерживают максимальное напряжение 232,72 МПа и начинают разрушаться при ударе в 17-м слое. На рисунке 4 приведены результаты расчета. Зависимость силы удара от времени соударения частицы с пластиной представлена на графике (рисунок 4а). Максимальные напряжения, возникающие от удара в пластине, представлены на рисунке 4б.



а



б

а – зависимость максимального напряжения от времени для 17-го слоя, б – эквивалентные напряжения (von Mises) (МПа) для 17-го слоя в момент времени  $2,5 \cdot 10^{-5}$  с

Рисунок 4 – Расчет на удар при укладке  $[45,-45,0,90]_4[45]$

Вывод: результаты расчетов показали, что угол укладки волокон в слое влияет на прочность при соударении экрана со скоростными частицами космического мусора. Пластина с укладкой волокон  $[45,-45,0,90]_4[45]$  на 33% прочнее, чем пластина с укладкой волокон в слое под углом 0 градусов. Наибольшие напряжения у пакета слоев  $[45,-45,0,90]_4[45]$  возникают в начале удара (17-й слой), после пробития данной пластины стальная сфера в конце отсчета (0,0005 с) удалась от начального положения на 7 478,7 мм. Наибольшие напряжения у пакета слоев  $[0]_{17}$  возникают в середине удара (8-й слой), сфера удалась от начального положения на 7 489,4 мм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-29-18050\18.

#### Литература

1. Антонов А.В. Свойства армированных пластиков на основе эпоксидных смол, модифицированных полисульфоном, при ударном нагружении: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 02.00.06 / А. В. Антонов. – Москва, 2003. – 146 с.
2. Бохоева Л. А. Анализ современного состояния многослойных защитных конструкций из композиционных материалов / Л. А. Бохоева, Г. П. Садовский, С. С. Гуртовой // Механика XXI века. – 2019. – № 18. – С. 280–285.
3. Impact Properties Study of Fiber Reinforced Resin Matrix Composites / Hebin Hu [и др.] // International Journal of Materials Science and Applications. – 2017. – Т. 6. – № 6. – С. 309-315.
4. Муйземнек А. Ю. Испытания, идентификация параметров и расчет слоистых композиций: учебное пособие / А. Ю. Муйземнек. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2009. – 228 с.

#### Bibliography

1. Antonov A. V. Svoistva armirovannykh plastikov na osnove epoksidnykh smol, modifitsirovannykh polisulfonom, pri udarnom nagruzenii: dissertation for the degree of candidate of technical sciences: 02.00.06. – Moscow, 2003. – 146 p.
2. Bokhoeva L.A., Sadovskii G.P., Gurtovoi S.S. // Mechanical engineers to XXI century. – 2019. – No. 18. – P. 280–285.

3. Hebin Hu, Xueliang Bian, Xiaoyan Cao, Wenqi Shen, Bing Li // International Journal of Materials Science and Applications. – 2017. – V. 6. – No. 6. – P. 309-315.

4. Muizemnek A. Yu. Ispytaniya, identifikatsiya parametrov i raschyot sloistykh kompozitov: uchebnoe posobie. – Penza: IITs PGU, 2009. – 228 p.

УДК 519.6

## STOCK MARKET FORECASTING USING NEURAL NETWORKS

© V. Steinhauer<sup>1</sup>, doctor; A. Steinhauer<sup>2</sup>, student

<sup>1</sup>Devoteam GmbH

64331, Germany, Weiterstadt, 10 Gutenbergstraße

<sup>2</sup>Heidelberg University

69117, Germany, Heidelberg, 1 Grabengasse

E-mail: valentin\_de@mail.ru

*Here are considered two complementary methods: 1. time series forecasting, 2. Bollinger Bands method. The first, if the training material is taken from different sources, can be used during the quiet times on the stock market to predict the stock market up and downs with a probability of 52 % – 53 %. Please keep in mind that this is still nearly random (50 % – 50 %). The second method is from completely different area: the stock market nervousness. When prices fall or grow too much compared to earlier times, then there is often a turning point. Statistics of positive forecasting in this case are better. But these cases do not occur as often, and it require waiting for this specific turning point.*

**Keywords:** *time series forecasting, Bollinger Bands method, forecasting process, stock markets.*

### Time series forecasting in the stock markets

Time series forecasting plays a big role in economics. The stock market courses, as well as the consumption of energy can be predicted to be able to make decisions. This tutorial shows one possible approach to how neural networks can be used for this kind of forecasting. It extends the Neuroph tutorial called "Time Series forecasting", that gives a good theoretical base for forecasting in general.

Used for our purpose, we take the time sequence as the observed variable at discrete time intervals. The analysis of time series includes a description of the process or phenomenon, which generates a sequence. To predict the time series, it is necessary to present the behavior of the process in the form of a mathematical model that can be extended in the future. To do this, the model has to be a good representation of observations in any local segment of time close to the present. Usually there is no need to have a model which would include very old observations, as they probably will not characterize the moment. Also, there is no need to include observations in the distant future, which means for a time interval that is greater than the horizon. Once the correct model is created, we can develop appropriate means for the forecasting.

To show how it works, we trained our network with the DAX (German stock index) data – for a month (02/03/2009 – 30/03/2009) – to predict the value on the 31/03/2009. As a strategy we took the data from 4 days to predict each 5<sup>th</sup> day. In the training set the 5<sup>th</sup> day is the observed value. As an example, the DAX data can be downloaded from the following URL [1-6]: <http://download.finance.yahoo.com/d/quotes.csv?s=^GDAXI&f=s1l1d1t1c1ohgv&e=.cs>

*TrainingSetGetter* is available for download as a part of the NetBeans project, however it is only the hard-coded sample data with normalization.

However, the first step is the normalization of the training data in the area (0-1). The following formula offers it as follows:

$$\text{Norm. value} = 0,8 \cdot \frac{\text{value} - v_1}{v_2 - v_1} + 0,1$$

Here 0,8 and 0,1 are the values to correct the data set from limits 0 and 1;

$v_2 = \text{maximum value} \cdot \text{expander}$ ;

$v_1 = \text{minimum value} / \text{expander}$ .

The normalization plays an important role in the preparation of data for the network training. The “expander” coefficient is used for compression or stretching at a normalization. In each case of a forecasting it is desirable to select this coefficient from control points.

Next, the network topology is defined: what type of network, how many layers and how many neurons per layer are used. Actually, there is no rule for this, and usually it is determined experimentally. However, the common type of network used for forecasting is a multi-layer perceptron. A recommendation is to have  $2n + 1$  nodes for hidden-layers, where  $n$  is the number of the input nodes. The output layer has only one node in this case. In our case we will get good results with the following topology and parameter set: *maxIteration* = 10000, *maxerror* = 0,0001 and the training set organized as follows:

```
public DataSet getTrainingSet(int n, int m) {  
    trainingSet = new DataSet(n, m);  
    trainingSet.addRow(in, out);  
}
```

The corresponding network is:

```
int maxIterations = 10000;  
NeuralNetwork neuralNet = new MultiLayerPerceptron(4, 9, 1);  
((LMS) neuralNet.getLearningRule()).setMaxError(0.0001);  
((LMS) neuralNet.getLearningRule()).setMaxIterations(maxIterations);  
neuralNet.learn(trainingSet);
```

At this point, we are ready to train and test the network. For testing we'll use prepared data set in which the DAX data are given from the 27/, 28/, 29/ and 30/03/2009 to predict the value on the 31/03/2009:

```
neuralNet.setInput(test);  
neuralNet.calculate();  
double[] networkOutput = neuralNet.getOutput();  
double predictedNormalized = networkOutput[0];
```

Since the network is initialised with random weight values, the test results will differ for each calculation. After five tests we get the following forecastings in a calcula-



tion time frame of 3 sec (2 CPU, 3.3 Ghz, 2 GB RAM, WinXP): 31/03/2009: 4084,61; 4081,28; 4073,08; 4075,22; 4087,42.

That result is so called committee – a collection of different neural networks, that together present the example, with the “expander” 1,30D. It gives a much better result compared to other neural networks procedures. The value which was official announced on that day was 4084,76.

Therefore, in order to get a better quantitative result an adjustment of the calculation sequence is in order, and was also carried out in the previous example. Also, we used concurrent calculations to create the committee. In general, even if a committee tends towards stability, it still can be used to control the training conditions. Relative scattering of the results from committee is the figure of merit. To create the concurrency, we used the jetlang package. The committee includes the following modules in the example: Actor, Channels, Message and it is controlled by the Main module.

The periodic signals prevail in this model (postulate). Which periodic signal is now major? Where is the under fitting or over fitting perceptron? Is an automatic prediction with this model possible? We'll show an algorithm with auto-correction which demonstrates some basic development ideas (“the biggest harmonic wave”):

1. We have more than one sequence of calculations (see "committee").

2. The main circle gives a variation of points ( $N$ ) in the window of time forecasting. A head period is determined by  $N$  in every variation from “the biggest harmonic wave”. The number of hidden layers is  $2 \cdot N + 1$  automatic. As a figure of merit we will

use the

so called  $R$ -factor through full time series data.

3. For each  $N$  there will be a variety the training sets: the elements will be removed consecutively to achieve the minimum for the  $R$ -factor and to achieve the optimal relationship between the under fitting and over fitting.

4. The median of the committee is the result of this simple automatic flow.

You should decide yourself, how well is this model “the biggest harmonics wave” works for your tasks. However, the simple DAX tests showed good mathematical results. With time series forecasting the best results were obtained when it was used to analyze the grow and fall of stock values, not for a prognosis of values themselves.

#### **Bollinger Bands for stock markets with Neuroph**

**Bollinger Bands** were invented by John Bolliger. Bollinger Bands indicate price variations of a financial instrument over time. They reflect the degree of nervousness in a stock market and are well suitable for not stable stock markets. If the value leaves the borders of the bands it will return with high probability into the borders again. And the main difficulty is to find: when does this return occur?

The main parameters for Bollinger Bands are:

- a  $N$ -period moving average;
- an upper band above the moving average;
- a lower band below the moving average.

You can read more about them in other documents, for example, see in the references. Here we will only concentrate how to use them in Neuroph. As the test data will be used DAX.

Let's have a look onto a specific example. In a prepared file, which contains the values of the DAX for one day with 5-minute interval we search for a situation where

the value goes beyond the average. To create the average for this example the last values were taken experimentally. The output is 1, if the current value of the DAX is above a 2 sigma from average or below 2 sigma from average and in other cases it is 0. "Correct" means the value returns to the band. The sigma is the standard deviation and it will be calculated in the method `standardAbweichung` dynamically. The algorithm is implemented in the program `BollingerAnalyze` (see the appendix (project package)). The normalization is similar to that shown above (see the `normalize` method in the `BollingerAnalyze.java`).

**In the training program** will be estimated (in order to control) the frequency of correct operation of the method: how many cases are right from all cases. You can try other parameters as well if they suit you. How to use the trained network is shown in the method `getRecommendation`. The method gives 1 or -1 if you have a Bollinger Bands situation (up or down) and will return the DAX in the band. In a bad case it is 0 or the value cannot be predicted. Of course, a big problem is to obtain the values in real time. However, this is an organizational problem and it may be probably done with the dynamic Neuroph value recognition from images in real time.

The message after the training and test is as follow:

```
extremes number = 4707
bollingers extremes number = 1006
full number of points = 21136
defects = 1.
```

In this case "defects" means how many bollinger situation were not correct predicted.

### **Conclusion**

Finally, two important factors in forecasting – the possibilities and interests of the people who create and use the forecasting. Ideally, the historical information is analyzed automatically, and the forecast is given to a manager for possible modifications and corrections. This step is crucial to improve the forecasting process but, as already mentioned, requires the cooperation of experienced managers. Then, after necessary alterations are made and you are satisfied with the process the forecast can be used it to make decisions and bring real benefit.

### *References*

1. Neural Network Package [Electronic resource]. – URL: <http://neuroph.sourceforge.net/> (date of the application: 19.08.2019).
2. *Carter-Greaves L.E.* Time series prediction with feed-forward neural networks. A beginners guide and tutorial for neuroph [Electronic resource]. – URL: <http://neuroph.sourceforge.net/TimeSeriesPredictionTutorial.html> (date of the application: 19.08.2019).
3. R-factor (crystallography). From Wikipedia, the free encyclopedia [Electronic resource]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/R-factor\\_\(crystallography\)](https://en.wikipedia.org/wiki/R-factor_(crystallography)) (date of the application: 19.08.2019).
4. Bollinger Bands. From Wikipedia, the free encyclopedia [Electronic resource]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bollinger\\_Bands](https://en.wikipedia.org/wiki/Bollinger_Bands) (date of the application: 19.08.2019).
5. Jetlang [Electronic resource]. – URL: <https://github.com/jetlang> (date of the application: 19.08.2019).
6. Download the NetBeans (java) projects with source [Electronic resource]. – URL: <http://www.tecde.homepage.t-online.de/software/StockMarketCommetee.zip> (date of the application: 19.08.2019).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SOLIDWORKS

© Л. А. Бохоева<sup>1</sup>, А. А. Буторин<sup>2</sup>, С. А. Баиров<sup>3</sup>, А. Н. Кондратьева<sup>4</sup>, Д. Н. Ипатов<sup>5</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, стр. 1

E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>sanya.butorin.96@mail.ru, <sup>3</sup>bairov.sofron@gmail.com,

<sup>4</sup>Lakki-4118@mail.ru, <sup>5</sup>ipatov.95@bk.ru

*Беспилотные летательные аппараты – летательные аппараты без экипажа на борту; они обладают разной степенью автономности – от дистанционного до полностью автоматического управления, а также могут различаться по конструкции, назначению и множеству других параметров. В рамках данной работы проведено моделирование в системе SolidWorks элементов конструкции беспилотного летательного аппарата по типу «X8 Skywalker»: фюзеляж, крыло, винглет. Проведено исследование аэродинамических характеристик аппарата на малых скоростях полета. Численный расчет выполнен в программном комплексе Solidworks Flow Simulation.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, Solidworks Flow Simulation, моделирование, аэродинамика, фюзеляж, 3D-сканер, крыло, винглет.

## MODELING OF STRUCTURE PARTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLE IN SOLIDWORKS SOFTWARE

L. A. Bokhoeva<sup>1</sup>, A. A. Butorin<sup>2</sup>, S. A. Bairov<sup>3</sup>, A. N. Kondratieva<sup>4</sup>, D. N. Ipatov<sup>5</sup>

East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya St., 40v, building 1

E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>sanya.butorin.96@mail.ru, <sup>3</sup>bairov.sofron@gmail.com,

<sup>4</sup>Lakki-4118@mail.ru, <sup>5</sup>ipatov.95@bk.ru

*Unmanned aerial vehicles are aerial vehicles without a crew on board; they have a different degree of autonomy – from remote to fully automatic control, and they can also vary in design, purpose and many other parameters. As part of this work, modeling in the SolidWorks system of structural elements of an unmanned aerial vehicle of the X8 Skywalker type such as fuselage, wing, winglet was performed. A study was made of the aerodynamic characteristics of the vehicle at low flight speeds. Numerical calculation was performed in the Solidworks Flow Simulation software package.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, Solidworks Flow Simulation, modeling, aerodynamics, fuselage, 3D scanner, wing, winglet.

### Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) зарекомендовали себя как надежное средство разведки, мониторинга и доставки грузов, как в военной, так и в гражданской авиации [1-3]. Целью работы является моделирование элементов конструкции для беспилотного летательного аппарата по типу «X8 Skywalker»: фюзеляж, крыло, винглет, и расчет аэродинамических характеристик.

Фюзеляж – основная несущая конструкция беспилотника, служащая для объединения в одно целое всех его частей, а также для размещения оборудования, батарей и полезной нагрузки. Винглеты — небольшие дополнительные элементы на концах плоскостей крыла беспилотника в виде крылышек или плоских шайб, которые служат для увеличения эффективного размаха крыла, сни-

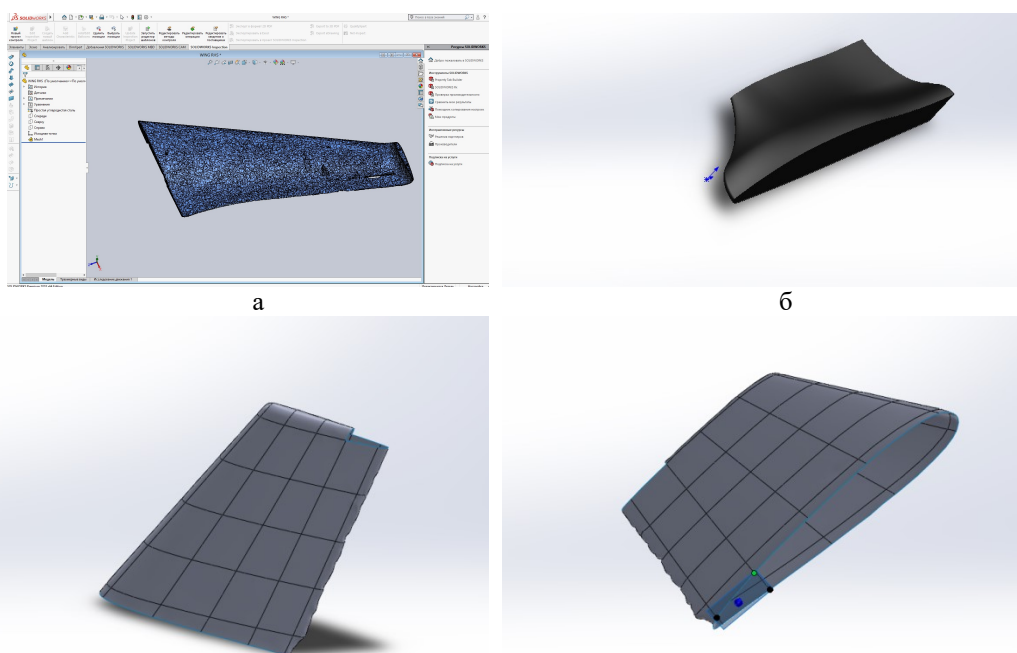
жая индуктивное сопротивление, создаваемое срывающимся с конца крыла вихрем и, как следствие, увеличивая подъёмную силу на конце крыла. Также позволяют увеличить удлинение крыла, почти не изменяя при этом его размах. Винглеты увеличивают топливную экономичность, либо дальность полёта.

### Моделирование

На рисунке 1 представлена модель беспилотного летательного аппарата, выполненная с помощью 3D-сканера. Получены отдельные элементы конструкции в формате IGS 3D-сканером (рисунок 2). Технические характеристики: размах крыла – 2122 мм; площадь крыла – 80 дм<sup>2</sup>; действительная полезная нагрузка – 700 г (сверх уже установленного оборудования); вес пустого аппарата – 1335 г; правое крыло – 373 г; левое крыло – 383 г; фюзеляж – 501 г.



Рисунок 1 – Сканированная модель беспилотника по типу «X8 Skywalker»



а

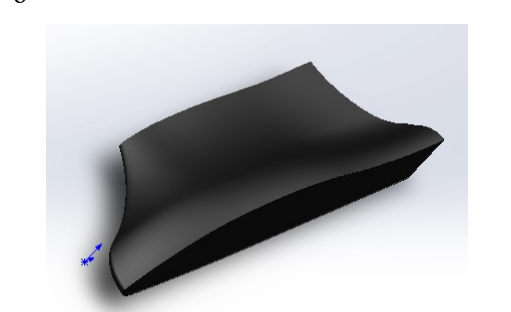
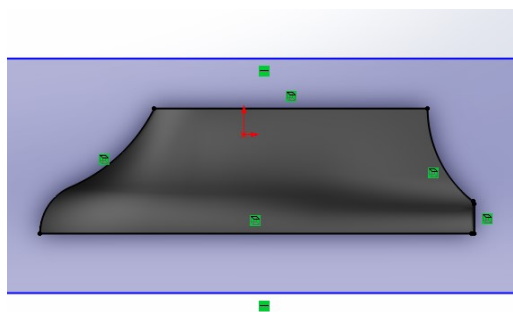
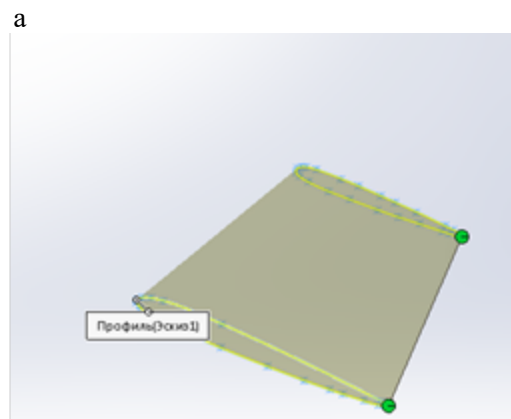
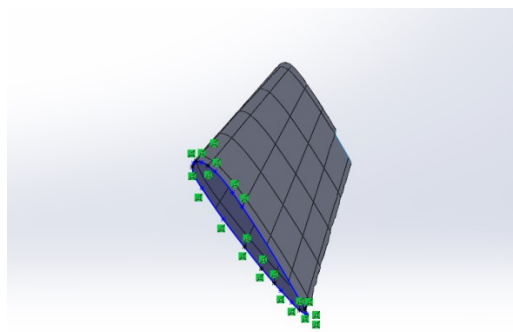
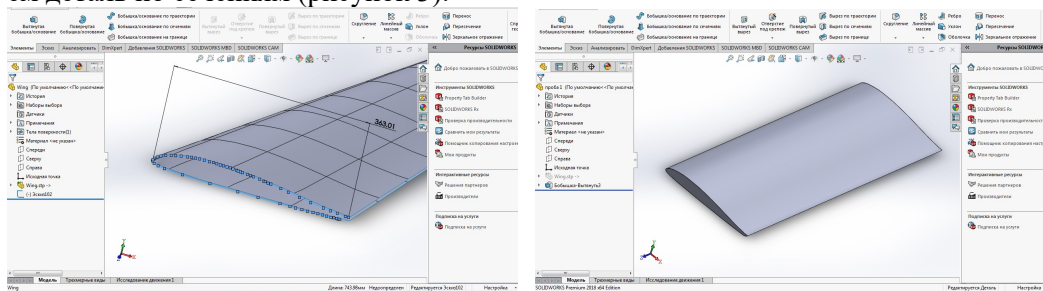
б

в

а – крыло; б – деталь фюзеляжа; в – винглет

Рисунок 2 – Элементы конструкции беспилотного летательного аппарата по типу «X8 Skywalker»

Программа SolidWorks предназначена для создания твердотельных моделей деталей и полуавтоматического выполнения их чертежей, которые содержат необходимые типы изображений. Она поддерживает проектирование деталей, изготовленных литьем или из листового материала, поверхностное моделирование [3-7]. Программный комплекс SolidWorks включает ряд приложений: CosmosWorks – прочностной расчет деталей методом конечных точек; CosmosMotion – расчет кинематики и динамики механизма. Моделируем элементы конструкции в программном комплексе SolidWorks: создаём вспомогательные плоскости, рисуем контур с помощью сплайнов на созданных плоскостях, создаём деталь по сечениям (рисунок 3).

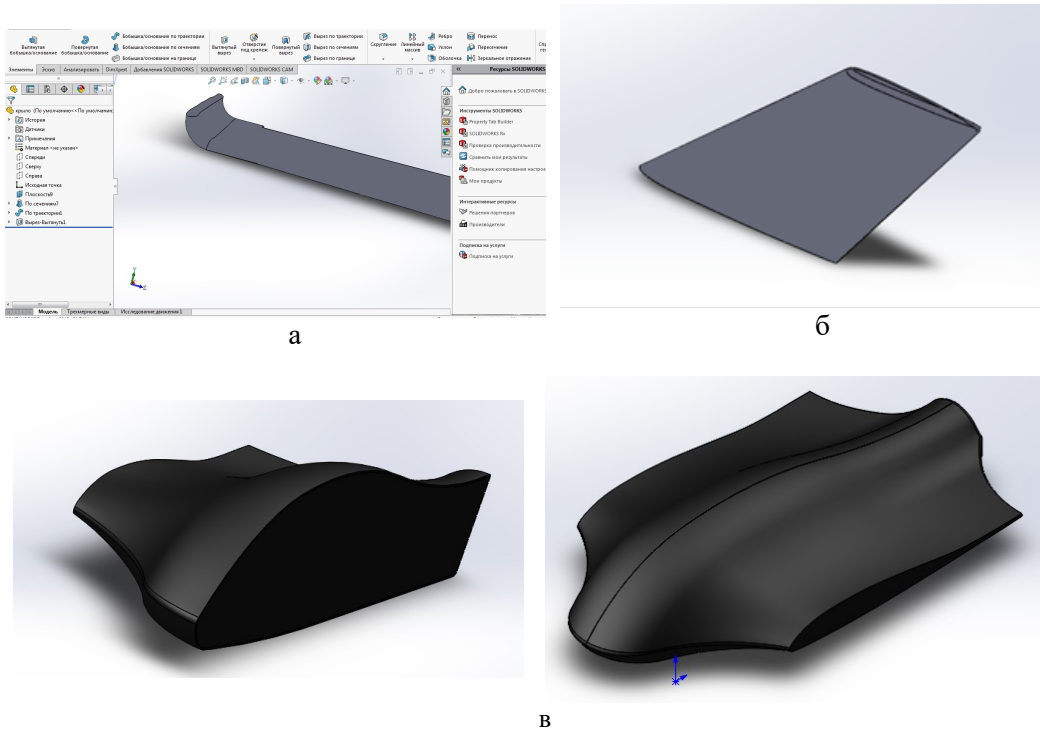


в

а – создание замкнутого контура крыла при помощи сплайн-функции; б – создание винглета по сечениям: бобышка/основание по сечениям – выбор эскиза; в – создание контура фюзеляжа на верхней плоскости: эскиз – плоскость «Сверху» – сплайн-функция – обвод по контуру; скругление передней и задней части фюзеляжа

Рисунок 3 – Моделирование элементов конструкции

На рисунке 4 представлены готовые модели элементов конструкции беспилотного летательного аппарата по типу «X8 Skywalker», выполненные в программном комплексе SolidWorks: фюзеляж, крыло, винглет.



а – модель крыла; б – модель винглета; в – модель фюзеляжа  
 Рисунок 4 – Модели элементов конструкции беспилотного летательного аппарата по типу «X8 Skywalker», выполненные в программном комплексе SolidWorks: крыло, винглет, фюзеляж

### Расчет

Сделан расчет аэродинамических характеристик, определяющих режимы полёта, конфигурацию летательного аппарата и его ориентировку относительно выбранной системы координат. В программном комплексе SolidWorks: выбираем «Параметры» – «Дополнения» – «Flow Simulation» – «Мастер проекта» [8]. Заданы параметры: скорость – 35 м/с, давление – 79501 Па, температура – 275,15 К (рисунок 5).

Параметр	Значение
<b>Задание параметров</b>	
Заданы пользователем	
<b>Термодинамические параметры</b>	
Параметры	Давление, температура
Давление	79501 Pa
Температура	275.15 K
<b>Параметры скорости</b>	
Параметр	Скорость
Определено через	3D вектор
Скорость в направлении X	35 m/s
Скорость в направлении Y	0 m/s
Скорость в направлении Z	0 m/s
<b>Параметры турбулентности</b>	

Рисунок 5 – Задание параметров

На рисунке 6 представлен аэродинамический расчет фюзеляжа при заданных параметрах.

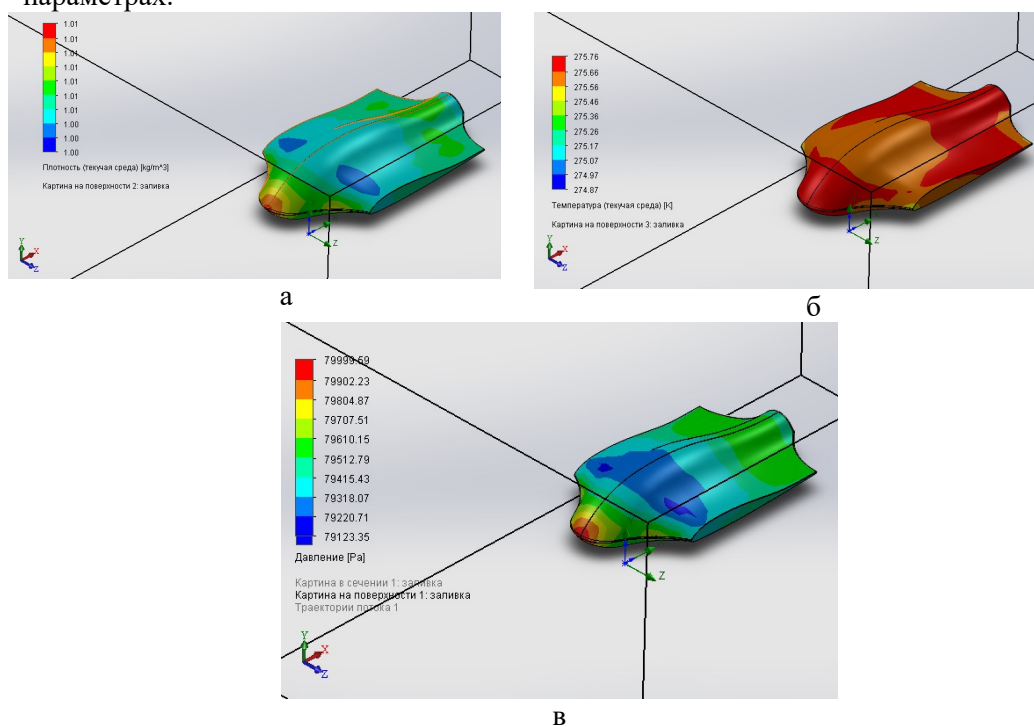


Рисунок 6 – Распределение плотности (а), температуры (б), давления встречного воздуха (в), действующих на фюзеляж БПЛА

На рисунке 7 представлен расчет скорости и траектории потока воздуха, обтекающего фюзеляж. На рисунке 8 представлен расчет давления встречного воздуха, действующего на крыло и винглет БПЛА. Расчет скорости и траектории потока воздуха, действующего на крыло и винглет БПЛА, представлен на рисунке 9.

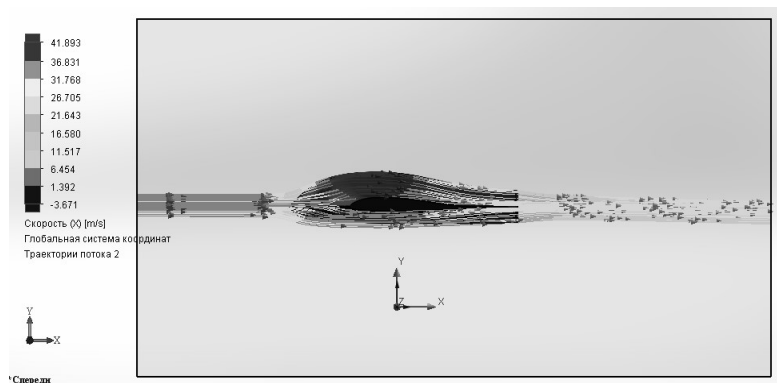


Рисунок 7 – Скорость и траектория потока воздуха, обтекающего фюзеляж

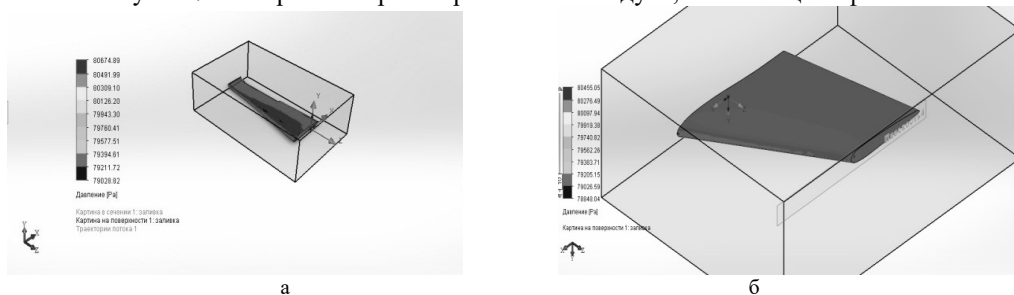


Рисунок 8 – Распределение давления встречного воздуха, действующего:  
а) на крыло БПЛА, б) на винглет БПЛА

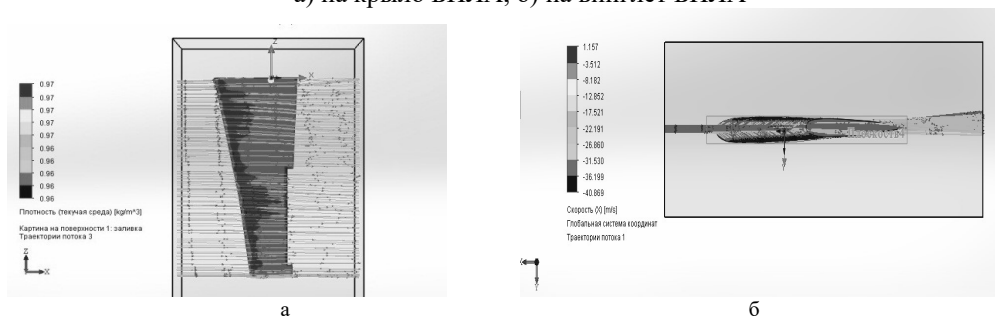


Рисунок 9 – Скорость и траектория потока воздуха, действующего:  
а) на крыло БПЛА, б) на винглет БПЛА

Результаты расчета: максимальное давление возникает в носовой части – 79999,59 Па; как следствие, повышается температура до 275,76 К. Максимальная скорость обтекания возникает в самой верхней части фюзеляжа и составляет 41,893 м/с.

**Выводы.** Представлена методика моделирования элементов конструкции беспилотного летательного аппарата по типу «X8 Skywalker»: фюзеляж, крыло, винглет. Сделан расчет аэродинамических характеристик. Модели являются практически точной копией без дефектов. Моделирование выполнено с помощью программного продукта Solidworks. При использовании данной программы можно сравнительно быстро и точно создавать модели и других малых летательных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект № 9.7667.2017/БЧ, проект № 9.11221.2018/11.12.



#### Литература

1. *Василин Н.Я.* Беспилотные летательные аппараты / Н.Я. Василин. – Москва: Попурри, 2012. – 272 с.
2. *Большаков В.П.* 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex / В.П. Большаков. – Санкт-Петербург: Питер, 2011. – С. 92-98.
3. *Бохоева Л.А.* Расчет и оценка прочности композиционного фланца / Л.А. Бохоева, С.А. Баиров, И.А. Арапова, А.Н. Кондратьева // Механики XXI века. – 2017. – № 16. – С. 208-211.
4. *Бохоева Л.А.* Моделирование и технология изготовления конструкций авиационной техники из композиционных материалов / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, А.С. Чермошнцева, А.В. Перевалов // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 2 (41). – С. 12-18.
5. *Бохоева Л.А.* Моделирование лопасти ветрогенератора из композиционных материалов / Л.А. Бохоева, А.Б. Балданов, В.А. Зайцев // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 2 (41). – С. 24-29.
6. *Бохоева Л.А.* Экспериментальное исследование, численное моделирование элементов каркаса остекления фонаря кабины вертолета из композиционного материала / Л.А. Бохоева, К.А. Филиппова, В.Е. Рогов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т. 9. – № 4-2. – С. 669-674.
7. *Алямовский А.А.* SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский. – Москва, Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. – 192 с.
8. *Шульце Х.* Аэродинамика и летающая модель / Х. Шульце. – Москва: Книга по требованию, 2012. – 510 с.

#### References

1. *Vasilin N. Ya.* *Bespilotnye letatelnye apparaty.* – Moscow: Popurri, 2012. – 272 p.
2. *Bolshakov V.P.* *3D-modelirovanie v AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex.* – Saint-Petersburg: Piter, 2011. – P. 92-98.
3. *Bokhoeva L.A., Bairov S.A., Arapova I.A., Kondratieva A.N.* // *Mechanical engineers to XXI century.* – 2017. – No. 16. – P. 208-211.
4. *Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Chermoshentseva A.S., Perevalov A.V.* // *ESSUTM Bulletin.* – 2013. – No. 2 (41). – P. 12-18.
5. *Bokhoeva L.A., Baldanov A.B., Zaitsev V.A.* // *ESSUTM Bulletin.* – 2013. – No. 2 (41). – P. 24-29.
6. *Bokhoeva L.A., Filippova K.A., Rogov V.E.* // *Basic Problems of Material Science.* – 2012. – V. 9. – No. 4-2. – P. 669-674.
7. *Alyamovskii A.A.* *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike.* – Moscow, Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2008. – 192 p.
8. *Shultze Kh.* *Aerodinamika i letayushchaya model.* – Moscow: Kniga po trebovaniyu, 2012. – 510 p.

УДК 539.421

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ОБРАЗЦАХ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ВИДЕОЗАПИСЕЙ

© Л. А. Бохоева<sup>1,а</sup>, профессор, В. Ю. Курохтин<sup>1,б</sup>, старший преподаватель,  
Т.-О. Эрдэнэбат<sup>2,с</sup>, преподаватель

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415

<sup>2</sup>Монгольский университет науки и технологии

14191, Монголия, Улан-Батор, Сухбаатарский район, 8-й округ, ул. Бага тойруу, 34  
E-mail: <sup>a</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>b</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>c</sup>jonon@must.edu.mn

*В данной статье приводится описание компьютерной программы, которая используется для обработки видеозаписей роста усталостных трещин в образцах лопастей несущего винта вертолета, образующихся в ходе их испытаний на стенде. Программа позволяет на основе видеозаписи определять геометрические параметры трещины (длина, ширина, крайние точки, центр тяжести) на каждом кадре записи. Полученные данные представляются в виде графика, отображающего зависимость скорости роста трещины от времени ее роста. График проходит трассировку в программе Mathcad, в итоге создаются два вектора данных – время и скорость роста трещины, которые проходят процедуру интерполяции с построением полинома третьей степени. По итогам интегрирования полинома определяется критическая длина трещины, по достижении которой начинается ее быстрый рост.*

**Ключевые слова:** усталостная трещина, лопасть винта вертолета, критическая длина трещины, обработка видеозаписи.

#### **DETERMINATION OF THE GROWTH PARAMETERS OF THE FATIGUE CRACK IN THE SAMPLES OF HELICOPTER ROTOR BLADES BASED ON VIDEOS PROCESSING**

**L.A. Bokhoeva<sup>1,a</sup>**, professor, **V.Yu. Kurokhtin<sup>1,b</sup>**, senior lecturer, **T.-O. Erdenebat<sup>2,c</sup>**, lecturer

<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, 40v, +7(3012)431415

<sup>2</sup>The Mongolian University of Science and Technology  
14191, Mongolia, Ulaanbaatar, Sukhbaatar district, 8th khoroo, Baga toiruu St., 34  
E-mail: <sup>a</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>b</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>c</sup>jonon@must.edu.mn

*The paper provides a description of a computer program that is used to process video recordings of fatigue crack growth in samples of helicopter rotor blades that are formed during their tests on a stand. The program allows, based on video recording, to determine the geometric parameters of a crack (length, width, extreme points, center of gravity) at each recording frame. The obtained data are presented in the form of a graph showing the dependence of the crack growth rate on the time of its growth. The graph is traced in the Mathcad program; as a result, two data vectors are created – crack growth time and speed that undergo an interpolation procedure with the construction of a third-degree polynomial. According to the results of the integration of the polynomial, the critical length of the crack is determined, after reaching which its rapid growth begins.*

**Keywords:** fatigue crack, helicopter rotor blade, critical crack length, video processing.

В ходе ресурсных испытаний лопастей несущего винта вертолета производится видеосъемка роста усталостных трещин, возникающих в этих лопастях [1]. Пример последовательности кадров из такой видеозаписи приведен на рисунке 1, где положение трещины показано стрелкой. Финальный кадр соответствует моменту разрушения образца – разделению его на две части.

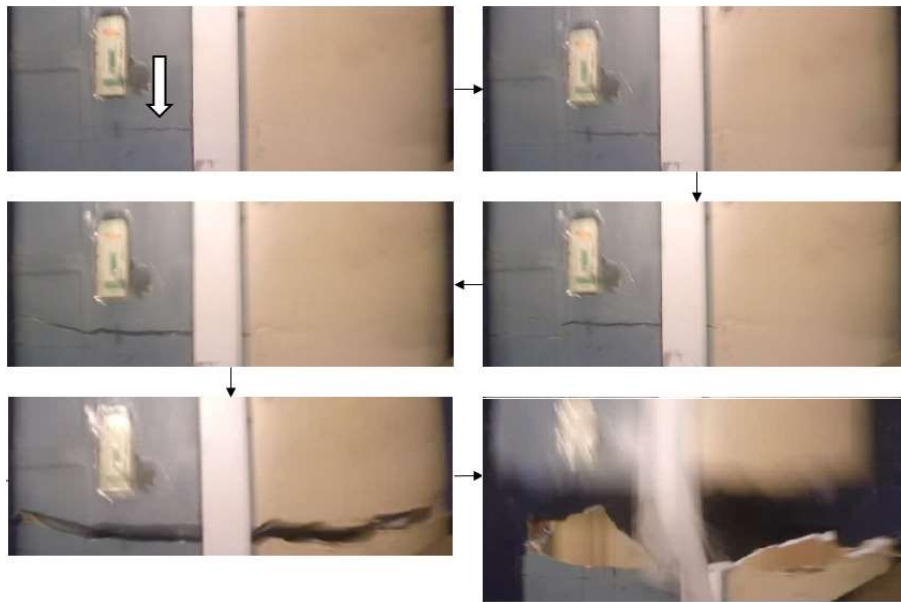


Рисунок 1 – Кадры из видеозаписи роста трещины

С целью определения скорости роста трещин была разработана компьютерная программа для обработки видеозаписи, в которой каждой найденной трещине соответствует отдельная запись во внутренней базе данных программы. После загрузки файла в программу запись была разделена на отдельные кадры. Каждый кадр был бинаризован (преобразован из цветного в черно-белый) [2]. Порог бинаризации выбран таким образом, чтобы область трещины на кадре осталась черной, а все прочие пиксели стали белыми. Пример полученного в результате бинаризации изображения приведен на рисунке 2.



$$F = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \overset{\text{left}}{\underset{\uparrow}{1}} & \overset{\text{top}}{\textcircled{1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2 – Бинаризованный кадр и пример матрицы, соответствующей такому кадру

Для каждого бинаризованного кадра создана матрица  $F$ , состоящая из нулей и единиц (рисунок 2), где нулям соответствуют белые пиксели фона, а единицам – черные пиксели трещины. Эта матрица была подвергнута поэлементной обработке.

Пусть  $f(n_1, n_2)$  – произвольный элемент матрицы, не относящийся к крайней левой строке и крайнему верхнему столбцу матрицы. Этот элемент может иметь значение либо 0, либо 1.

Если  $f(n_1, n_2) = 0$ , то данный элемент соответствует пикселю фона и не относится к какой-либо трещине. Он пропускается и рассматривается следующий элемент. Если  $f(n_1, n_2) = 1$ , то элемент соответствует пикселю трещины. Здесь возможны два случая: или это пиксель новой обнаруженной трещины, или он принадлежит к трещине, которая уже была найдена ранее в процессе обработки матрицы. Чтобы это понять, анализируются соседние элементы матрицы – элемент  $f(n_1, n_2 - 1)$  (строкой выше) и  $f(n_1, n_2 - 1)$  (столбцом левее) [3]. Обозначим элемент  $f(n_1, n_2 - 1)$  словом *top*, а элемент  $f(n_1, n_2 - 1)$  словом *left* (рисунок 2).

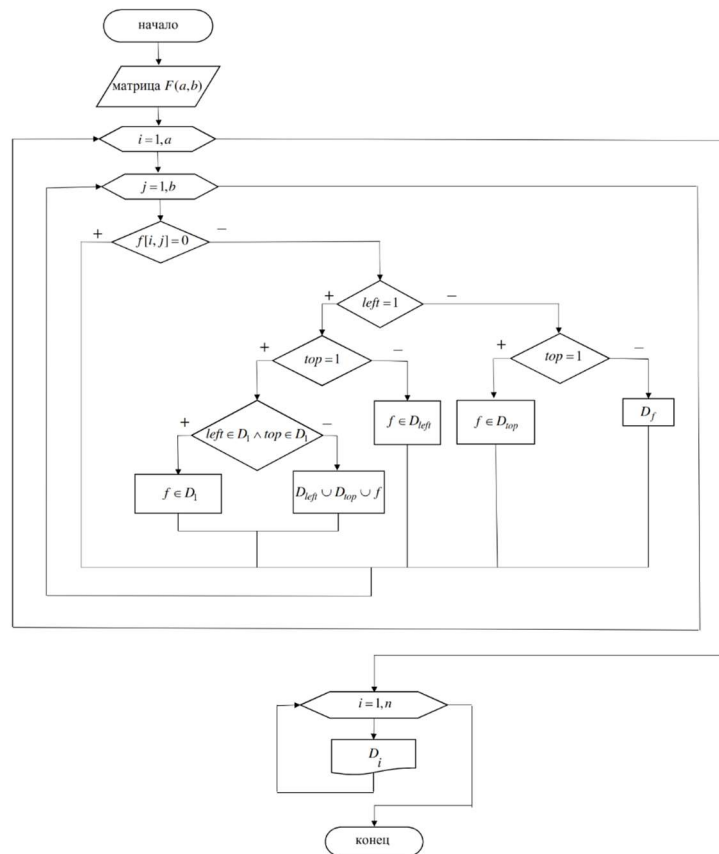


Рисунок 3 – Блок-схема методики обработки матрицы  $F$ , соответствующей бинарному изображению

Значения *left* и *top* могут быть следующими (рисунок 3):

- а)  $f(n_1, n_2) = 1$ . Найден первый пиксель новой трещины. Создается новая запись в базе данных для найденной трещины, ее начальная площадь на изображении приравнивается одному пикселю;

б)  $left = 1, top = 0$ . Текущий элемент соответствует пикселю, который принадлежит к ранее найденной трещине, к которой принадлежит и пиксель, соответствующий элементу  $left$ . Текущий элемент присоединяется к соответствующей записи в базе данных, площадь трещины возрастает на единицу;

в)  $left = 0, top = 1$ . Текущий элемент соответствует пикселю, который принадлежит к ранее найденной трещине, к которой принадлежит и пиксель, соответствующий элементу  $top$ . Текущий элемент присоединяется к соответствующей записи в базе данных, площадь трещины возрастает на единицу;

г)  $left = top = 1$ . В таком случае анализируются сами элементы  $left$  и  $top$ . Если они соответствуют пикселям одной и той же трещины, то текущий элемент присоединяется к той же записи. Если  $left$  и  $top$  соответствуют пикселям разных трещин, то соответствующие записи в базе данных объединяются в одну, и к ней присоединяется текущий элемент.

Для каждого элемента крайней верхней строки матрицы элемент  $top$  считается равным 0; для каждого элемента крайнего левого столбца матрицы элемент  $left$  считается равным 0. Для элемента  $f(1,1)$  из левого верхнего угла матрицы, с которого начинается обработка матрицы, и элемент  $left$ , и элемент  $top$  полагаются равными 0. Соответственно, если сам этот элемент равен 0, то его пропускают и переходят к рассмотрению следующего элемента; если  $f(1,1) = 1$ , то создается новая запись в базе данных, как для первого пикселя вновь обнаруженной трещины.

После обработки всей матрицы в базе данных содержатся сведения обо всех найденных на кадре трещинах [4]. Эти записи прошли обработку, по результатам которой были определены основные параметры трещин – длина, ширина, крайние точки, центр тяжести (рисунок 4).

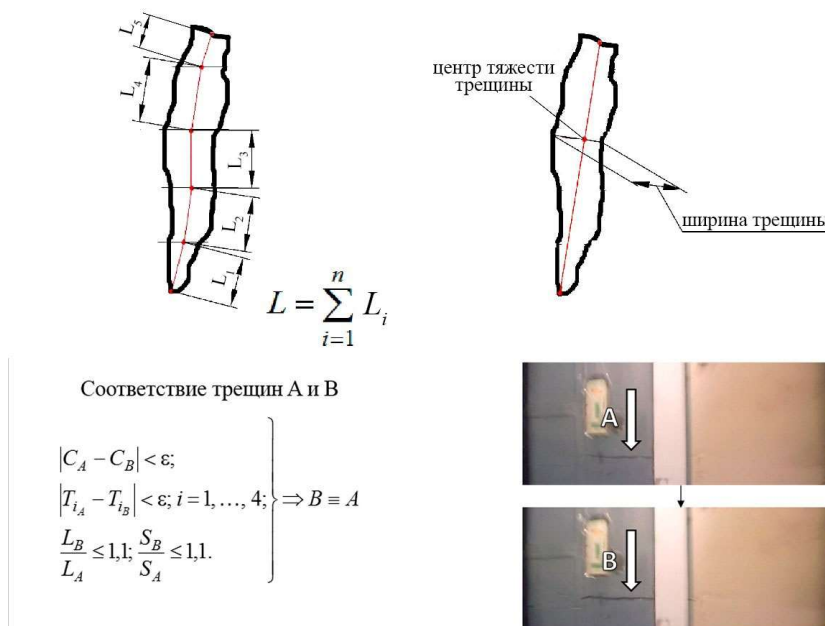


Рисунок 4 – Определение геометрических параметров трещин

Трещина разделена на отдельные фрагменты, у каждого из которых найден центр тяжести. Суммируя между собой длины отрезков, соединяющих центры тяжести, определена длина трещины – ломаная, делящая трещину вдоль напополам.

Ширина трещины определяется как длина (между краями трещины) отрезка, удовлетворяющего следующим условиям:

– данный отрезок должен быть нормален к отрезку, соединяющему две крайние удаленные точки трещины;

– данный отрезок должен проходить через центр тяжести трещины.

В процессе обработки видеозаписи возникает проблема определения соответствия трещин друг другу на разных кадрах. Иначе говоря, необходимо установить критерии, по которым программа может сделать вывод, что трещина  $B$  на  $n$ -м кадре видеозаписи и трещина  $A$  на  $n-1$ -м кадре – это одна и та же трещина. В качестве таких критериев приняты следующие условия:

а)  $|C_B - C_A| < \varepsilon$  – центры тяжести трещин  $A$  и  $B$  лежат в одной и той же малой окрестности;

б)  $|T_{i_B} - T_{i_A}| < \varepsilon, i = 1 \dots 4$  – крайние точки трещин  $A$  и  $B$  лежат в одних и тех же малых окрестностях;

в)  $\frac{L_B}{L_A} \leq 1,1; \frac{S_B}{S_A} \leq 1,1$  – длины и площади трещин  $A$  и  $B$  отличаются не более чем на 10%.

Таким образом, по итогам обработки всей видеозаписи получена информация о динамике роста трещины. Эти данные представлены в виде графика (рисунок 5), где по оси абсцисс отложено время роста трещины в часах, а по оси ординат – скорость ее роста в миллиметрах в час [5]. Видно, что в процессе испытаний скорость роста трещины постепенно увеличивается, пока не происходит резкий скачок, заканчивающийся разрушением образца.



Рисунок 5 – Кинетические графики развития трещины (горизонтальная ось – время роста трещины, ч; вертикальная ось – скорость роста трещины, мм/ч)

Небольшие скачки графиков вверх-вниз обусловлены тем, что кончик трещины плохо виден на некоторых кадрах, из-за чего скорость ее роста определяется с некоторой погрешностью – на одних кадрах трещина выглядит длиннее, на других – короче.

Полученные графики трассированы в пакете Mathcad (рисунок 6). По итогам этой операции созданы два вектора данных – время роста трещины в часах и скорость роста трещины в миллиметрах в час.



Рисунок 6 – Трассировка графика в пакете Mathcad

Полученные данные подвергнуты процедуре интерполяции с построением интерполяционного кубического полинома. Интерполяционный кубический полином, представляющий зависимость скорости роста трещины (мм/ч) от времени ее роста (ч), описывается уравнением (1).

$$v_{\text{длина}} = 8,386 \cdot 10^{-7} t^3 - 1,364 \cdot 10^{-4} t^2 + 5,722 \cdot 10^{-3} t + 0,255. \quad (1)$$

Подставляя в формулу (1) разные значения времени роста трещины, получаем значения скорости ее роста. Эти данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость скорости роста трещин от времени испытаний

t, ч	1	10	50	100	120	140	150	160	170	180	190	195	200
v, мм/ч	0,26	0,3	0,31	0,35	0,43	0,431	0,73	1,11	1,41	1,76	2,17	2,4	2,6

Данные таблицы 1 отображены в виде графика (рисунок 7). Как видно из графика, быстрый рост трещины начинается после 140 часов ее развития.

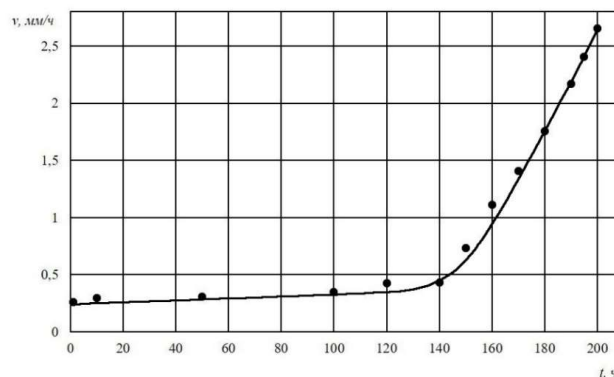


Рисунок 7 – График зависимости скорости роста трещины в образцах лопастей от времени ее роста

Чтобы определить величину критической длины трещины, проинтегрируем выражение (1) по времени с верхней границей 140 часов, соответствующей началу быстрого роста трещины:

$$\int_0^{140} 8,386 \cdot 10^{-7} t^3 - 1,364 \cdot 10^{-4} t^2 + 5,722 \cdot 10^{-3} t + 0,255 dt = 47,554 \text{ мм.}$$

Полученное значение согласуется с экспериментальными данными – в ходе испытаний было отмечено, что быстрый нестабильный рост трещины начинается, когда она достигает длины в 45-50 мм.

Таким образом, разработанная программа позволяет определять скорость и критическую длину трещины с достаточной степенью точности, что подтверждается хорошей сходимостью результатов работы программы с данными экспериментальных наблюдений. Разработанное программное обеспечение может применяться для оценки скорости и времени развития усталостных трещин в различных объектах машиностроения.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки России № 9.11221.2018/11.12.

#### *Литература*

1. *Рогов В.Е.* Оценка процесса роста усталостных трещин в лопастях винта вертолета [Электронный ресурс] / В.Е. Рогов, Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, А.Б. Балданов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 74. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/80TVN217.pdf> (дата обращения 31.07.2019).

2. *Бохоева Л.А.* Испытание изделий авиационной техники с применением нового программного обеспечения для сбора, обработки данных и построения текущего состояния деформированного изделия / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, К.А. Филиппова // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 4. – С. 20-25.

3. *Бохоева Л.А.* Исследование роста трещин в изделиях авиационной техники на основе натурных испытаний / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, Е.А. Жерлова // Механика конструкций и материалов: сборник научных трудов по материалам 55-й научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГУТУ (19-21 апреля 2016 г., г. Улан-Удэ). Выпуск 1. – Улан-Удэ: Издательство ВСГУТУ, 2016. – С. 57-69.

4. *Chermoshentseva A.S.* The behavior of delaminations in composite materials – experimental results / A.S. Chermoshentseva, A.M. Pokrovskiy, L.A. Bokhoeva // International Conference on Advanced Materials and New Technologies in Modern Materials Science 2015 (AMNT 2015). – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 012005.

5. *Потапов С.Д.* Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость ее роста при циклическом нагружении / С.Д. Потапов, Д.Д. Перепелица // Вестник Московского авиационного института. – 2014. – Т. 21. – № 1. – С. 104-110.

#### *References*

1. *Rogov V.E., Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Baldanov A.B.* [Electronic resource] // “Naukovedenie” Internet journal. – 2017. – V. 9. – No. 2. – P. 74. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/80TVN217.pdf> (date of the application 31.07.2019).

2. *Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Filippova K.A.* // ESSUTM Bulletin. – 2015. – No. 4. – P. 20-25.



3. Bokhоеva L.A., Kurokhtin V.Yu., Zherlova E.A. // Mekhanika konstruksii i materialov: proceedings of 55<sup>th</sup> scientific-practical conference of ESSUTM teachers, researchers and graduate students (April 19-21, 2016, Ulan-Ude). Issue 1. – Ulan-Ude: ESSUTM Press, 2016. – P. 57-69.

4. Chermoshentseva A.S., Pokrovskiy A.M., Bokhоеva L.A. // International Conference on Advanced Materials and New Technologies in Modern Materials Science 2015 (AMNT 2015). – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 012005.

5. Potapov S.D., Perepelitsa D.D. // Aerospace MAI Journal. – 2014. – V. 21. – No. 1. – P. 104-110.

УДК 539.3

### СОЗДАНИЕ ПЛАНА ЗДАНИЯ В AUTOCAD С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SCRIPT-ФАЙЛА

© Л. А. Бохоева<sup>1</sup>, А. О. Щербаков<sup>2</sup>, Д. Н. Ипатов<sup>3</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, стр. 1

E-mail: <sup>1</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>2</sup>slider.98@mail.ru, <sup>3</sup>ipatov.95@bk.ru

*В данной работе рассматривается способ автоматизации процессов создания чертежей в САПР AutoCAD. Разработан алгоритм для удобства и быстрого создания чертежей строительных зданий и сооружений в AutoCAD. Алгоритм основан на разработке специальных программ или программных файлов, которые автоматизируют процесс составления чертежей плана строительных объектов. Такие программные файлы называются скриптами. В настоящее время данные планы делают вручную, поэтому представленная работа полезна и актуальна.*

**Ключевые слова:** моделирование в AutoCAD, script-файлы, Excel, алгоритм.

### CREATING A BUILDING PLAN IN AUTOCAD USING SCRIPT FILE

L. A. Bokhоеva<sup>1</sup>, A. O. Shcherbakov<sup>2</sup>, D. N. Ipatov<sup>3</sup>

East Siberia State University of Technology and Management

670013, Russian Federation, Ulan-Ude, bldg. 1 40v Klyuchevskaya St.

E-mail: <sup>a</sup>bohoeva@yandex.ru, <sup>b</sup>slider.98@mail.ru, <sup>c</sup>ipatov.95@bk.ru

*This article is dedicated to the automation of the process of creating drawings in CAD AutoCAD. The algorithm is based on the creation of special programs or program files that automate the process for making plans of buildings and structures in AutoCAD. Such program files are called scripts. Nowadays these plans are handmade. So, the presented article is useful and relevant.*

**Keywords:** modeling in AutoCAD, script-files, excel, algorith.

#### Введение

Строительные чертежи отличаются большим разнообразием и выполняются по общим правилам прямоугольного проецирования их на основные плоскости проекций [1]. Сведения о расположении отдельных помещений здания, их размерах, о размещении сантехнического оборудования, об основных строительных конструкциях можно получить из планов и разрезов. Планом здания называется разрез горизонтальной плоскостью, проведенный через оконные и дверные проемы. При создании планов зданий необходимо

иметь знания САПР в AutoCAD, несмотря на это, разработка чертежей занимает достаточно много времени. Для экономии времени при составлении плана здания в виде чертежей возможно использовать специальные программные файлы (скрипты) в AutoCAD [2-5]. Скрипты можно применять для создания планов здания и сооружений, хотя они недостаточно полно нашли применение в создании чертежей и моделей.

Целью работы является разработка script-файлов, при помощи которых создаются чертежи и план на основе экспликации здания без знания программы AutoCAD.

### Алгоритм

Разработка script-файла в программе AutoCAD представлена на примере общежития № 3 Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ). Исходные данные были взяты из технического паспорта общежития № 3, которые заносятся в таблицу в табличном процессоре Excel (рисунок 1).

№	Дата записи	Этаж	№ комнаты по плану	Наименование помещения	Площадь помещения				высота	
					бл.поз.	поз.бл.	ж	к		
1	10.06.2009	А	5	6	7	8	9	10	11	15
2			26	спортзал	5,9		5,9			2,60
3			27	спортзал	75,6			75,6		
4			28	кабинет	9,2			9,2		
5			29	кабинет	9,2			9,2		
6			30	электрощитовая	13,0			13		
7			31	жопла	18,4	18,4				
8			32	жопла	18,9	18,9				
9			33	снхл	36,7			36,7		
10			34	снхл	14,4			14,4		
11			35	снхл	1,3			1,3		
12			36	табур	3,3		3,3			
13			37	табур	4,6		4,6			
14			38	всплбств	21,0		21,0			
15			39	ванна	1,8		1,8			
16			40	ванна	10,2		10,2			
17			41	кабинет	18,7			18,7		
18			42	кабинет	18,6			18,6		
19			43	жопла	18,5	18,5				
20			44	жопла	13,0	13,0				
21			45	жопла	19,3	19,3				
22			46	жопла	17,3	17,3				
23			47	жопла	18,8	18,8				
24			48	жопла	18,6	18,6				
25			49	жопла	16,2	16,2				

Рисунок 1 – Исходные данные в системе Excel

Ширина и площадь помещения представлена в таблице (рисунок 1) в масштабе 1:100, расчёт начинается с вычисления длины помещения. Для расчёта одной стороны этажа определяют координаты этажа по осям  $X$  и  $Y$ . Первой стартовой точкой была взята точка с координатами  $X=800$  и  $Y=450$ . Координаты конечных точек по оси  $X$  вычисляют по формуле: значение стартовой координаты  $X$  минус ширина помещения. Координаты конечных точек по оси  $Y$  вычисляют по формуле: значение стартовой координаты  $Y$  плюс длина помещения. Следующие координаты стартовых точек по оси  $X$  вычисляют по формуле: предыдущее значение конечной точки  $X$  минус толщина межкомнатных перегородок. Координата  $Y$  равна предыдущему значению стартовой точки  $Y$ . Формула для расчёта второй стороны этажа: стартовая точка  $X$  без изменения, точка  $Y$  вычисляется по формуле – стартовая точка  $Y$  плюс длина коридора, плюс длина первой комнаты. Остальные формулы подобны. Следующий шаг – компоновка значений для script-файла. Все координаты стартовых и конечных точек заносят в таблицу, которая представлена на рисунке 2.

O8														f.	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N		
1 этаж														3	5
№ комнаты по плану		длина	ширина	площ	дл(мм.)	шир(мм.)	ст.т х	ст.т у	к.т х	к.т у	толщина стен	толщ.нес.ст.			
23-26	санузел	1,91	3,1	5,9	59	31	800	450	769	509					
27	спортзал	5,9	12,8	75,6	59	128	766	450	638	509					
28-29	кабинет	5,9	3,1	18,4	59	31	635	450	604	509					
30	электрошитовая	5,9	2,2	13	59	22	601	450	579	509					
31	жилая	5,9	3,1	18,4	59	31	576	450	545	509					
32	жилая	5,9	3,2	18,9	59	32	542	450	510	509					
33	склад	5,9	6,2	36,7	59	62	507	450	444	509					
34-36	склад, тамбур	5,9	3,2	19	59	32	441	450	409	509					
37-40	тамбур, вестибюль, вахта	5,9	6,4	37,6	59	64	406	450	342	509					
41	кабинет	5,9	3,2	18,7	59	32	339	450	308	509					
42	кабинет	5,9	3,2	18,6	59	32	305	450	273	509					
43	жилая	5,9	3,1	18,5	59	31	270	450	239	509					
44	жилая	5,9	2,2	13	59	22	236	450	214	509					
45	жилая	5,9	3,3	19,3	59	33	211	450	178	509					
46	жилая	5,9	3,0	17,5	59	30	175	450	145	509					
47	жилая	5,9	3,2	18,8	59	32	142	450	111	509					
48	жилая	5,9	3,2	18,6	59	32	108	450	76	509					
49	жилая	5,9	2,7	16,2	59	27	73	450	46	509					
50	санузел	5,9	3,1	18,3	59	31	43	450	12	509					
	коридор	1,55	76,6	118,8	16	766									

Рисунок 2 – Координаты стартовых и конечных точек

На следующем шаге задают стандартные команды для AutoCAD: формат чертежа (команда «Limits»: 0, 841, 594); зуммирование (команда «Zoom A»); команда «Snap 10»; установка цвета (команда «Color 4»); команда «Добавление координат внешней стены». Затем для каждой координаты задается команда «Rectangle» (рисунок 3).

	A	B	C	D	E	F	G
1						limits 0,0 841,594	
2						zoom a	
3						snap 10	
4						color 4	
5	800	450	769	509		rectangle	800,450 769,509
6	766	450	638	509		rectangle	766,450 638,509
7	635	450	604	509		rectangle	635,450 604,509
8	601	450	579	509		rectangle	601,450 579,509
9	576	450	545	509		rectangle	576,450 545,509
10	542	450	510	509		rectangle	542,450 510,509
11	507	450	444	509		rectangle	507,450 444,509
12	441	450	409	509		rectangle	441,450 409,509
13	406	450	342	509		rectangle	406,450 342,509
14	339	450	308	509		rectangle	339,450 308,509
15	305	450	273	509		rectangle	305,450 273,509
16	270	450	239	509		rectangle	270,450 239,509
17	236	450	214	509		rectangle	236,450 214,509
18	211	450	178	509		rectangle	211,450 178,509
19	175	450	145	509		rectangle	175,450 145,509
20	142	450	111	509		rectangle	142,450 111,509
21	108	450	76	509		rectangle	108,450 76,509
22	73	450	46	509		rectangle	73,450 46,509
23	43	450	12	509		rectangle	43,450 12,509
24							

Рисунок 3 – Вывод координат стартовых и конечных точек

Полученные данные копируются в программу «Блокнот» и сохраняются с расширением scr. Script-файл готов. При запуске программы AutoCAD в командной строке записываем или находим созданный script-файл. После запуска этого файла строится чертёж или план этажа (рисунок 4).

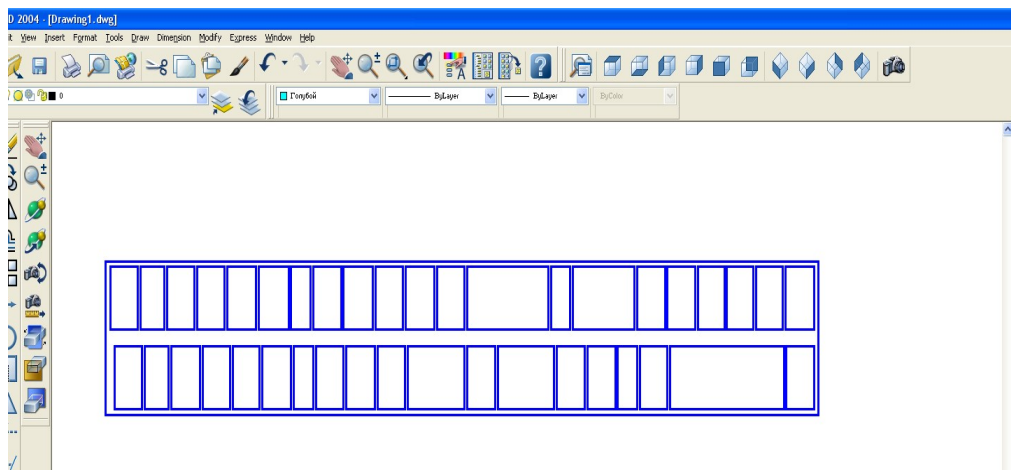


Рисунок 4 – План первого этажа

Для построения этажей здания на необходимую высоту необходимо прописать в script-файле команду для каждого этажа по высоте стен. Результат созда-

ния 3D-модели пятиэтажного здания с цокольным этажом с помощью script-файлов в программе AutoCAD представлен на рисунке 5.

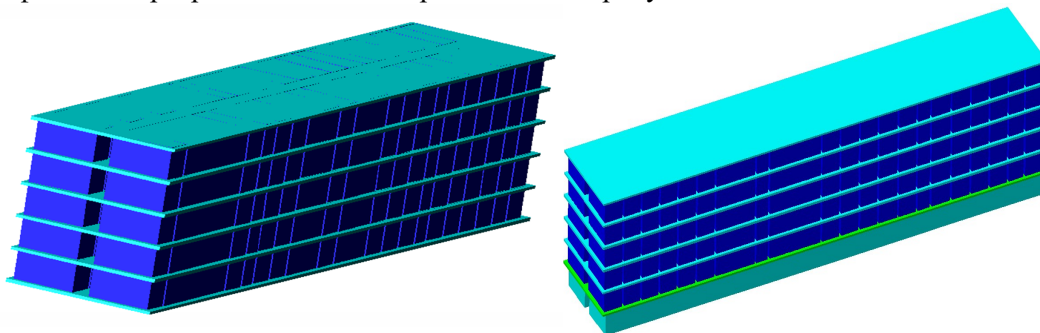


Рисунок 5 – 3D модель пятиэтажного здания с цокольным этажом

### **Выводы**

Разработан алгоритм, основанный на специальных программах или программных файлах, которые автоматизируют процесс составления чертежей плана строительных объектов. Данный способ позволяет ускорить процесс создания чертежей строительных зданий и сооружений в AutoCAD.

### *Литература*

1. *Ергонов В.П.* Информационные технологии как фактор поведения эффективности изучения общетехнических дисциплин / В.П. Ергонов, Л.А. Бохоева, В.Е. Рогов // Сборник статей международной научно-методической конференции ВСГУТУ. – Улан-Удэ: Издательство ВСГУТУ, 2016. – С. 137-141.
2. AutoCAD 2007. Справочник команд. – Autodesk, Inc. – 2006. – 302 с.
3. *Соколова Т.Ю.* AutoCAD 2009 для студентов / Т. Ю. Соколова. – Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 384 с.
4. *Хрящев В.Г.* Моделирование и создание чертежей в системе AutoCAD: учебное пособие для студентов вузов / В. Г. Хрящев, Г. М. Шипова. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2003. – 210 с.
5. *Бохоева Л.А.* Расчет и оценка прочности композиционного фланца / Л.А. Бохоева, С.А. Байров, И.А. Арапова, А.Н. Кондратьева // Механики XXI века. – 2017. № 16. – С. 208-211.

### *References*

1. *Ergonov V.P., Bokhоеva L.A., Rogov V.E.* // Proceedings of ESSUTM international scientific and methodological conference. – Ulan-Ude: ESSUTM Press, 2016. – P. 137-141.
2. AutoCAD 2007. Spravochnik komand. – Autodesk, Inc. – 2006. – 302 p.
3. *Sokolova T.Yu.* AutoCAD 2009 dlya studentov. – Saint-Petersburg: Piter, 2008. – 384 p.
4. *Khryashchev V.G., Shipova G.M.* Modelirovanie i sozдание chertezhei v sisteme AutoCAD. – Saint-Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003. – 210 p.
5. *Bokhоеva L.A., Bairov S.A., Arapova I.A., Kondratieva A.N.* // Mechanical engineers to XXI century. – 2017. – No. 16. – P. 208-211.

УДК 691.335

## РАСЧЕТ В ANSYS ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ И ПЕНОБЕТОНА

© **В. К. Виноградова**, студент, **Ж. Б. Дашиев**, студент  
Научный руководитель: профессор, д-р техн. наук **Л. А. Бокоева**  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415  
E-mail: Valentina\_Vinogradova\_39@mail.ru

*Актуальным на сегодняшний день остается вопрос по увеличению комфорта в жилых помещениях в районах с суровыми климатическими условиями. Одним из важных элементов строительства является теплоизоляционный слой. Для разных видов (каркасов) возведения домов, подходят разные теплоизоляционные материалы, нужно учитывать совокупные свойства и характеристики несущих стен и теплоизоляционного слоя. Немаловажным помощником при изучении свойств материалов, взаимодействия материалов друг с другом, повышения качества возведенных объектов являются программные комплексы.*

**Ключевые слова:** пеностеклокерамика, пенобетон, теплопередача, ANSYS, моделирование, коэффициент теплопроводности.

## CALCULATION OF HEAT TRANSMISSION OF FOAM GLASS CERAMICS AND ALC IN ANSYS

**V. K. Vinogradova**, student, **J. B. Dashiev**, student  
Scientific adviser: professor, Dr. tech. Sciences **L.A. Bokhoeva**  
East Siberian State University of Technology and Management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, 40c, +7 (3012) 431415  
E-mail: Valentina\_Vinogradova\_39@mail.ru

The issue of increasing comfort in residential premises in areas with severe climatic conditions remains relevant today. Thermal insulation layer is one of the important elements of housing construction. For different types (frames) of housing construction, different heat insulation materials are suitable. It is necessary to take into account the combined properties and characteristics of main walls and the heat insulation layer. Software systems are an important assistance in studying the properties of materials, their interaction with each other, as well as in improving the quality of the constructed objects.

**Keywords:** foam glass ceramics; autoclaved lightweight concrete (ALC); heat transmission; ANSYS; modeling; U-value.

**Введение.** Компания Ansys Inc. занимает особое место среди программ занимающихся разработкой программ по изучению теплопроводных характеристик в материалах и одной из таких программ является ANSYS. Расчетная база у данного программного продукта развита во всех направлениях, совмещает решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций, задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания» [1].

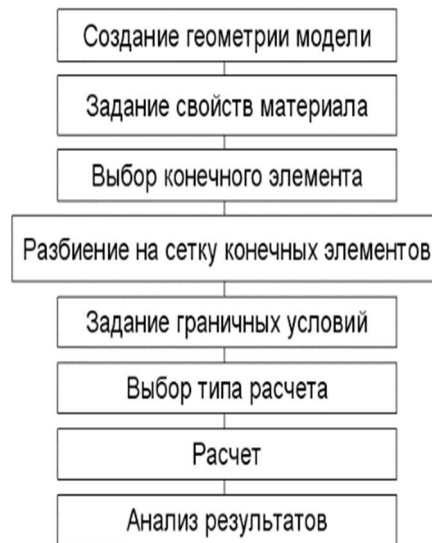


Рисунок 1 – Основные этапы расчета в ANSYS

**Задача.** Изучить теплопередачу пеностеклокерамики и пенобетона в районах с высокой амплитудой колебания летних и зимних температур, а также в районах с продолжительными и холодными периодами.

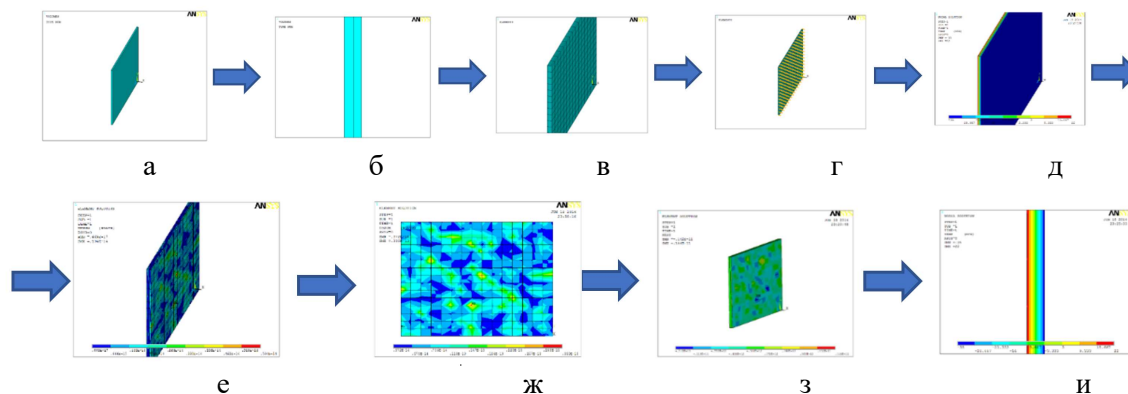
Для решения задачи будет смоделировано 6 объектов. К ним относится различие в материалах для несущих стен (железобетонный блок, брус и кирпич) и сравнение двух теплоизоляционных слоев (пеностеклокерамики и пенобетона). Блоки из пенобетона и пеностеклокерамики берутся как цельный блок по размерам исследуемой части стены, сами стены будут постоянной длиной в 10 метров и высотой в 8 метров. Толщина стен: из дерева – 0,2 м, из железобетона – 0,8 м, из кирпича – 0,72 м.

Характеристики материалов: *коэффициент теплоотдачи конвекцией будет равным для всех моделей и материалов и будет равен 3,91 из учета разности температур.*

Таблица 1 – Характеристики материалов

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности при нормальной влажности $\lambda$ , Вт/(м·°С)
Дерево (брус: сосна поперек волокон)	690	0,18
Железобетон	1800	0,70
Кирпичная кладка (кирпич глиняный обыкновенный)	350	0,09
Пеностеклокерамика	350	0,09
Пенобетон	500	0,14

**Экспериментальная часть.** Создание объекта:

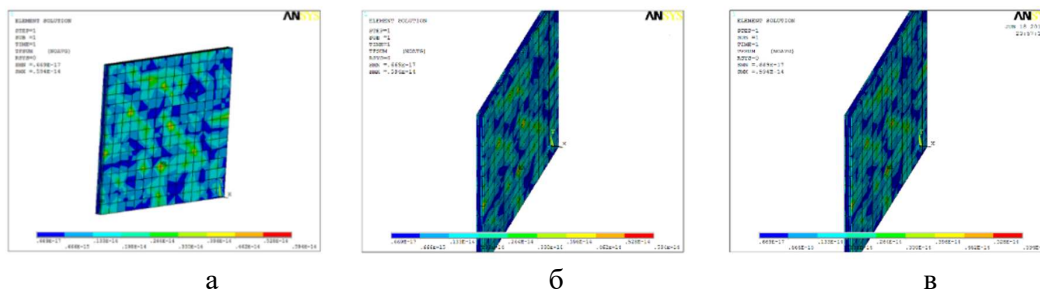


а – модель, созданная по заданным координатам; б – стена с теплоизоляционным слоем; в – разбиение полученной модели на элементы; г – приложение к стенам температуры; д – прохождение температурных масс через утеплитель; е – прохождение температурных масс в стене «брус и пенобетон» по значениям теплового обмена по оси  $X$ ; ж – теплообмен в железобетонной стене; з – теплообмен при помощи конвекции (дерево и пеностеклокерамика); и – теплообмен без конвекции (дерево и пеностеклокерамика)

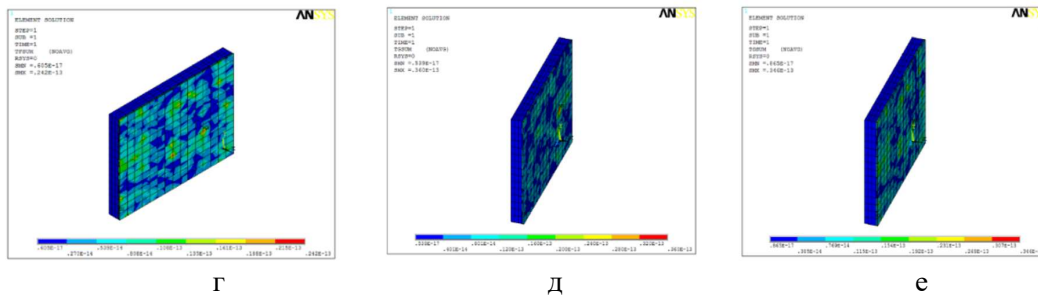
Рисунок 2 – Поэтапное создание объекта

На рисунке 2д рассмотрено воздействие температур на несущую конструкцию из бруса с теплоизоляционным слоем пенобетоном [2]. По цветовой схеме заметно влияние пористой структуры материала на проводимость тепла; как видно из полученных данных, деревянные конструкции пропускают холодные потоки, проходящие через теплоизоляцию, сам пенобетон максимально препятствует прохождению холодных масс (рисунок 2е); на рисунке 2ж представлен теплообменный процесс стены из железобетона без теплоизоляционного слоя, для наглядного представления стены, с отсутствием утеплителя [3]. Температурный процесс представляет собой плавный градиентный переход; теплопроводность – это теплообмен между частицами или элементами структурной материальной среды, находящимися в непосредственном соприкосновении друг с другом (рисунок 2з). При изучении теплопроводности вещество рассматривается как сплошная масса, его молекулярное строение игнорируется.

### Результаты:







Г

Д

е

а – теплопередача в стене: брус и пенобетон; б – теплопередача в стене: брус и пено-стеклокерамика; в – теплопередача в стене: железобетон и пеностеклокерамика; г – теплопередача в стене: железобетон и пенобетон; д – теплопередача в стене: кирпич и пенобетон; е – теплопередача в стене: кирпич и пеностеклокерамика

Рисунок 3 – Результаты расчетов

По получившимся данным можно сказать, что в данном примере решение задачи на теплопередачу без коэффициента конвекции и с его значением сильно различаются. Программа, ввиду присутствия коэффициента, показывает, что холодные температурные массы остаются в теплоизоляционном слое; объяснить это можно тем, что коэффициент конвекции уменьшает теплопроводность тела.

**Вывод.** После изучения теплопередачи во всех моделях можно сделать вывод, что оба утеплителя справляются с поставленными задачами, а именно – не пропускать воздушные массы через себя. Как пенобетон, так и пеностеклокерамика одинаково хорошо способствуют сохранению внутренней температуры на уровне, указанной в СНИП 2-3-79\*, а именно 20 градусов Цельсия. Также, судя по произведенным решениям, строения из дерева хуже справляются с сохранением тепла, чем кирпичная кладка и железобетонные блоки.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект № 9.7667.2017/БЧ.

#### Литература

1. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя / К.А. Басов. – Москва: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
2. Сапожников С.З. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник для вузов / С.З. Сапожников, Э.Л. Китанин. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГТУ, 1999. – 319 с.
3. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – Москва: Libroком, 2015. – 272 с.

#### References

1. Basov K. A. ANSYS. User reference. – Moscow: DMK Press, 2005. – 640 p.
2. Sapozhnikov S. Z., Kitanin E. L. Technical thermodynamics and heat transfer. – Saint-Petersburg: SPbSTU Press, 1999. – 319 p.
3. Kaplun A. B., Morozov E.M., Olfierieva M.A. ANSYS in the hands of the engineer. A practical guide. – Moscow: Librokom, 2015. – 272 p.

УДК 004.94

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ СТАНЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© **А. Б. Гончикжапов**, студент, **В. Ю. Курохтин**, старший преподаватель  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*В данной работе рассмотрены основные конструктивные элементы здания, системы автоматизированного проектирования. Рассмотрена методика расчета при конечно-элементном проектировании. Выполнены расчеты конструктивных элементов в различных вычислительных комплексах на основе метода конечных элементов, произведен сравнительный анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** станция технического обслуживания, компьютерное моделирование, прочностной расчет, Autodesk Robot, ANSYS.

## MODELING OF ELEMENTS OF CONSTRUCTION STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF A SERVICE STATION USING INFORMATION TECHNOLOGIES

**A. B. Gonchikzhapov**, student, **V. Yu. Kurokhtin**, senior lecturer  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*In this paper, the basic structural elements of the building and the computer-aided design systems are considered. The calculation technique for finite element design is considered. The calculations of structural elements in various computing complexes based on the finite element method are performed, a comparative analysis of the results is made.*

**Keywords:** service station, computer simulation, strength analysis, Autodesk Robot, ANSYS.

Главными требованиями, предъявляемыми в сегодняшнее время к проектированию станций, являются: а) максимальное удовлетворение потребностей в производстве дел по техобслуживанию и ремонту автомашин; б) максимальное приближение СТОА (станции технического обслуживания автомобилей) к клиентам их услуг; в) обеспечение мобильности планировочных решений СТОА, которая позволяет производить переход от одной организационной формы СТОА к иной с небольшими затратами.

Станция технического обслуживания имеет габаритные размеры в плане: длина- 24,3 м, ширина- 18,3 м. Здание является одноэтажным. Наружные стены выполнены из стеновой сэндвич-панели толщиной 200 мм. Перегородки также выполнены из сэндвич-панелей, их толщина 80 мм. Железобетонные колонны размером 300×300 мм. Фундамент железобетонный, стаканного типа. Фундаментные стаканы изготавливаются из бетона из класса В12,5-В15 и являются ступенчатой конструкцией с местом для установки колонны. Подошва фундаментного стакана имеет толщину не менее 200-250 мм и проверяется на продавливание. Когда колонна установлена в фундаментный стакан, она замоноличивается. На фундаменты опирают также и фундаментные балки, установленные на

уступы фундамента. План первого этажа станции технического обслуживания представлен на рисунке 1, разработанная 3D-модель – на рисунке 2.



Рисунок 1



Рисунок 2

Степень долговечности здания — II. Расчетная температура наружного воздуха: наиболее холодных суток  $t_x = -46$  °С, наиболее холодной пятидневки  $t_{x5} = -37$  °С. Расчетная температура внутреннего воздуха  $t_b = 18$  °С. Глубина промерзания грунтов на территории Республики Бурятия равна 3,2 м. Расчетное значение веса снегового покрова  $S_0 = 0,8$  кПа для I снегового района. В качестве ограждающих конструкций выбраны сэндвич-панели. В каркас здания входят железобетонные колонны, ригели и конструкция покрытия – ферма. Установленные по периметру здания железобетонные колонны несут нагрузку от веса покрытия, перекрытия и от временных нагрузок. Пространственная жесткость обеспечивается совместной работой колонн, ригелей и вертикальных связей.

Необходимо сконструировать и рассчитать ферму здания пролётом  $l = 18,3$  м (рисунок 3).

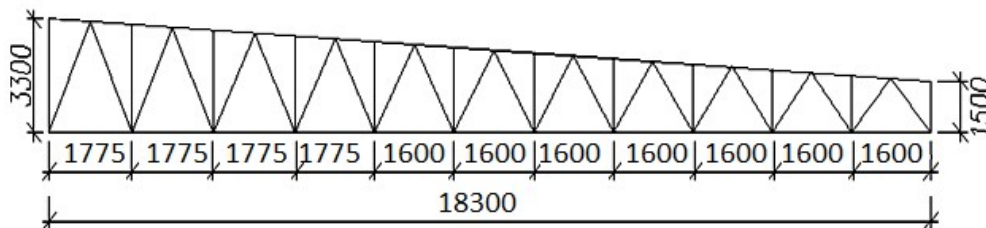


Рисунок 3

Элементы обрешетки фермы выполнены из парных уголков в соответствии с сортаментом ГОСТ 8509-93 «Уголки стальные горячекатаные равнополочные» [1]. Климатический район по снеговому покрову – I. Материал фермы – сталь марки С245 (ГОСТ 27772-88), соединения стержней в узлах фермы сварные, коэффициент надёжности по назначению зданий  $\gamma_n = 0,95$ . Высота фермы по наружным граням поясов 3300 мм и 1500 мм соответственно. Фермы опираются на внешний ряд колонн. По фермам уложены стальные прогоны, состоящие из спаренного швеллера с уклоном внутренних граней полок по ГОСТ 8240-89, профилированный настил Н57-750-0,8.

В программном комплексе Autodesk Robot Structural Analysis Professional была смоделирована конструкция фермы и выполнен расчет [2]. Исходное и деформированное состояния фермы представлены на рисунке 4.

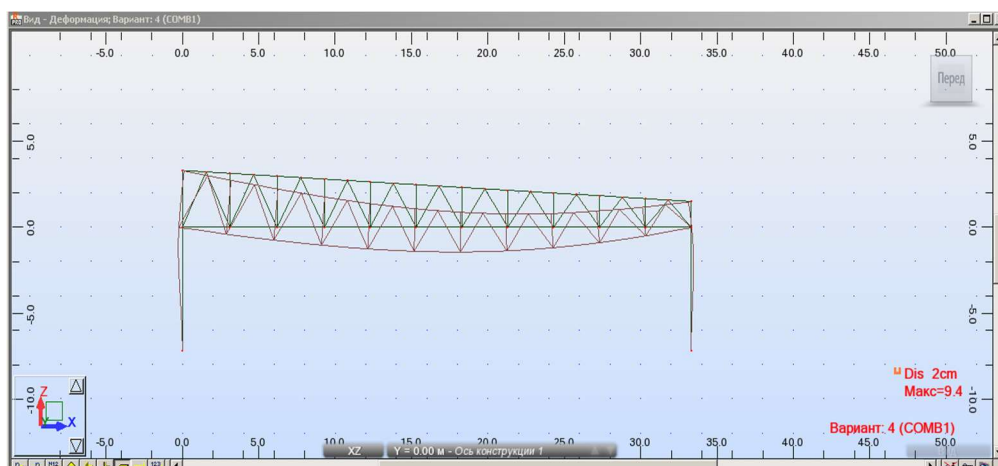


Рисунок 4

В результате расчета были подобраны поперечные сечения элементов фермы. Исходные и подобранные сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Подбранное сечение

Группа унификации	Исходное сечение	Результат подбора
Верхний пояс	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L125x14	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L120x8
Нижний пояс	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L120x15	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L80x8
Раскосы	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L100x10	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L50x5
Стойки	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L70x4	Уголок равнополочный по ГОСТ 8509-86 L35x4
Колонны	Двутавр по ГОСТ 26020 – 83 20К1	Двутавр по ГОСТ 26020 – 83 26К1

Расчет в программном комплексе ANSYS выполнен при помощи макроса. На построение конечно-элементной модели (рисунок 5) уходит больше времени, чем на выполнение любой другой части анализа [3, 4].

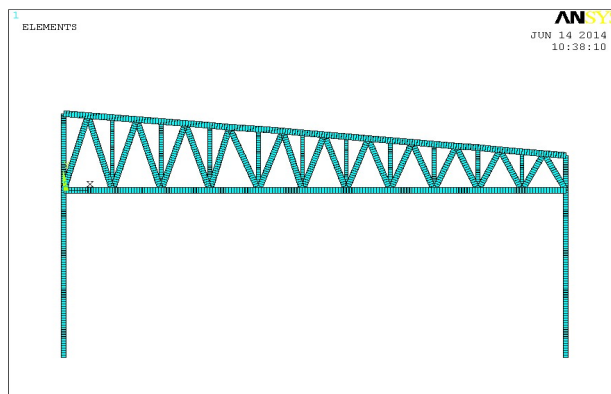


Рисунок 5

В результате расчета получен анализ деформированного состояния фермы (рисунок 6).

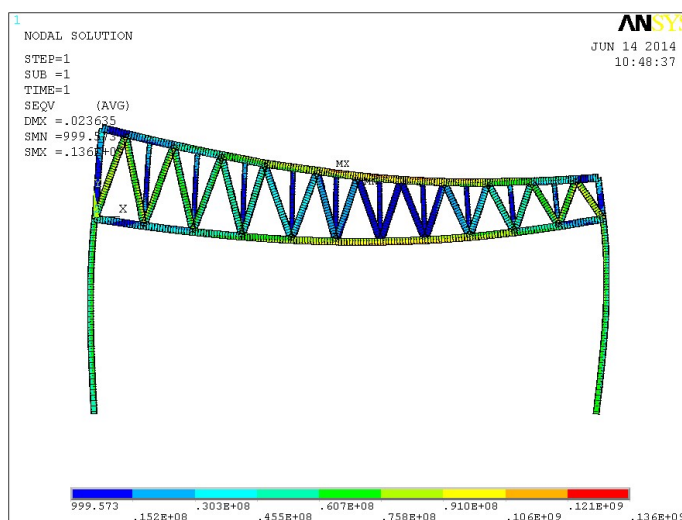


Рисунок 6

В результате проведения расчета конструкций был выбраны программные продукты Ansys и Autodesk Robot Structural Analysis Professional. В ходе исследований результатов расчета была выявлена их более высокая эффективность по сравнению с аналогичными программными комплексами. Преимущества: высокая скорость расчета, возможность применения специальных исходных данных (вид нагрузки с коэффициентами, сеймика, комбинации загрузений); возможность проверки сечений для подбора.

#### *Литература*

1. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. – Москва: Стандартинформ, 2005. – 12 с. – Введен 01.01.1997.
2. Сухоруков В.В. Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Проектно-вычислительный комплекс / В.В. Сухоруков. – Москва: АСВ, 2009. – 128 с.

3. *Жидков А.В.* Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А.В. Жидков. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 115 с.

4. *Рогов В. Е.* Компьютерное моделирование несущих стержневых элементов мобильных зданий из полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс] / В. Е. Рогов, А.Б. Балданов, В.Ю. Курохтин // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9. – № 2. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN217.pdf> (дата обращения: 11.08.2019).

#### References

1. GOST 8509-93. Hot-rolled steel equal-leg angles. Dimensions. – Moscow: Standartinform, 2005. – 12 p. – Introduced 01.01.1997.

2. *Sukhorukov V.V.* Autodesk Robot Structural Analysis Professional. Proektno-vychislitelnyy kompleks. – Moscow: ASV, 2009. – 128 p.

3. *Zhidkov A.V.* Primemenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya. – Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Press, 2006. – 115 p.

4. *Rogov V.E., Baldanov A.B., Kurokhtin V.Yu.* [Electronic resource] // Internet-journal «Naukovedenie». – 2017. – V. 9. – No. 2. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/81TVN217.pdf> (date of the application: 11.08.2019).

УДК 620.91

### АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

© **В. В. Данеев, А. И. Баташов, Д. Е. Дашеев, Э. Н. Чередов, Б. Д. Лыгденов**  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В  
E-mail: [dvv\\_espp@mail.ru](mailto:dvv_espp@mail.ru)

*В данной статье исследуется работа автономной системы наружного освещения автобусных остановок и площадок отдыха на основе солнечных и ветряных источников электроэнергии. Автономная система наружного освещения расположена в Петровск-Забайкальском районе Забайкальского края. Произведен анализ работы солнечных батарей ZF200-72М-А и ветрогенератора «Маглев» CXF-300 с учетом их географического местоположения и климатических условий региона. Рассчитана мощность ветрогенератора «Маглев» CXF-300 в зависимости от скорости ветра. Представлены расчеты вырабатываемой энергии солнечными батареями и ветрогенератором по месяцам в рассматриваемом районе. Проведены расчеты по оценке эффективности использования автономных систем наружного освещения автобусных остановок и площадок отдыха, работающих за счет возобновляемых источников энергии, с учетом климатических особенностей местности их установки.*

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная батарея, ветрогенератор, автономная система наружного освещения.

### ANALYSIS OF WORK OF EXTERNAL LIGHTING SYSTEM BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

**V. V. Daneev, A. I. Batashov, D. E. Dasheev, E. N. Cheredov, B. D. Lygdenov**  
East Siberia State University of Technology and Management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskay St., 40V  
E-mail: [dvv\\_espp@mail.ru](mailto:dvv_espp@mail.ru)

*This article explores the work of the autonomous system of outdoor lighting of bus stops and recreation areas based on solar and wind energy sources. The autonomous outdoor lighting system is located in the Petrovsk-Zabaykalsky district of the Trans-Baikal Territory. An analysis of the operation of the ZF200-72M-A solar cells and the Maglev CXF-300 wind generator, taking into account their geographical location and the climatic conditions of the region, has been carried out. Calculated power of the wind generator "Maglev" CXF-300, depending on wind speed. The calculations of the energy produced by solar panels and wind generator by months in the area under consideration are presented. Calculations were carried out to assess the effectiveness of the use of autonomous outdoor lighting systems for bus stops and rest areas operating at the expense of renewable energy sources, taking into account the climatic features of their installation site.*

**Keywords:** renewable energy sources, solar battery, wind generator, autonomous system of outdoor lighting.

Цель исследования – анализ работы автономных систем наружного освещения, работающих за счет возобновляемых источников энергии (солнечных батарей и ветрогенераторов). Автономная система наружного освещения расположена в Петровск-Забайкальском районе Забайкальского края на трассе М-55 и обеспечивает освещение на автобусных остановках и площадках отдыха.

В состав одной автономной системы наружного освещения входит один вертикальный ветрогенератор Маглев CXF-300, две солнечные панели ZF200-72M-A, гибридный контроллер, две аккумуляторные батареи LEOCH DJM12200, один светильник ПСКУ-СЭП-120. Автономная система наружного освещения работает на напряжении 24 В. Электроэнергию для работы светильника генерируют солнечная батарея и ветрогенератор, установленные на опорах освещения высотой 9 метров. Аккумуляторные батареи расположены под землей в металлическом ящике на глубине двух метров.

Для оценки эффективности применения солнечных и ветряных источников электроэнергии в составе гибридной системы освещения в данном регионе необходимо определить климатические условия региона. Климатическая характеристика рассматриваемого района основана на данных метеостанций: Петровский завод, Чита. На рисунке 1 представлена средняя месячная скорость ветра (м/с) из справочника [1].

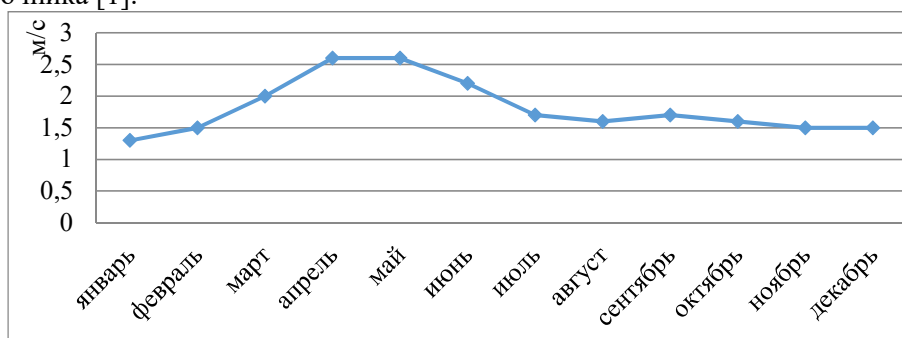


Рисунок 1 – Распределение средних скоростей ветра по месяцам на метеостанции «Петровский завод»

Наименьшие значения скорости ветра наблюдаются в осенне-зимний период. По данным [1,2,3] среднегодовая скорость рассматриваемого района – 1,8 м/с.

Стартовая скорость вращения ветрогенератора «Маглев» CXF-300 с вертикальной осью вращения равна 1 м/с.

Характеристика мощности ВЭУ «Маглев» CXF-300 в зависимости от скорости ветра представлена на рисунке 2.

Мощность ветрогенератора «Маглев» CXF-300 вычислена по формуле:

$$P_w = 0,5 \cdot Q \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p \cdot N_g \cdot N_b,$$

где  $P_w$  – мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ), Вт;  $Q$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь ометания ротора, м<sup>2</sup>;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветра;  $N_g$  – КПД генератора, %;  $N_b$  – КПД повышающего редуктора, %.

При преобразовании механической энергии в электрическую возникают потери. Поэтому отражаем их в КПД генератора  $N_g = 0,8$  (для генераторов с возбуждением от постоянных магнитов).

При расчете мощности ветрогенератора «Маглев» CXF-300 использовались следующие данные:  $Q = 1,23$  кг/м<sup>3</sup>;  $S = 1,3407$  м<sup>2</sup>;  $V$  – от 1 м/с до 15 м/с;  $C_p = 0,35$ ;  $N_g = 0,8$ ;  $N_b = 0,8$ .

Согласно расчетам, мощность, вырабатываемая ветрогенератором Маглев CXF-300 при средней скорости в рассматриваемой районе, равной 1,8 м/с, равна 0,406 Вт. Для полной оценки мощности ветроэнергетических установок и количества вырабатываемой ими энергии необходима надежная информация о повторяемости различных скоростей ветра в предполагаемом районе их установки на уровне оси ветроколеса.

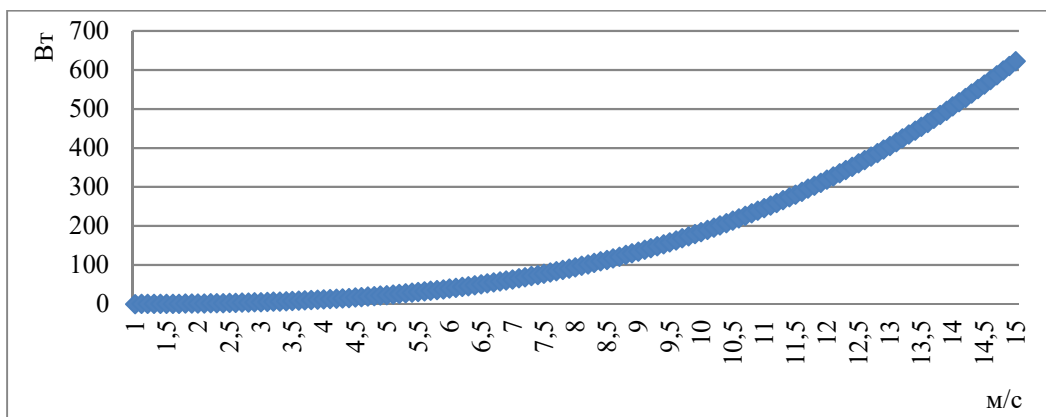


Рисунок 2 – Расчетная мощность ВЭУ «Маглев» CXF-300 в зависимости от скорости ветра

Солнечные панели ZF200-72М-А смонтированы под углом наклона 75° от горизонтальной поверхности и с постоянной ориентацией на юго-запад. При угле наклона солнечной панели 75° от горизонтальной поверхности и ориентации на юго-запад годовая инсоляция равняется 80% от максимальной годовой инсоляции, что равно годовой инсоляции на горизонтальную поверхность. Поэтому для расчета будем брать данные для горизонтальной поверхности. График месячных сумм солнечной радиации на горизонтальную поверхность по месяцам для рассматриваемого региона представлен на рисунке 3.



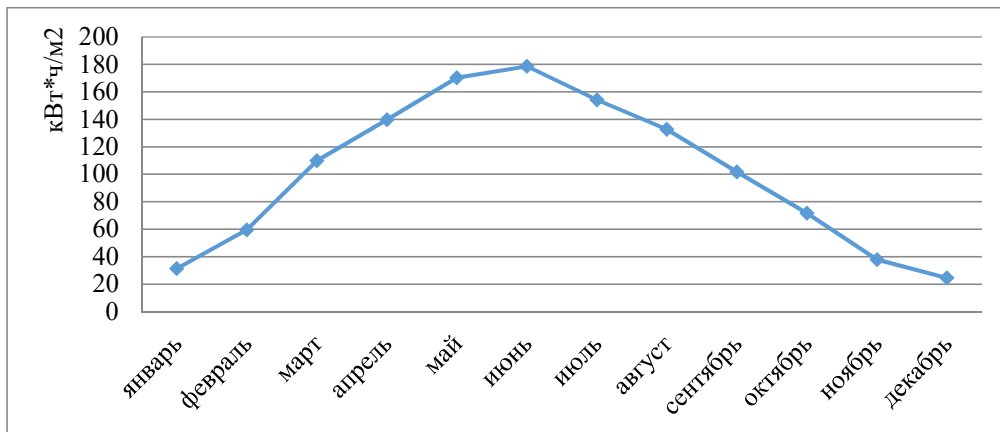


Рисунок 3 – Суммарная (прямая и рассеянная) солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности для г. Чита

Выработка электроэнергии ( $E_c$ , кВт·ч) солнечными панелями ZF200-72М-А вычислена из следующего соотношения:

$$E_c = P_c \cdot S \cdot N_s,$$

где  $P_c$  – поступление солнечной энергии на 1 м<sup>2</sup> за определенный период, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь рабочей поверхности двух солнечных панелей, м<sup>2</sup>;  $N_s$  – КПД солнечной батареи, %.

В таблице 1 приведены характеристики солнечной панели ZF200-72М-А.

Таблица 1 – Характеристика солнечной панели ZF200-72М-А

Тип ячейки	монокристаллический
Максимальная мощность	200 Вт
Площадь рабочей поверхности двух солнечных панелей	1,5625 м <sup>2</sup>
КПД модуля	18,3 %

Для освещения автобусных остановок и площадок отдыха используются светильники ПСКУ-СЭП-120 мощностью 120 Вт.

Среднесуточная потребляемая энергия ( $W$ , Вт·ч) одним светильником ПСКУ-СЭП-120, определяется по формуле:

$$W = P \cdot t,$$

где  $P$  – мощность одного светильника ПСКУ-СЭП-120, Вт;  $t$  – средняя продолжительность работы освещения, ч.

В таблице 2 представлен расчет вырабатываемой электроэнергии 2-мя солнечными панелями ZF200-72М-А и ветрогенератором Маглев СХФ-300 и потребляемой электроэнергии светильником ПСКУ-СЭП-120 по месяцам с учетом климатических особенностей местности ее установки.

Таблица 2 – Расчет автономной системы наружного освещения с учетом климатических особенностей местности ее установки по месяцам

Месяц	Среднесуточная продолжительность работы освещения	Среднесуточная потребляемая энергия одним светильником, Вт*ч	Средняя потребляемая энергия в месяц одним светильником, кВт*ч	Выработка электроэнергии солнечной батареей (СБ) в месяц, кВт*ч	Выработка электроэнергии ветрогенератором в месяц, кВт*ч	Суммарная выработка электрической энергии в месяц (ветрогенератор + СБ), кВт*ч	Процент обеспечения электрической энергией потребляемой нагрузки, %
январь	15:33:17	1860	57,66	8,9467	0,3019	9,24859	16,04
февраль	14:01:41	1680	48,72	16,9973	0,43385	17,4311	35,778
март	12:08:15	1440	44,64	31,4531	1,0993	32,5524	72,922
апрель	10:09:45	1200	36	39,9518	2,33726	42,289	117,47
май	8:25:46	1020	31,62	48,6889	2,41517	51,104	161,62
июнь	7:29:23	900	27	51,0716	1,41597	52,4876	194,4
июль	7:55:39	960	29,76	44,0821	0,67511	44,7572	150,39
август	9:26:50	1140	35,34	37,9662	0,56284	38,5291	109,02
сентябрь	11:20:39	1356	40,68	29,0704	0,65333	29,7237	73,067
октябрь	13:18:12	1596	49,476	20,4923	0,56284	21,0551	42,556
ноябрь	15:04:18	1800	54	10,8021	0,44881	11,251	20,835
декабрь	16:02:29	1920	59,52	6,98946	0,46377	7,45322	12,522
год			514,416	346,512	11,3702	357,882	69,571

Годовая потребляемая электрическая энергия одним светильником ПСКУ-СЭП-120 составляет 514,416 кВт·ч. Две солнечные панели ZF200-72М-А в рассматриваемом районе за год вырабатывают 346,512 кВт·ч. Годовая выработка электроэнергии ветрогенератором «Маглев» СХФ-300 в рассматриваемом районе составляет = 11,37 кВт·ч. Суммарная годовая вырабатываемая электрическая энергия одной автономной системы равна 357,882 кВт·ч, что недостаточно для обеспечения электрической энергией одного светильника ПСКУ-СЭП-120. Дефицит электроэнергии составляет 156,534 кВт·ч (30,4 %). При этом практически всю электроэнергию вырабатывает солнечная панель: примерно 97% от общей вырабатываемой электрической энергии. Согласно расчетам, автономная система наружного освещения автобусных остановках и площадках отдыха не способна обеспечить бесперебойное освещение на протяжении темного времени суток с учетом климатических особенностей местности ее установки. Суммарная электрическая энергия, вырабатываемая ветрогенератором Маглев СХФ-300 и двумя солнечными панелями ZF200-72М-А, недостаточна для обеспечения необходимой емкости аккумуляторных батарей для бесперебойного освещения на протяжении темного времени суток в следующих месяцах: январь, февраль, март, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь.

#### Литература

1. Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России» (ГИС ВИЭ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gisre.ru/>
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – Серия 3. – Выпуск 23. – Бурятская АССР, Читинская область. – 549 с.
3. Носкова Е. В. Ветровой режим Забайкальского края / Е. В. Носкова, В. А. Обязов // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 1. – С. 115-121.

### References

1. Geographic information system “Renewable Energy Sources of Russia” (GIS VIE) [Electronic resource]. – URL: <http://gisre.ru/>
2. Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. – Series 3. – Issue 23. – Buryatskaya ASSR, Chitinskaya oblast. – 549 p.
3. Noskova E.V., Obyazov V.A. // Scholarly Notes of Transbaikal State University. Natural Sciences Series. – 2015. – No. 1. – P. 115-121.

УДК 004.94

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗДАНИЯ УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© **Б. Ц. Дашинамаев**<sup>1</sup>, студент, **В. Ю. Курохтин**<sup>1,a</sup>, старший преподаватель,  
**Ш. Цоож**<sup>2,b</sup>, доцент

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415

<sup>2</sup>Монгольский университет науки и технологии  
14191, Монголия, Улан-Батор, Сухбаатарский район, 8-й округ, ул. Бага тойруу, 34  
E-mail: <sup>a</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>b</sup>tsooj@must.edu.mn

*В статье представлено моделирование здания учебного заведения с использованием компьютерных технологий на примере корпуса №5 ВСГУТУ и расчет балки на прочность. Моделирование проводится в программных комплексах ArchiCAD и AutoCAD. Расчет балки проводится в программных комплексах SolidWorks и ANSYS. Приведена общая характеристика и исходные данные моделируемого здания, а также основные этапы проектирования в программном комплексе ArchiCAD. Приведено описание основных этапов прочностного расчета балки и анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование здания, ArchiCAD, AutoCAD, прочностной расчет, балка, ANSYS, SCAD.

## MODELING A BUILDING OF AN EDUCATIONAL INSTITUTION USING COMPUTER TECHNOLOGIES

**B. Ts. Dashinimaev**<sup>1</sup>, student, **V. Yu. Kurokhtin**<sup>1,a</sup>, senior lecturer,  
**Sh. Tsooj**<sup>2,b</sup>, assistant professor

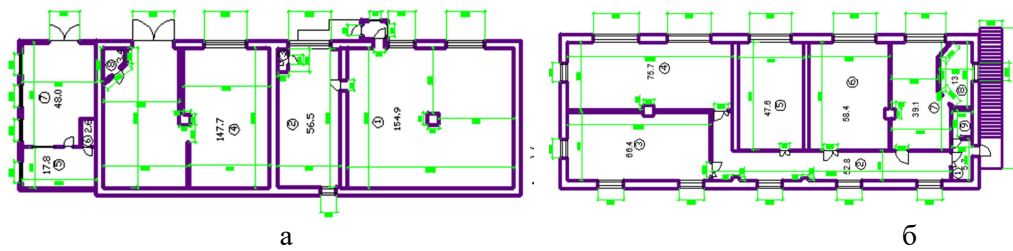
<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, 40v, +7(3012)431415

<sup>2</sup>The Mongolian University of Science and Technology  
14191, Mongolia, Ulaanbaatar, Sukhbaatar district, 8th khoroo, Baga toiruu St., 34  
E-mail: <sup>a</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>b</sup>tsooj@must.edu.mn

*The article presents the modeling of the educational institution building using computer technology on the example of the ESSUTM building No. 5 and the calculation of the beam strength. Modeling is carried out in the ArchiCAD and AutoCAD software systems. Calculation of the beam is carried out in the SolidWorks and ANSYS software systems. The general characteristics and initial data of the simulated building are given, as well as the main design stages in the ArchiCAD software package. The description of the main stages of the beam strength calculation and the analysis of the obtained results are given.*

**Keywords:** building computer simulation, ArchiCAD, AutoCAD, strength analysis, beam, ANSYS, SCAD.

Для создания трехмерной модели здания была изучена техническая документация здания в виде технического паспорта и проведены необходимые замеры. Документ содержит сведения, такие как: сведения о регистрации прав собственности, экспликация земельного участка, благоустройство площади здания, общие сведения, исчисление площадей и объемов здания, экспликация к поэтажному плану, описание конструктивных элементов здания и определение износа и общая стоимость на 2007 год. Согласно замерам и поэтажному плану была создана двумерная модель планов с экспликацией в программном комплексе AutoCAD [1] (рисунок 1).



а – план первого этажа, б – план второго этажа  
Рисунок 1

На основе двумерных планов была разработана трехмерная модель здания в программном комплексе ArchiCAD [2] (рисунок 2).

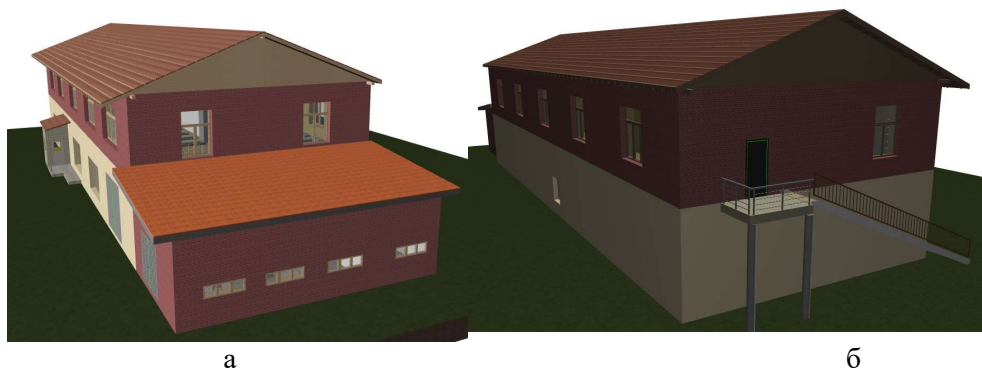


Рисунок 2

Для расчета балки необходимо подобрать форму поперечного сечения, его размеры и материал [3]. Подбор производился согласно ГОСТ Р57837–2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок» [4]. В итоге был выбран двутавр 50Б3. Сбор нагрузок на балку производился согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [5]. Расчетная схема балки в программном комплексе ANSYS представлена на рисунке 3.

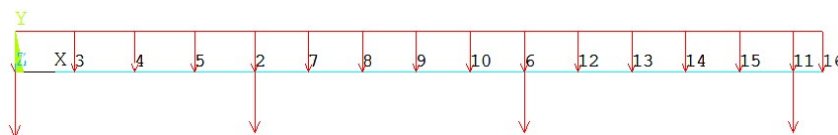
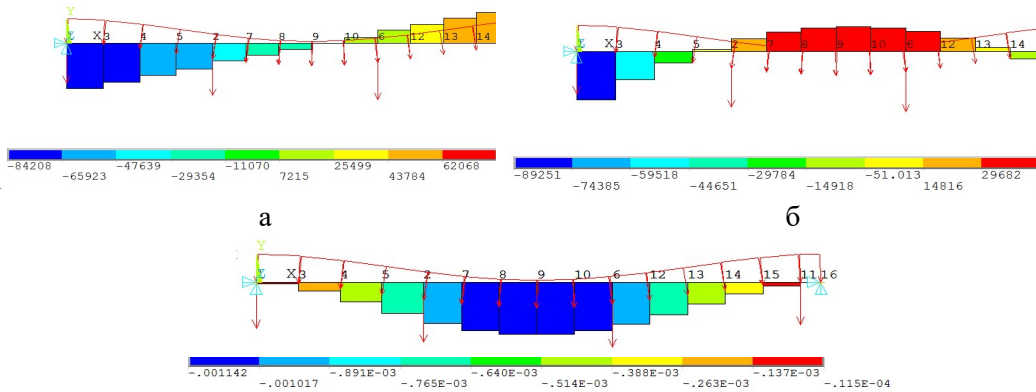


Рисунок 3

Результаты расчета в ANSYS представлены на рисунке 4.



а – эпюра поперечных сил, б – эпюра изгибающих моментов,  
в – эпюра вертикальных деформаций  
Рисунок 4

Расчет балки в SolidWorks производится при помощи модуля «SolidWorks Simulation» [6]. Расчетная схема балки представлена на рисунке 5.

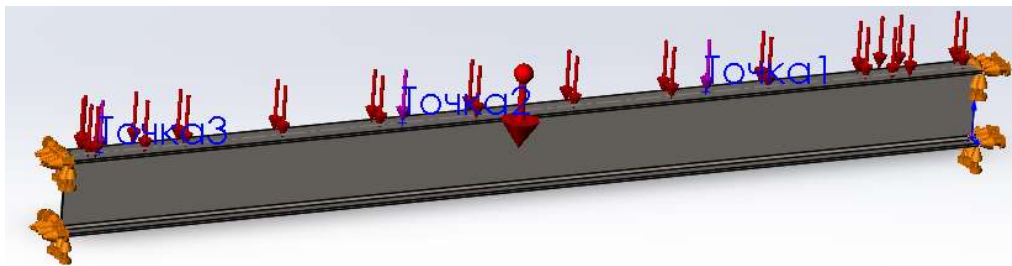
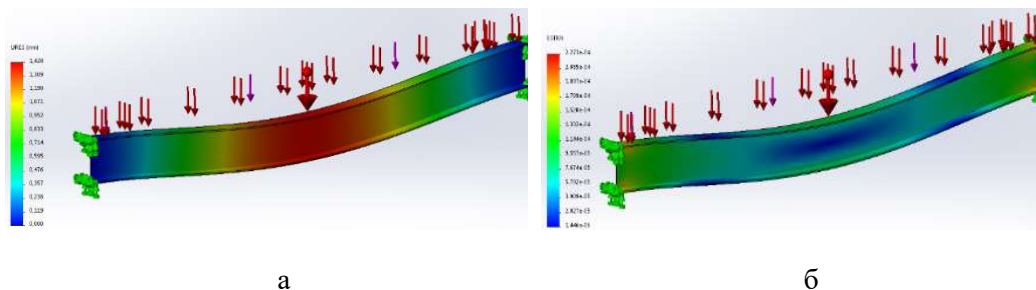


Рисунок 5

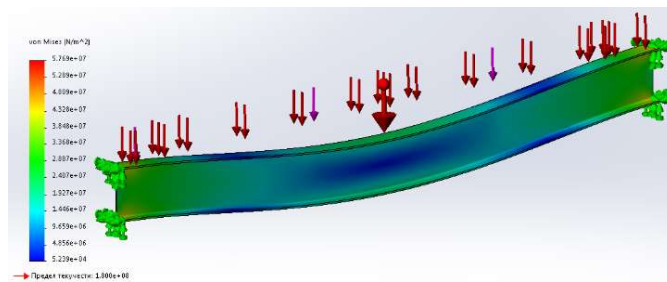
По окончании расчета выдаются три эпюры (перемещения, деформации, напряжения) (рисунок 6).

Смоделированная 3D-модель существующего здания учебного корпуса № 5 ВСГУТУ будет использована при выполнении предварительного планирования процессов перепланировки, ремонта, реставрации и т.д., также для создания технической документации, связанной со зданием.



а

б



в

а – эпюра перемещений, б – эпюра деформаций, в – эпюра напряжений

Рисунок 6

Расчет балки производился в целях проверки ее несущей способности, так как она расположена по продольной оси здания и воспринимает значительную часть нагрузки от крыши и чердачного перекрытия.

#### Литература

1. *Полезук Н. Н.* Самоучитель AutoCAD 2017 / Н.Н. Полезук. – Санкт-Петербург: БХВ–Петербург, 2017. – 480 с.
2. *Иванова О. М.* ArchiCAD 12. Архитектурное проектирование для начинающих / О.М. Иванова, В.Т. Тозик, О.Б. Ушакова. – Санкт-Петербург: БХВ – Петербург, 2009. – 512 с.
3. *Курохтин В. Ю.* Определение внешних параметров калибровки камеры системы технического зрения / В. Ю. Курохтин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 1 (53). – С. 132-136.
4. ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 36 с. – Введен 01.05.2018.
5. Свод правил СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Москва: Минстрой России, 2016. – 80 с. – Введен 04.06.2017.
6. *Алямовский А.А.* Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

#### References

1. *Poleshchuk N.N.* Samouchitel AutoCAD 2017. – Saint-Petersburg: BKhV–Peterburg, 2017. – 480 p.
2. *Ivanova O.M., Tozik V.T., Ushakova O.B.* ArchiCAD 12. Arkhitekturnoe proektirovanie dlya nachinayushchikh. – Saint-Petersburg: BKhV–Peterburg, 2009. – 512 p.
3. *Kurokhtin V.Yu.* // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2017. – No. 1 (53). – P. 132-136.
4. GOST R 57837–2017. Hot-rolled steel I-beams with parallel edges of flanges. Specifications. – Moscow: Standartinform, 2017. – 36 p. – Introduced 01.05.2018.
5. Set of rules SP 20.13330.2016. Loads and actions. – Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2016. – 80 p. – Introduced 04.06.2017.
6. *Alyamovskii A.A.* Inzhenernye raschyoty v SolidWorks Simulation. – Moscow: DMK Press, 2010. – 464 p.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЛОГО ДОМА  
С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ЗДАНИЕМ**

© **А. Е. Каблукова**<sup>1,a</sup>, студент, **В. Ю. Курохтин**<sup>1,b</sup>, старший преподаватель,  
**П. Улзийсайхан**<sup>2,c</sup>, старший преподаватель

<sup>1</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415

<sup>2</sup>Монгольский университет науки и технологии  
14191, Монголия, Улан-Батор, Сухбаатарский район, 8-й округ, ул. Бага тойруу, 34  
E-mail: <sup>a</sup>naskablukova@yandex.ru, <sup>b</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>c</sup>ul-  
ziisaikhan\_p@must.edu.mn

*Данная статья посвящена разработке автоматизированной системы управления зданием. Основными задачами являются анализ систем автоматизации и описание технологического процесса их функционирования. В ходе разработки было подобрано необходимое оборудование, которое будет осуществлять регулировку и управление системами освещения и микроклимата, а также производится расчет и проектирование системы автоматизации. Производится проектирование и моделирование здания в программе ArchiCAD, разработка автоматизированной системы управления зданием, подбор наиболее подходящих аппаратных средств и расчет необходимого количества комплектующих и материалов. Также представлены расчет балки на прочность с использованием современных программных комплексов, описание основных этапов расчета и анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** умный дом, моделирование, ArchiCAD, прочностной расчет, SolidWorks, ANSYS.

**COMPUTER MODELING OF A RESIDENTIAL HOUSE  
WITH AN AUTOMATED BUILDING MANAGEMENT SYSTEM**

**A. E. Kablukova**<sup>1,a</sup>, student, **V. Yu. Kurokhtin**<sup>1,b</sup>, senior lecturer,  
**P. Ulziisaikhan**<sup>2,c</sup>, senior lecturer

<sup>1</sup>East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Klyuchevskaya, 40v, +7(3012)431415

<sup>2</sup>The Mongolian University of Science and Technology  
14191, Mongolia, Ulaanbaatar, Sukhbaatar district, 8th khoroo, Baga toiruu St., 34  
E-mail: <sup>a</sup>naskablukova@yandex.ru, <sup>b</sup>kurokhtin91@gmail.com, <sup>c</sup>ul-  
ziisaikhan\_p@must.edu.mn

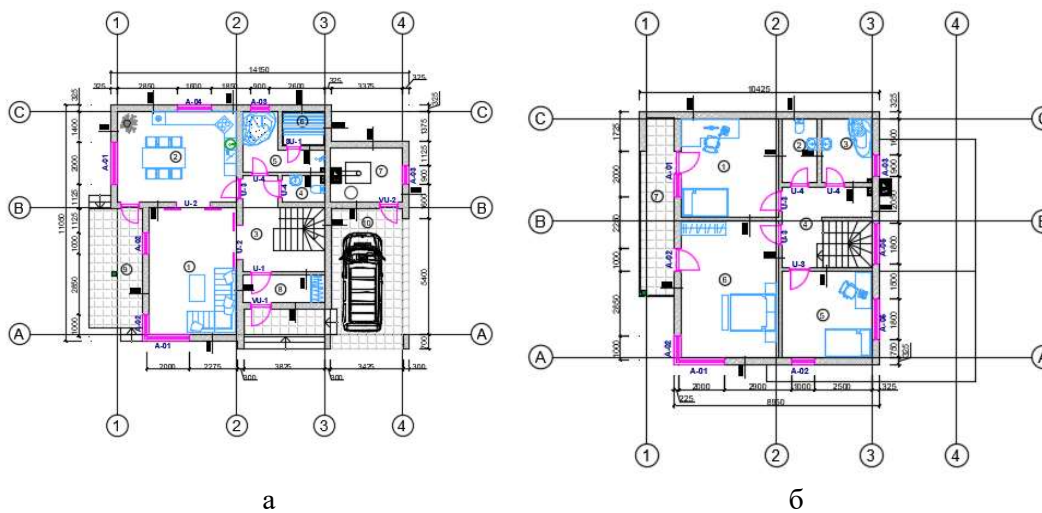
*The article is devoted to the development of an automated building management system. The main tasks are the analysis of automation systems and a description of the technological process of their functioning. During the development, the necessary equipment was selected that will regulate and control the lighting and microclimate systems, as well as the calculation and design of the automation system were carried out. Designing and modeling of the building in the ArchiCAD program, development of an automated building management system, selection of the most suitable hardware and calculation of the required number of components and materials were carried out. The calculation of the beam strength using modern software systems, a description of the main stages of the calculation and analysis of the results are also presented.*

**Keywords:** smart home, modeling, ArchiCAD, strength analysis, SolidWorks, ANSYS.

Объектом автоматизации является двухэтажный жилой дом, в котором имеются инженерные системы с возможностью обеспечения комплексной работы освещения, отопления, вентиляции и многих других. Такие системы облегчают жизнь и условия быта, работы, например регулировка температуры и влажности воздуха, автоматическое управление отоплением, светом. Проектирование жилого дома будет осуществляться в г. Улан-Удэ, Заиграевский район, СНТ 60 лет Бурятии. Площадь планируемой застройки: 11,6×14,4 метра. Дом двухэтажный, количество комнат – 4. Участок огражден по всему периметру. Общая площадь 210,5 м<sup>2</sup>. На рисунке 1 представлена трехмерная модель здания, а на рисунке 2 – планы первого и второго этажей, созданные в программном комплексе ArchiCAD.



Рисунок 1



а

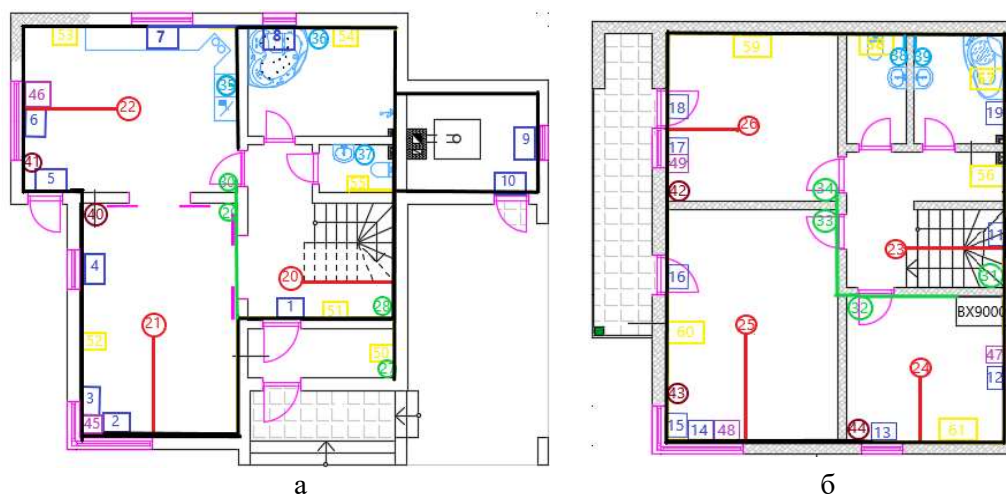
б

а – план первого этажа, б – план второго этажа

Рисунок 2

Размещение всех датчиков автоматизированной системы управления зданием на планах этажей представлено на рисунке 3. Цифры на рисунке соответствуют номерам датчиков в таблице 1.





а – первый этаж, б – второй этаж  
Рисунок 3

Таблица 1 – Датчики автоматизированной системы управления зданием

№	Название	Количество, штук	Длина кабеля, метр	Общая стоимость, рубль
1-19	Датчик разрыва	19	305	9900
20-26	Датчик дыма	7	110	3884
27-34	Датчик движения	8	54,4	3176
35-39	Датчик утечки	5	73,9	1065
40-44	Датчик температуры воздуха	5	98,8	7452,2
45-49	Термопривод системы освещения	5	85	7440
50-61	Блок «Экосвет»	12	152,3	2700
62	Тач-панель	1	6,7	12000
63	Контроллер Beckhoff BX9000	1	-	20324
64	Модуль дискретного ввода KL1408	5	-	18200
65	Модуль аналогового ввода KL3204	1	-	15000
66	Модуль дискретного ввода KL2408	1	-	3767
64	Персональный компьютер	1	-	25000
Итого				129900

Актуальность расчета балки межэтажного перекрытия, расположенной под балконной плитой, заключается в том, что балконная плита имеет большие размеры  $8 \times 1,475 \times 0,4$  м и, соответственно, массу  $1,89 \cdot 10^{10}$  кг; кроме собственного веса, большие размеры балкона приводят к возможности размещения на нем значительного количества предметов, создающих значительную нагрузку на нижележащее перекрытие, что приводит к необходимости расчета его напряженно-

деформированного состояния и, при необходимости, усиления. На рисунке 4 представлена схема балки межэтажного перекрытия.

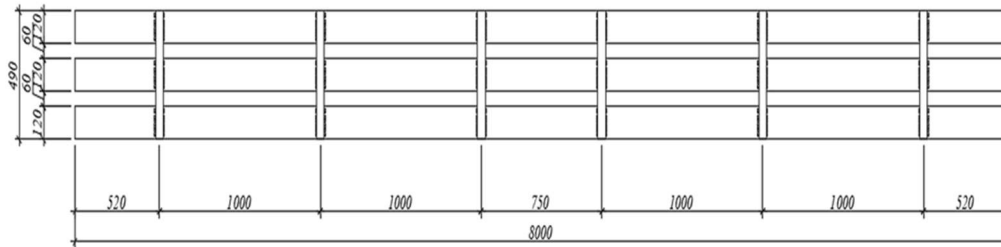
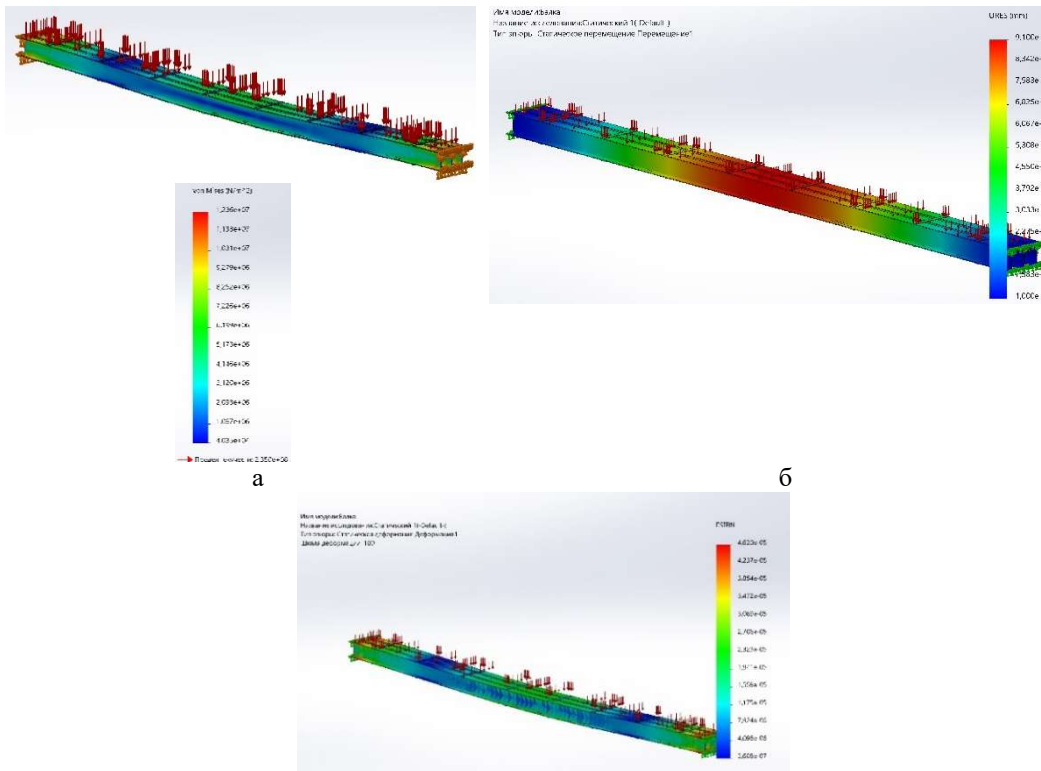


Рисунок 4

Для расчетов на прочность в программном комплексе SolidWorks предназначен модуль SolidWorks Simulation Xpress. В SolidWorks возможно создание 3D моделей и расчет на прочность. В SolidWorks рассчитываются несложные детали на статическую прочность [1]. Распределение напряжений, перемещений и деформаций в балке по результатам расчета в SolidWorks представлено на рисунке 5.

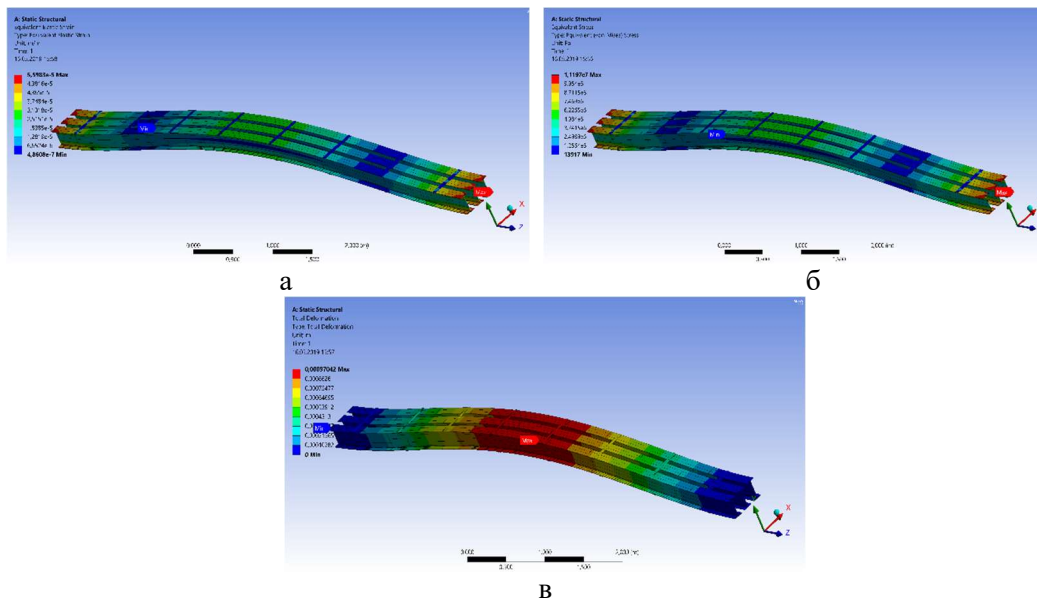


а – распределение напряжений, б – распределение перемещений,  
в – распределение деформаций

Рисунок 5

Для сравнения был проведён расчёт в программном комплексе ANSYS [2-4]. Результаты расчета представлены на рисунке 6.

Сравнительный анализ результатов, полученных в SolidWorks и ANSYS, представлен в таблице 2.



а – распределение перемещений, б – распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, в – распределение деформаций  
Рисунок 6

Таблица 2 – Сравнительный анализ расчётов

	$\sigma_{Tadm}$ , МПа	$\sigma_{max}$ , МПа	$\Delta$ , мм	$\varepsilon$ , мм/мм
ANSYS	235	11,3	0,94	$5,5 \cdot 10^{-5}$
SolidWorks		12,36	0,91	$4,62 \cdot 10^{-5}$

Поскольку максимальное напряжение, возникающее в балке (12,36 МПа), меньше, чем предел текучести материала балки (235 МПа), то условие прочности выполняется, и балка выдерживает прилагаемую к ней нагрузку. Имеется достаточная сходимость результатов, что свидетельствует о корректности вычислений, выполненных в программных комплексах ANSYS и SolidWorks.

#### Литература

1. Алямовский А.А. Основы расчета конструкций в среде SolidWorks / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах / К.А. Басов. – Москва: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
3. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К.А. Басов. – Москва: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.
4. Bokhoeva L.A. Determination of fatigue resistance characteristics of helicopter rotor blade [Электронный ресурс] / L.A. Bokhoeva, V.Yu. Kurokhtin, V.E. Rogov, A.S. Chermoshentseva // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (Novosibirsk, 2018). – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012176/pdf> (дата обращения: 11.08.2019).

### References

1. Alyamovskii A.A. Osnovy raschyota konstruktсии v srede SolidWorks. – Moscow: DMK Press, 2010. – 784 p.
2. Basov K.A. ANSYS v primerakh. – Moscow: Kompiyuter Press, 2002. – 224 p.
3. Basov K.A. Graficheskii interfeis kompleksa ANSYS. – Moscow: DMK Press, 2006. – 248 p.
4. Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Rogov V.E., Chermoshentseva A.S. [Electronic resource] // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (Novosibirsk, 2018). – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012176/pdf> (date of the application: 11.08.2019).

УДК.621

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ НА ПРОЦЕСС ВЫТЯЖКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ПОЛУСФЕРА»

© А. А. Козлов<sup>1</sup>, Е. С. Нестеренко<sup>2</sup>

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Россия, г.Самара, Московское шоссе, д. 34.  
E-mail: <sup>1</sup>andruhakozlov@mail.ru, <sup>2</sup>nesterenko77@mail.ru

*В данной работе представлены результаты исследования влияния упругих свойств штамповой оснастки на процесс глубокой вытяжки детали типа «полусфера». Целью работы являлось проработать возможность уменьшения разнотолщинности готовой детали, а также попытаться повысить точность геометрии детали после вытяжки. Исследования проводились путем моделирования данного процесса с использованием программного продукта Deform 2D. В качестве анализируемой заготовки был выбран материал ВТ1-1 ( $\sigma_6=600$  МПа;  $\sigma_m=380$  МПа) толщиной 5 мм. В качестве упругого элемента использовалась рессорно-пружинная сталь 60Г ( $\sigma_6=980$  МПа;  $\sigma_m=785$  МПа). В процессе вытяжки под действием усилия от пуансона в начальный момент упругий элемент прогибается, опираясь при этом на центральную часть заготовки. Вследствие этого, упругий элемент, осесимметрично раздаваясь, увеличивает площадь контакта с заготовкой, а соответственно происходит увеличение трения, тем самым блокируя опасное сечение. В то же время использование штампа с упругим элементом на пуансоне дает нам эффект калибровки в конечной стадии процесса, который позволяет добиться повышения точности изготавливаемых деталей.*

**Ключевые слова:** вытяжка, упругий элемент, полусфера, разнотолщинность.

## RESEARCH OF THE EFFECT OF DIE TOOLING ELASTIC PROPERTIES ON THE DRAWING PROCESS OF AXISYMMETRIC DETAILS OF HEMISPHERE TYPE

A. A. Kozlov<sup>1</sup>, E. S. Nesterenko<sup>2</sup>

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, 443086, Russia, Samara, 34, Moskovskoye shosse st.  
E-mail: <sup>1</sup>andruhakozlov@mail.ru, <sup>2</sup>nesterenko77@mail.ru

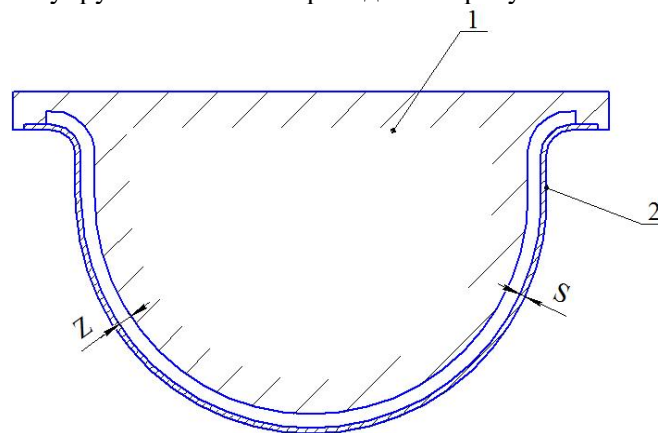
*This paper presents the results of the research of the effect of die tooling elastic properties on the deep drawing process of a “hemisphere” type detail. The research objective was to work out the possibility of reducing the thickness variation of finished detail and try to improve the accuracy of the part geometry after drawing. The studies were carried out by modeling this*

process with using the software product Deform 2D. Material VT1-1 ( $\sigma_b = 600 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_t = 380 \text{ MPa}$ ) 5 mm thick was chosen as the analyzed blank. Spring steel 60G ( $\sigma_b = 980 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_t = 785 \text{ MPa}$ ) was used as the elastic element. Relying on the workpiece central part, the elastic element bends under the effect of the punch force at the initial moment in the process of drawing. As a result, the elastic element, being distributed symmetrically, has widened the area of contact with the workpiece and thereafter the friction has increased, blocking the dangerous section. At the same time, the use of a stamp with an elastic element on the punch gives us the calibration effect in the final stage of the process, which allows us to achieve an increase in the accuracy of the produced details.

**Keywords:** drawing, elastic element, hemisphere, thickness variation.

Особенность вытяжки сферообразных деталей по сравнению с вытяжкой цилиндрических деталей с плоским дном – наличие значительной части заготовки, свободной от контакта с пуансоном и матрицей, и значительные пластические деформации выпуклой донной части заготовки. Процесс вытяжки протекает в две стадии: 1-формообразование центральной донной части днища без значительного перемещения фланца заготовки и 2 – интенсивное втягивание заготовки в матрицу при значительном перемещении фланца заготовки, завершающееся полным оформлением обводов днища [1].

В связи с этим после вытяжки у детали наблюдается различная толщина в центре заготовки и на ее кромке. Чтобы снизить разнотолщинность, будем использовать упругий элемент с толщиной  $S$ , повторяющий контур пуансона. Но между пуансоном и упругим элементом имеется зазор величиной  $Z$ . Схема конструкции пуансона и упругого элемента приведена на рисунке 1.

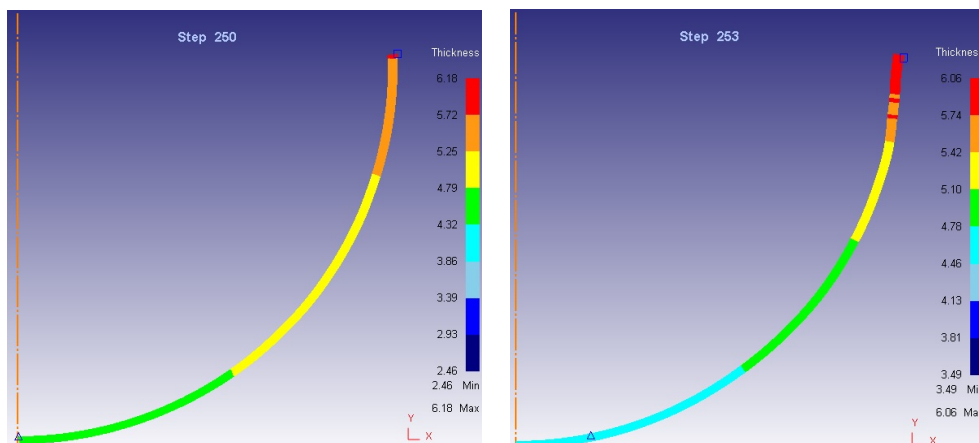


1 – пуансон; 2 – упругий элемент

Рисунок 1 – Схема конструкции пуансона и упругого элемента

Как определить толщину упругого элемента и величину зазора описывается в [2]. Проведем процесс моделирования для процесса вытяжки с упругим элементом и без него.

На рисунке 2 показана толщина детали после вытяжки.



а) без упругого элемента                      б) с упругим элементом  
Рисунок 2 – Толщина детали после вытяжки

Как видно из цветовой диаграммы, разнотолщинность детали после вытяжки без упругого элемента составляет 1,86 мм, что в свою очередь составляет 30%. Утонение центральной части детали по отношению к первоначальной толщине – 0,68 мм (13,6%).

Разнотолщинность детали, которую вытягивали с помощью упругого элемента – 1,6 мм, а это 26%. Утонение центральной части – 0,54 мм (10,8%).

Сравнивая полученные результаты, видно, что использование упругого элемента по контуру пуансона позволяет снизить разнотолщинность детали и утонение центральной части 4% и 2,8% соответственно.

На рисунке 3 показана интенсивность напряжений в упругом элементе на последнем шаге.

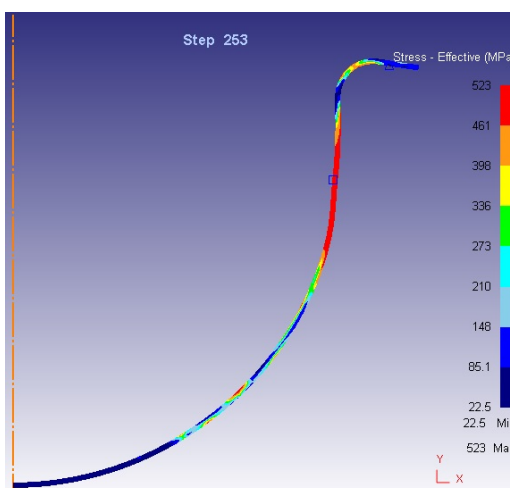


Рисунок 3 – Распределение интенсивности напряжений в упругом элементе

Как видно из рисунка 3, максимальное напряжение – 523 МПа. Т.к. оно меньше предела текучести стали 60Г, то можно утверждать, что упругий элемент

пластически не деформировался, и, следовательно, после снятия нагрузки, примет свою исходную форму.

Таким образом, упругий элемент за счет блокировки опасного сечения позволяет снизить разнотолщинность детали, в процессе вытяжки. В то же время, эффект калибровки позволяет получить более точную геометрию детали по внешней поверхности.

#### *Литература*

1. *Мельников Э.Л.* Холодная штамповка днищ / Э.Л. Мельников. – Москва: Машиностроение, 1986. – 192 с.

2. *Нестеренко Е.С., Гречников Ф.В.* Расчет процесса вытяжки детали «Полусфера» в штампе с упругим элементом / Е.С. Нестеренко, Ф.В. Гречников // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2017. – № 4. – С. 62-68.

#### *References*

1. *Melnikov E.L.* Cold pressing of bottoms. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 192 p.

2. *Nesterenko E.S., Grechnikov F.V.* // Proceedings of higher schools. Nonferrous metallurgy. – 2017. – No. 4. – P. 62-68.

УДК 539.3

### **РАСЧЕТ ЦИКЛИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ПОДКОНСТРУКЦИЙ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS**

© **О. В. Короткая**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5/1  
E-mail: korotkaya\_olga@mail.ru

*Разработана методика математического моделирования для расчета циклически симметричных конструкций, представленная на примере камер жидкостных ракетных двигателей. На сегодняшний день основным способом проверки прочности камер сгорания являются многочисленные огневые испытания. Разработанная же методика посредством объединения ряда программных комплексов (ANSYS, pSeven) позволяет не только выполнить поверочный расчет конструкции, но также и спроектировать конструкцию с оптимальными параметрами с учетом заданных критериев. Изложен пошаговый алгоритм действий.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, метод конечных элементов, подконструкция, циклическая симметрия, оптимизация, напряженно-деформированное состояние, сопло, камера сгорания, ЖРД, каналы охлаждения.

### **CALCULATION OF CYCLIC SYMMETRICAL STRUCTURES BY USING A SUBMODELING METHOD IN ANSYS SOFTWARE**

**O. V. Korotkaya**

Bauman Moscow State Technical University,  
105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya str., 5/1  
E-mail: korotkaya\_olga@mail.ru

*The methodology of mathematical modeling for calculation of cyclic symmetrical structures on the example of liquid propellant rocket engine thrust chambers has been developed. Nowa-*

days the numerous fire tests are the basic method to test the strength of the thrust chambers. By combining a number of software packages (ANSYS, pSeven) the developed methodology enables not only to perform a checking calculation but to design an optimal structure as well. A step-by-step sequence of actions has been described.

**Keywords:** mathematical modeling, finite element method, submodel, cyclic symmetry, optimization, stress-strain state, nozzle, thrust chamber, liquid-propellant rocket engine, cooling channels.

В работе предлагается комплексная методика численного моделирования для оценки прочности циклически симметричных конструкций на примере камеры сгорания и сопловой части жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) [1-2]. Необходимость учета физически нелинейных свойств материала и большая размерность задачи ввиду сложности конструкции приводит к тому, что прямая конечно-элементная аппроксимация становится трудоемкой, так как даже для единичного поверочного расчета требуются значительные вычислительные мощности. Численная реализация многоэтапной последовательности режимов работы существенно усложняет задачу. Трудоемкость анализа возрастает на порядок при постановке задачи проектирования с целью синтеза рациональной геометрии тракта охлаждения. Методика в целом состоит из двух последовательно выполняемых шагов: выбор рациональных с точки зрения прочности геометрических размеров тракта охлаждения и уточненный поверочный расчет методом подконструкций, каждый из которых в свою очередь состоит из нескольких этапов.

Для решения задачи поиска рациональных геометрических параметров используется специализированный программный комплекс pSeven (DATADVANCE), позволяющий реализовать многокритериальную оптимизацию. Для интеграции оптимизационного цикла с программным комплексом ANSYS подготовлена авторская программа на языке APDL, решающая последовательно стационарную задачу теплопроводности и задачу определения НДС с заданными граничными условиями.

Для поиска рациональных геометрических параметров тракта охлаждения при меридиональном расположении каналов создана двумерная параметрическая расчетная модель, содержащая циклически повторяющийся секториальный сегмент. Для сокращения времени на вычисления сегмент состоит из одного канала охлаждения и ребра.

Управляющие параметры:

$$s^T = [n, \alpha, t, h, h_1],$$

где  $n$  – число каналов охлаждения,  $\alpha$  – угловая ширина канала охлаждения,  $t$  – толщина огневой стенки,  $h$  – толщина тракта охлаждения,  $h_1$  – толщина силовой оболочки.

Накопление пластических деформаций в процессе циклической работы потенциально приводит к разрушению конструкции. Поэтому в качестве минимизируемых критериев выбраны величина максимальной эквивалентной пластической деформации и величина максимального эквивалентного напряжения в представительном элементе. В результате определяются рациональные значения геометрических размеров ребер и каналов охлаждения.

С помощью двумерной параметрической модели осуществляется выбор оптимальных геометрических размеров при расположении каналов охлаждения вдоль оси камеры. Трехмерная параметрическая циклически повторяющаяся мо-



дель (рисунок 1) позволяет осуществить оптимизацию геометрии тракта охлаждения в произвольном месте конструкции.

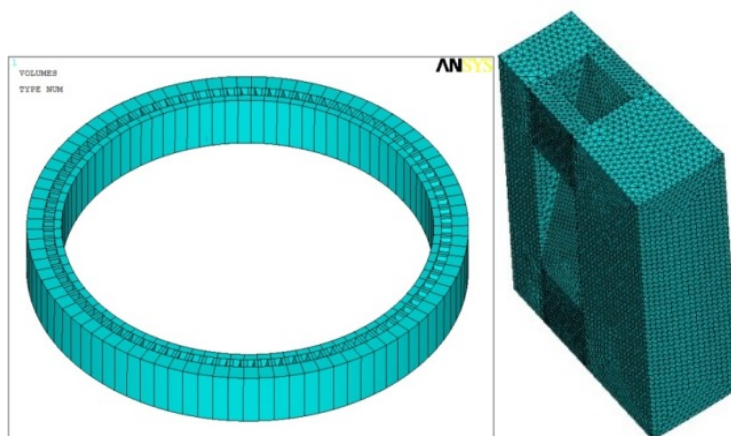
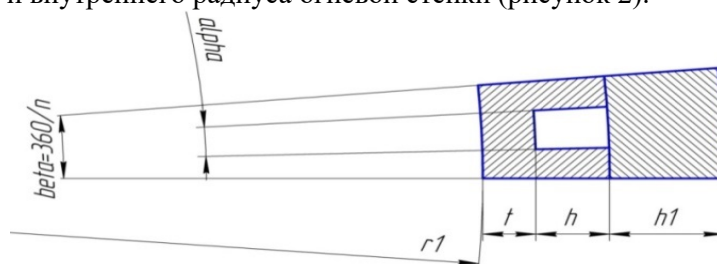


Рисунок 1 – Трехмерная параметрическая модель

Модель описывает циклически повторяющийся представительный элемент, состоящий из огневой стенки, спиральных каналов охлаждения и силовой оболочки в произвольном месте конструкции за счет изменения координаты вдоль оси камеры и внутреннего радиуса огневой стенки (рисунок 2).



• Рисунок 2 – Геометрические параметры сечения трехмерной параметрической модели

Управляющие параметры:

$$s^T = [n, \alpha, t, h, h_1, \gamma],$$

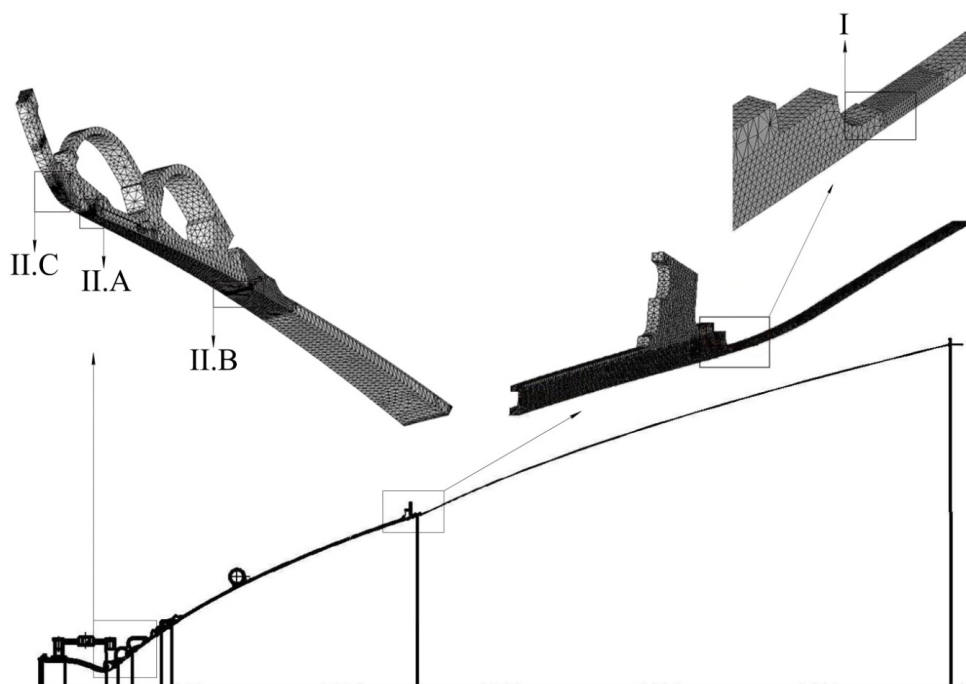
где  $n$  – число каналов охлаждения,  $\gamma$  – угол закручивания каналов охлаждения (относительно плоскости, перпендикулярной оси вращения).

Для проведения уточненного анализа прочности ЖРД наиболее эффективными являются численные методы. В настоящее время такие расчеты проводятся, как правило, с использованием метода конечных элементов. Для реализации этого метода существуют различные программные комплексы, одним из которых является ANSYS – современный профессиональный комплекс, позволяющий решать прикладные задачи прочности, теплообмена и т.п. [3-4] При выполнении уточненного поверочного расчета для преодоления проблемы большой размерности задачи предлагается использовать двухэтапную схему.

На первом этапе расчет конструкции проводится по упрощенной расчетной схеме осесимметричной конструктивно-анизотропной оболочки. Наличие спи-

ральных каналов охлаждения в стенке изделия нарушает симметрию конструкции. Поэтому предлагается заменить реальную конструкцию конструктивно-анизотропной сплошной моделью. Подобное упрощение позволяет с достаточной для дальнейшего анализа точностью определить перемещения в конструкции, не позволяя при этом оценить НДС. Знание значений перемещений, а также локализация опасных с точки зрения прочности областей конструкции позволяет использовать метод подконструкций для дальнейшего анализа критических зон [5]. Существенное снижение размерности задачи достигается посредством использования метода подконструкций, а также условия циклической симметрии, которое позволяет перейти от анализа полной модели подконструкции к анализу ее циклически повторяющегося секториального сегмента.

При определении НДС конструкции в качестве исходных данных используются распределения температур и давлений, полученные из газодинамического расчета. Предполагается, что стационарная задача теплопроводности и теплопрочностная задача не связаны, что позволяет проводить соответствующие расчеты независимо. Сначала решается задача теплопроводности. В результате расчета определяется температурное состояние осесимметричной оболочки, которое используется для определения НДС. Перемещения, полученные в результате расчета по осесимметричной модели, используются при проведении трехмерных расчетов НДС подконструкций для задания кинематических граничных условий. На втором этапе расчета с использованием трехмерных моделей, детально описывающих реальную геометрию, исследуется НДС подконструкций (рисунок 3).



I – подконструкция 1, стык с насадком радиационного охлаждения; II – подконструкция 2, А – стык развальцованной оболочки камеры со сверхзвуковой частью сопла, В – стык медного и стального участков огневой стенки камеры в сверхзвуковой части сопла, С – район критического сечения

Рисунок 3 – Общий вид камеры двигателя

Использование циклической симметрии позволяет ограничиться расчетом части конструкции в виде секториального сегмента. Количество узлов в трехмерной модели больше, чем в осесимметричной, поэтому для нахождения значений в промежуточных узлах использована интерполяция. Для каждой из подконструкций анализируются критические зоны, определенные экспериментально и предварительным расчетом.

#### *Литература*

1. *Короткая О.В.* Инновационная методика расчета и проектирования камеры сгорания ЖРД / О.В. Короткая // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 12 (60). – DOI 10.18698/2308-6033-2016-12-1560.
2. *Короткая О.В.* Применение циклической симметрии и метода подконструкций в термпрочностном расчете камеры сгорания ЖРД с кислородным охлаждением / О.В. Короткая, С.С. Гаврюшин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 1 (670). – С. 78-86.
3. *Каплун А.Б.* ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. *Морозов Е.М.* ANSYS в руках инженера: механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Музеймек, А.С. Шадский. – Москва: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
5. *Korotkaya O.V.* Substructure Method for Thermal-Stress Analysis of Liquid-Propellant Rocket Engine Combustion Chamber / O.V. Korotkaya // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 88, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering. – 2014. – № 8 (4). – С. 734–737.

#### *References*

1. *Korotkaya O.V.* // Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii. – 2016. – No. 12 (60). – DOI 10.18698/2308-6033-2016-12-1560.
2. *Korotkaya O.V., Gavryushin S.S.* // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie. – 2016. – No. 1 (670). – P. 78-86.
3. *Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfierieva M.A.* ANSYS v rukakh inzhenera: prakticheskoe rukovodstvo. – Moscow: Editorial URSS, 2003. – 272 p.
4. *Morozov E.M., Muzeimek A.Yu., Shadskii A.S.* ANSYS v rukakh inzhenera: mekhanika razrusheniya. – Moscow: LENAND, 2010. – 456 p.
5. *Korotkaya O.V.* // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 88, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering. – 2014. – No. 8 (4). – P. 734–737.

УДК 628.8

### **ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА СТО «БАЙКАЛ АВТОТРАК»**

© Д. А. Кузнецова, магистр, О. Б. Аюрова, доцент  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415  
E-mail: 30.03.1995KDA@mail.ru

*В статье представлены результаты исследования систем обеспечения микроклимата СТО «Байкал Авто Трак», на основании которых разработаны мероприятия по улучшению работы систем обеспечения микроклимата. Был произведен фактический*

*теплотехнический расчет конструкции и расчет тепловых потерь. Исходя из данных первоначальных расчетов и обследования объекта можно сделать вывод о том, что для поддержания необходимых параметров внутреннего воздуха помещений и для компенсации тепловых потерь ранее была произведена реконструкция системы отопления, дополнительно установлены воздушные тепловые агрегаты. Для выявления больших тепловых потерь произведена тепловизионная съемка. На основании проведенной тепловизионной съемки и расчетов тепловых потерь, подобран теплоизоляционный материал, удовлетворяющий всем необходимым условиям, произведен гидравлический расчет системы отопления. Рассмотрен вариант подключения данного объекта к централизованному теплоснабжению с учетом всех технико-экономических показателей.*

**Ключевые слова:** тепловые потери, теплотехнический расчет, тепловизионная съемка, система отопления, теплоизоляционный материал, гидравлический расчет.

#### **RESEARCH AND IMPROVEMENT OF THE MICROCLIMATE MAINTENANCE SYSTEMS FOR THE MAINTENANCE STATION “BAIKAL AUTOTRUCK”**

**C. A. Kuznetsova**, master, **O. B. Ayurova**, associate professor  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Kluchevskaya, 40v, +7(3012)431415  
E-mail: 30.03.1995KDA@mail.ru

*The article presents the results of the study of the microclimate maintenance systems of the “Baikal Auto Truck” service station, on the basis of which measures have been developed to improve the operation of the microclimate maintenance systems. The actual thermal calculation of the structure and the calculation of heat losses were made. Based on the data of the initial calculations and the inspection of the facility, it can be concluded that to maintain the required parameters of indoor air inside the premises and to compensate for heat losses, the heating system was previously reconstructed, and air heating units were installed. To identify large heat losses, thermal imaging was performed. On the basis of the conducted thermal imaging and calculations of heat losses, the heat-insulating material that meets all the necessary conditions was selected, the hydraulic calculation of the heating system was made. The variant of connecting this object to the centralized heat supply considering all technical and economic indicators is considered.*

**Keywords:** heat loss heat engineering calculation, thermal imaging, heating system, heat insulation material, hydraulic calculation.

Значительный рост автомобильного парка нашей страны вызывает увеличение объема работ по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей. Выполнение этих работ требует больших трудовых затрат и привлечение большого числа квалифицированных рабочих. В связи с этим требуется значительно повысить производительность труда при проведении всех видов технического обслуживания и ремонта автомобилей. Благоприятные (комфортные) метеорологические условия на производстве являются важным фактором в обеспечении высокой производительности труда и в профилактике заболеваний. При несоблюдении гигиенических норм микроклимата снижается работоспособность человека, возрастает опасность возникновения травм и ряда заболеваний, в том числе профессиональных.

Объектом исследования является СТО «Байкал Авто Трак» официальный дилер Volvo, г. Улан-Удэ, ул. Автотранспортная, 21. Здание СТО состоит из основного строения и пристроя. Площадь основного строения 2699,9 кв.м., площадь 1-

го этажа пристроя – 133,1 кв.м., 2-го этажа – 229,6 кв.м. Объем равен 18784 куб.м. Общее количество помещений 68.

Здание имеет размеры в осях 36000x78000м. Фундамент железобетонный столбчатый, стены и перегородки- железобетонные панели, перекрытия- железобетонные.

При первоначальном обследовании объекта было выявлено отсутствие теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, в следствии отсутствия теплоизоляции имеются большие тепловые потери, что приводит к низкой температуре внутреннего воздуха помещений. Для устранения данных проблем, по запросу представителей данного объекта в проектно-монтажную организацию, ранее был произведен гидравлический расчет и реконструкция системы отопления, дополнительно установлено воздушные тепловые агрегаты.

На основании имеющегося материала, для выяснения причин, был произведен фактический теплотехнический расчет конструкций и расчет тепловых потерь. По результатам расчетов выявлено не соответствие значений термического сопротивления конструкций и получены большие значения тепловых потерь.

Общие теплотери здания слагаются из потерь теплоты через наружные стены, пол, потолок, оконные и дверные заполнения, а также из теплоты, расходуемой на подогрев холодного воздуха, поступающего в помещения через притворы окон и дверей.

Согласно п.6 Ст.11 ФЗ №261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» не допускается ввод в эксплуатацию зданий, строений, сооружений, построенных, реконструированных, прошедших капитальный ремонт не соответствующих требованиям энергетической эффективности и требованиям оснащенности их приборами учета используемых энергетических ресурсов. Необходимость вызвана снижением потребления тепловой энергии для отопления помещений и как следствие снижением эксплуатационных затрат.

Утепление здания влечет за собой ряд капиталовложений для закупки и монтажа материалов для утепления наружных ограждающих конструкций. Каждое капиталовложение имеет срок окупаемости, на основании которого можно судить о необходимости мероприятий.

Для выявления потерь тепла в здании выполнялись тепловизионные обследования наружных ограждающих конструкций тепловизором Testo 875-2. На рисунках 2, 3, 4 приведены результаты тепловизионной съемки. Тепловизионная съемка наглядно показывает наличие или отсутствие скрытых конструктивных, технологических, строительных или эксплуатационных дефектов теплозащиты зданий. Так же наглядно показывает, как холодный наружный воздух под действием тяги и ветра проникает в помещения, а теплый воздух из помещений выходит через щели в верхней части стен и примыканиях стен к крыше. Тепловизионное обследование позволяет визуализировать работу отопительной системы и определить ее достоинства и недостатки. С его помощью легко определить, насколько равномерно обогревается здание, какова эффективность отопления и сколько тепла теряется, вылетая в буквальном смысле в трубу, отопительную либо вентиляционную. Исходя из полученных данных, можно устранить обнаруженные недостатки, повысив КПД системы до максимально возможного уровня.

ГСОП = 3910 (°C \* сутки)  
 Приведённое Rtr\_0 (по т.16\* - Условия энергосбережения) = 1,78 (м<sup>2</sup>\*°C)/Вт  
 Требуемое Rtr\_0 (по ф.1 - Условия комфортности и санитарии) = 0,85 (м<sup>2</sup>\*°C)/Вт  
**Принять за Расчётное Rtr, 1,78 (м<sup>2</sup>\*°C)/Вт**

R<sub>0</sub> = 1,062

№	T вн.по в.°C	Наименование слоя	Толщина мм	Вт/(м х °C), коэф. теплопро- в.
	11,4	Коэф.т теплоотдачи у внутренней поверхности	0	8,700
1	11,1	Шпатлевка	5	0,760
2	8,9	Гипс	15	0,340
3	-3,3	Воздух прослойка	30	0,120
4	-8,4	Ж/Б плита	200	1,940
5	-20,6	Воздух прослойка	30	0,120
6	-32,9	Металосайдинг	30	0,120
		Коэф.т теплоотдачи у наружной поверхности	0	23,000

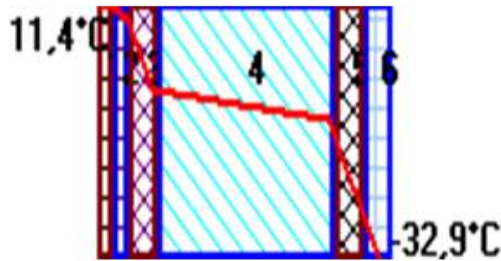
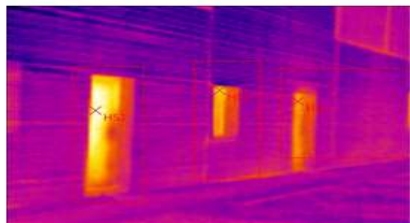


Рисунок 1 –Теплотехнический расчет ограждающих конструкций – наружная стена

Файл:  
IV\_00002.bmt

Дата:  
15.11.2018

Время:  
16:35:15



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95  
 Отраж. темп. [°C]: 20,0

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Самая теплая точка 1	-5,7	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 2	-6,7	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 3	-8,5	0,95	20,0	-

Гистограмма:

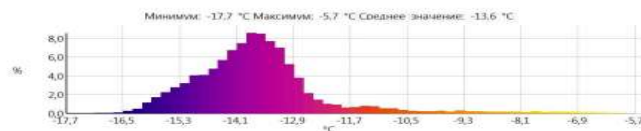
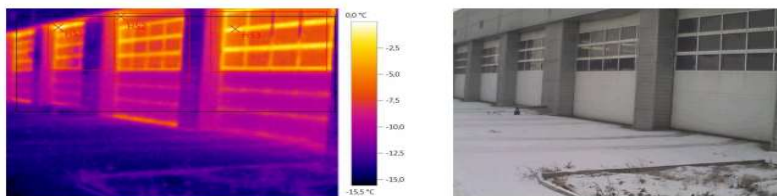


Рисунок 2 – Тепловизионная съемка наружных дверей

Файл:  
IV\_00006.bmt

Дата:  
15.11.2018

Время:  
16:35:50



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95  
Отраж. темп. [°C]: 20,0

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Самая теплая точка 1	0,0	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 2	-1,0	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 3	-1,1	0,95	20,0	-

Гистограмма:

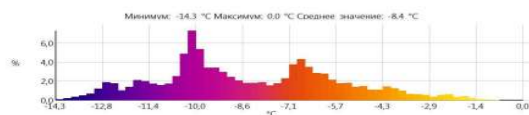
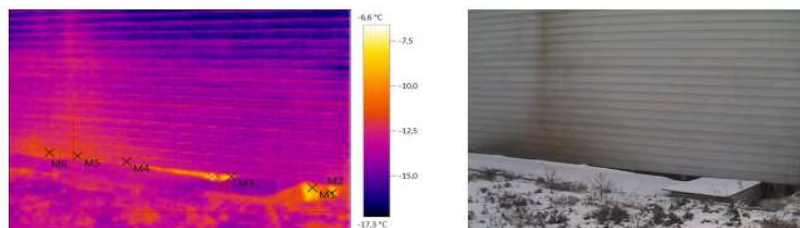


Рисунок 3 – Тепловизионная съемка въездных ворот

IV\_00005.bmt

15.11.2018

16:35:45



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95  
Отраж. темп. [°C]: 20,0

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Точка измерения 1	-9,6	0,95	20,0	-
Точка измерения 2	-9,1	0,95	20,0	-
Точка измерения 3	-9,2	0,95	20,0	-
Точка измерения 4	-12,5	0,95	20,0	-
Точка измерения 5	-11,9	0,95	20,0	-
Точка измерения 6	-11,6	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 1	-6,6	0,95	20,0	-

Гистограмма:

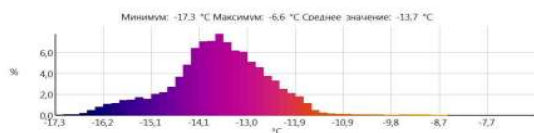


Рисунок 4 – Тепловизионная съемка наружных ограждений

Анализ результатов тепловизионного обследования ограждающих конструкций выявил значительные потери тепла здания. Для снижения тепловых потерь

был произведен теплотехнический расчет с подбором теплоизоляционного материала для всех наружных ограждающих конструкций, произведен гидравлический расчет системы отопления с изменением нагрузки и ее реконструкция.

Так же одной из причин проблем является плохое распределение теплоносителя системы отопления по трубопроводам, которое происходит из-за гидравлического дисбаланса. Расход горячей воды по трубопроводам зависит от местных сопротивлений самих участков. Этот показатель изменяется из-за засорений и коррозии труб, реконструкций или ремонтов, при добавлении нагревательных приборов на ветви магистральной разводки системы. Для улучшения работы системы отопления предлагается произвести гидравлическую регулировку системы отопления передили в самом начале отопительного сезона.

Повышение энергоэффективности и энергосбережения зданий также предусматривает выполнение ряда мероприятий, призванных обеспечить максимально экономичный расход основных энергоресурсов — электроэнергии, горячей и холодной воды, тепловой энергии. Вариантами повышения энергоэффективности служат: внедрение автоматизированных узлов управления теплоснабжением зданий на отопление, индивидуальное регулирование теплоотдачи каждого отопительного прибора с помощью термостатов, установка автоматических балансировочных клапанов на стояках и ветках системы отопления.

Для данного объекта предложен вариант подключения данного объекта к централизованному теплоснабжению, с имеющейся точкой подключения.

#### *Литература*

1. Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Москва: ООО «Аналитик», 2012. – 100 с. – Введен 01.07.2013.

2. Свод правил СП 56.13330.2011. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001. – Москва: ОАО «Центр проектной продукции в строительстве», 2011. – 21 с. – Введен 20.05.2011.

3. Свод правил СП 364.1311500.2018. Здания и сооружения для обслуживания автомобилей. Требования пожарной безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 11 с. – Введен 01.05.2018.

#### *References*

1. Set of rules SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003. – Moscow: Analitik Ltd, 2012. – 100 p. – Introduced 01.07.2013.

2. Set of rules SP 56.13330.2011. Production buildings. Updated edition of SNiP 31-03-2001. – Moscow: OJSC “Tsentr proektnoi produktsii v stroitelstve”, 2011. – 21 p. – Introduced 20.05.2011.

3. Set of rules SP 364.1311500.2018. Buildings and facilities for car maintenance. Fire safety requirements. – Moscow: Standartinform, 2018. – 11 p. – Introduced 01.05.2018.

УДК 697.95

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

© **Т. В. Мельникова**, студент, **А. П. Преображенский**, профессор,

**Я. Е. Львович**, профессор

Воронежский институт высоких технологий

394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а, +(473)220-20-420

E-mail: komkovvvt@yandex.ru



*В данной работе рассматривается задача, связанная с моделированием турбулентных течений, которые достаточно распространены и для них на настоящий момент не построено полной теории. Среди моделей, которые базируются основанных на подсеточном масштабе, была выбрана модель, предложенная Смагоринским. На основе созданной подсистемы в виде кроссплатформенной динамической библиотеки для моделирования турбулентных сред было проведено моделирование обтекания водой круглого препятствия. Представлены результаты моделирования. Даны предложения по процедуре оптимизации, при варьировании вариантов реализации рассматриваемой системы движения среды.*

**Ключевые слова:** турбулентность, моделирование, оптимизация, движение жидкости.

## MODELING AND OPTIMIZATION OF THE PROCESSES OF TURBULENCE

**T. V. Melnikova**, student, **A. P. Preobrazhenskiy**, professor, **Ya. E. Lvovich**, professor  
Voronezh institute of high technologies  
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina St., +7(473)220-20-420  
E-mail: komkovvvt@yandex.ru

*In this paper the problem is considered associated with the simulation of turbulent flows, which are quite common and for them at the moment is not built a complete theory. Among the models that are based on the subgrid scale, the model proposed by Smagorinsky was chosen. On the basis of the created subsystem in the form of a cross-platform dynamic library for modeling turbulent media, water flow around a circular obstacle was simulated. The simulation results are presented. The proposals for the optimization procedure, with varying options for the implementation of the considered system of motion of the medium.*

**Keywords:** turbulence, modeling, optimization, fluid motion.

В настоящее время можно наблюдать развитие интеграции САПР (computer-aided design, CAD) с системами моделирования (Computer-aided engineering, CAE), позволяющими провести тестирование создаваемого объекта непосредственно во время проектирования. Кроме того, средства позволяющие ставить вычислительные эксперименты достаточно давно используются в науке, когда натурные эксперименты слишком дороги, невозможны или их необходимо повторить большое количество раз в одинаковых условиях.

Несмотря на то, что большинство технических процессов описывается известными физическими законами, часто практически невозможно заранее предсказать, как поведёт себя некий объект в тех или иных условиях.

Данное обстоятельство обусловлено лишь чрезвычайной сложностью современных систем. Вычислительная физика представляет собой способ проведения научных и технических исследований, в дополнении к эксперименту и теории. При этом компьютер играет роль прибора, который даёт новые возможности для изучения свойств различных физических моделей.

Одним из самых крупных разделов вычислительной физики можно считать вычислительную гидродинамику (Computational fluid dynamics, CFD). За счет применения подходов, основанных на численном моделировании при описании движений жидких сред, она есть возможности заметного ускорения разработок разных технических устройств. Большинство движений жидкостей, газовых и плазменных потоков, встречающихся в технике, являются турбулентными [1].

Большое число моделей, связанных с подсеточным масштабом, базируются на предположениях, относящихся к существованию вихревой вязкости [2]. Произ-

ходит процесс влияния мелких структур на крупные структуры. Это может быть учтено за счет вводится вязкость  $\mu_t$ :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t.$$

В случаях, если рассматривается неизвестный подсеточный тензор  $\tau_{ij}^{SGS}$  напряжений  $\tau_{ij}^{SGS}$ , требуется исходить из такого модельного уравнения [3]:

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3}\tau_{ij}^{SGS}\delta_{ij} \approx \tau_{ij}^{mod}\delta_{ij} = 2\mu_t\overline{S_{ij}}.$$

Осуществляется процесс расчета тензора скоростей деформации при помощи выражения:

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i}\right).$$

К настоящему времени разработано большое число моделей, позволяющих определять турбулентную вязкость  $\mu_t$ . Следует отметить модель для подсеточных напряжений, которую предложил Смагоринский [4]. Аналогично модели Прандтля моделирование турбулентной вязкости осуществляется следующим образом:

$$\mu_t = \ell^2 |\overline{S_{ij}}|.$$

Здесь  $|\overline{S_{ij}}| = \sqrt{\overline{S_{ij}S_{ij}}}$ , а  $\ell$  является масштабом турбулентности. С тем, чтобы определить масштаб турбулентности, применяют ширину фильтра при коэффициенте пропорциональности  $C_S$ :

$$\ell = C_S \Delta.$$

В приведенном выражении константа Смагоринского  $C_S$  – это коэффициент пропорциональности. Можно осуществлять ее калибровку. Диапазон ее варьирования при разных течениях находится между 0.01 и 0.24. Мы при расчетах применяли  $C_S = 0.1$ .

Для модели Смагоринского характерна простота и хорошая сходимость вследствие того, что она диссипативна.

Была создана подсистема в виде кроссплатформенной динамической библиотеки для моделирования турбулентных сред. Её можно использовать при разработке САПР, а также в научных целях. Для проверки корректности работы мо-

дели мы создали простейшую геометрию в среде – обтекание водой круглого препятствия.

После этого на основе геометрии создадим сетку с размером элементов 0.5.

На рисунках ниже представлены результаты моделирования турбулентного обтекания водой препятствия, при числе Рейнольдса равном 100.

Длина временного шага 0.05. Моделирование длилось 2000 временных шагов, с записью результата моделирования через каждые 10 шагов.

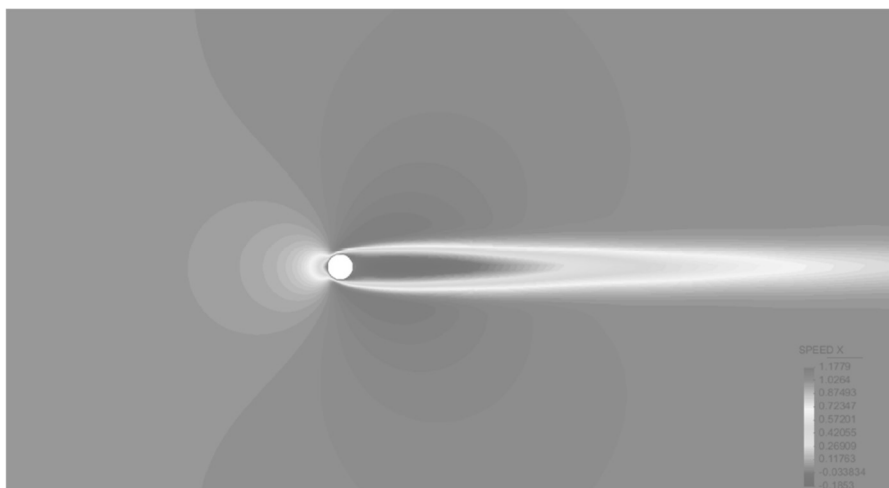


Рисунок 1 – Шаг 80

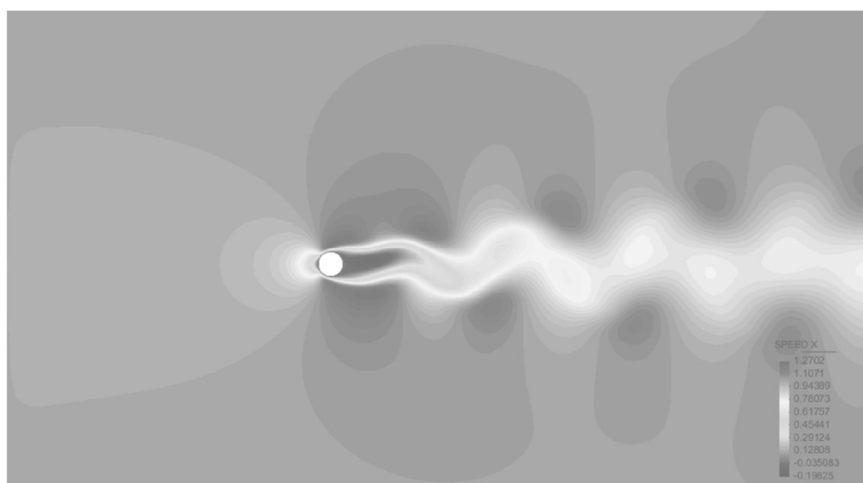


Рисунок 2 – Шаг 200

Рассмотренная модель была дополнена процедурой многоальтернативной оптимизации [5]. При многоальтернативной агрегации проводилось варьирование вариантов реализации рассматриваемой системы движения среды.

Применялся вектор альтернативных переменных, на основе которого происходила реализация процесса дихотомической редукции. Она заключалась в том, что ограничивалось разнообразие множеств параметров за счет того, что они последовательно делились на две части и происходил выбор одного из них как исходно для того, чтобы осуществлялось следующее деление.

Для того, чтобы автоматическим образом реализовать процедуру дихотомической редукции, требуется осуществить переход к эквивалентной задаче, связанной с многоальтернативным выбором по множеству случайных переменных. Они представляют собой независимые случайные дискретными числа.

Редукция различия множеств параметр будет выполнена в том случае, когда значения вероятностей возможных реализаций будут близки к значению 1. С этой целью требуется провести запись оптимизационной задачи при помощи альтернативных переменных и при поиске решений применять рандомизированную многоальтернативную оптимизацию.

Испытания программы при различных параметрах моделирования показали, что подсистема моделирования турбулентных сред успешно справляется со своей задачей – моделирует обтекание турбулентным потоком различные твёрдые тела.

#### *Литература*

1. *Yun A.* Development and Analysis of Advanced Explicit Algebraic Turbulence and Scalar Flux Models for Complex Engineering Configurations: диссертация на соискание степени доктора / A. Yun. – Darmstadt. – 2005.
2. *Menter F.R.* Methoden, Moeglichkeiten und Grezen numerischer Stroemungsberechnungen / F.R. Menter. – Erlangen: Numet, 2002.
3. *Wachter E.M.* Anwendung der Instationären Flamelet Methode auf Diffusions Flammen im Post-Processing-Modus / E.M. Wachter. – VDI Verlag. – 2005.
4. *Smagorinsky J.S.* General circulation experiments with the primitive equations. 1. The basis element. – Monthly Weather Review. – 1963. – Т. 91. – С. 99-164.
5. *Львович Я.Е.* Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения / Я.Е. Львович. – Воронеж: Кварта, 2006. – 415 с.

#### *References*

1. *Yun A.* Development and Analysis of Advanced Explicit Algebraic Turbulence and Scalar Flux Models for Complex Engineering Configurations: doctor thesis. – Darmstadt. – 2005.
2. *Menter F.R.* Methoden, Moeglichkeiten und Grezen numerischer Stroemungsberechnungen. – Erlangen: Numet, 2002.
3. *Wachter E.M.* Anwendung der Instationären Flamelet Methode auf Diffusions Flammen im Post-Processing-Modus. – VDI Verlag. – 2005.
4. *Smagorinsky J.S.* General circulation experiments with the primitive equations. 1. The basis element. – Monthly Weather Review. – 1963. – V. 91. – P. 99-164.
5. *Lvovich Ya. E.* Multi-Alternative optimization: theory and applications. – Voronezh: Kvarta, 2006. – 415 p.

УДК 004.94

### **ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ ОЗДОРОВИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА И РАСЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФЕРМЫ**

© **В. В. Некрасова**, студент, **В. Ю. Курохтин**, старший преподаватель  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*В данной работе построена трехмерная модель двухэтажного оздоровительного центра и произведен расчет металлической пространственной двояковыпуклой фермы.*

*Трехмерная модель оздоровительного центра построена в программном комплексе SketchUp. Расчет пространственной двояковыпуклой металлической фермы выполнен в программных комплексах SolidWorks 2018, ANSYS и SCAD++. Произведен анализ и сравнение полученных результатов расчета.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование зданий, SketchUp, пространственная ферма, прочностной расчет, SolidWorks, ANSYS, SCAD.

## CONSTRUCTION OF A 3D-MODEL OF A HEALTH CENTER AND CALCULATION OF A SPATIAL TRUSS

V. V. Nekrasova, student, V. Yu. Kurokhtin, senior lecturer  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*In this work, a three-dimensional model of a two-story health center was built and a metal spatial biconvex truss was calculated. The three-dimensional model of the health center is built in the SketchUp software package. The calculation of the spatial biconvex metal truss was performed in the SolidWorks 2018, ANSYS and SCAD ++ software systems. The analysis and comparison of the calculation results were carried out.*

**Keywords:** computer simulation of buildings, SketchUp, spatial truss, strength analysis, SolidWorks, ANSYS, SCAD.

Актуальность темы работы обоснована тем, что лечебно-оздоровительный туризм является важным фактором повышения качества жизни населения. Отсутствие на сегодняшний день обустроенных, комфортных мест для оздоровления отмечают как гости, так и жители Бурятии. Одним из путей решения данной проблемы является формирование рекреационных комплексов. Строительство современных оздоровительных центров необходимо для удовлетворения потребностей населения в поддержании здоровья и как следствие увеличение уровня средней продолжительности жизни. Целью работы является построение трехмерной модели оздоровительного центра в программном комплексе SketchUp [1].

Участок, отведенный для строительства оздоровительного центра, расположен на северной окраине с. Ильинка. Сейсмичность площадки 8 баллов. С западной, южной и восточной сторон в непосредственной близости от участка зданий и сооружений нет. К северу от участка протекает река Селенга. На земельном участке площадью 5444,0 м<sup>2</sup> размещены лечебный корпус, открытый бассейн, баня, кафе общего доступа, а также административно-приемный корпус с открытым бассейном. Административно-приемный корпус с открытым бассейном выделены в первый этап строительства. Проектируемые объекты располагаются в северо-восточной части участка. Площадь земельного участка в границах благоустройства 1-го этапа строительства 2012,2 м<sup>2</sup>. Кадастровый номер участка 03:16:120111:45.

Административно-приемный корпус имеет не простую форму в плане здание двухэтажное без подвала. Основная конструктивная схема – здание с монолитным железобетонным связевым каркасом, с нормируемыми и контролируемые показателями качества бетона: класс по прочности на сжатие  $B$  и марка по морозостойкости  $F$ . Другие нормируемые показатели качества бетона (класс по прочности на осевое растяжение  $Bt$ , марка по водонепроницаемости  $W$ ) не кон-

тролируются. Планы этажей, выполненные в программном комплексе SketchUp, представлены на рисунках 1 и 2.

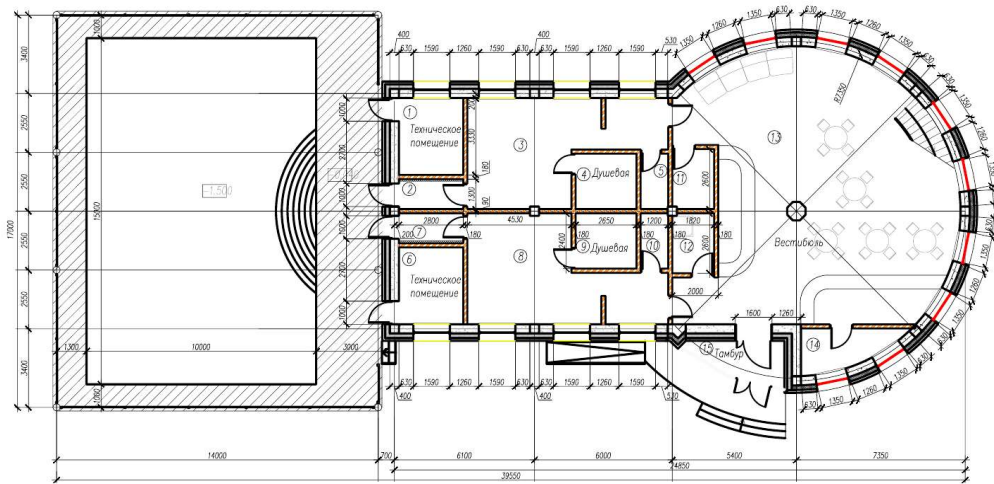


Рисунок 1 – План первого этажа

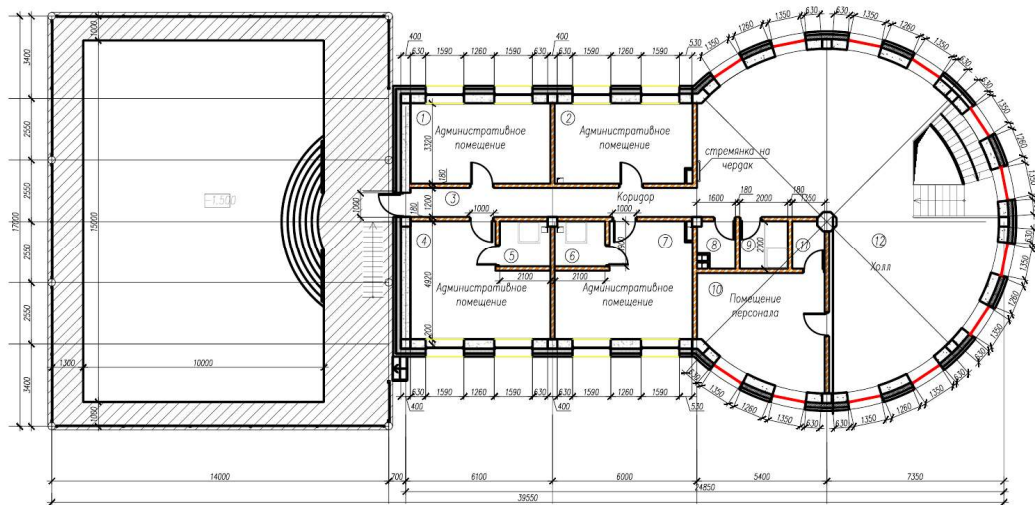
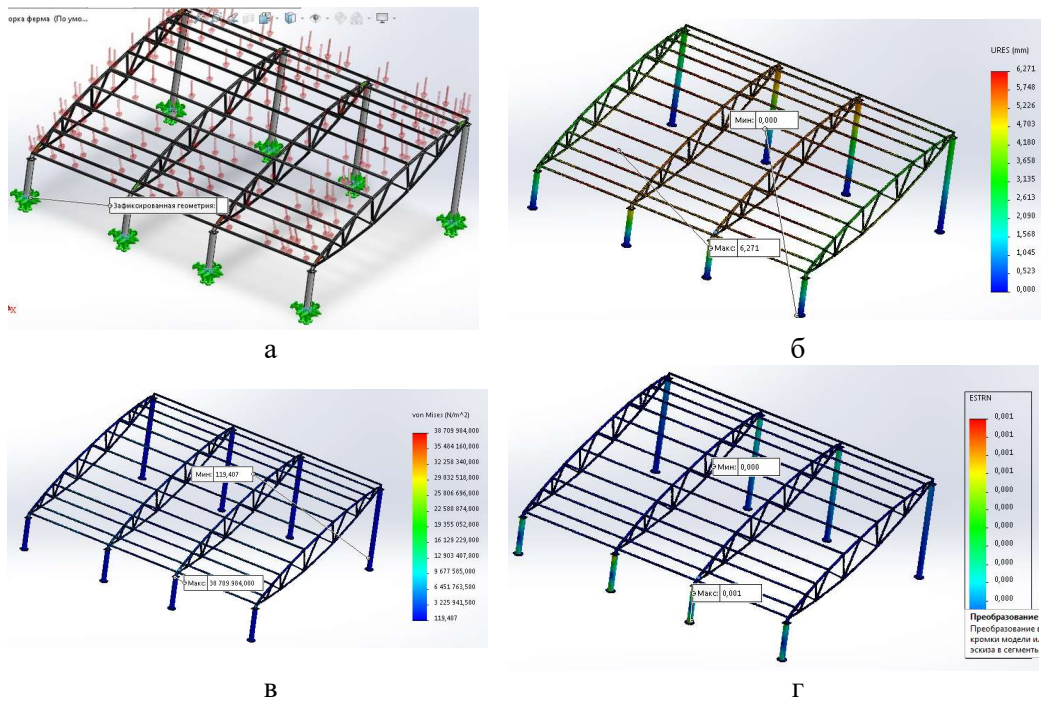


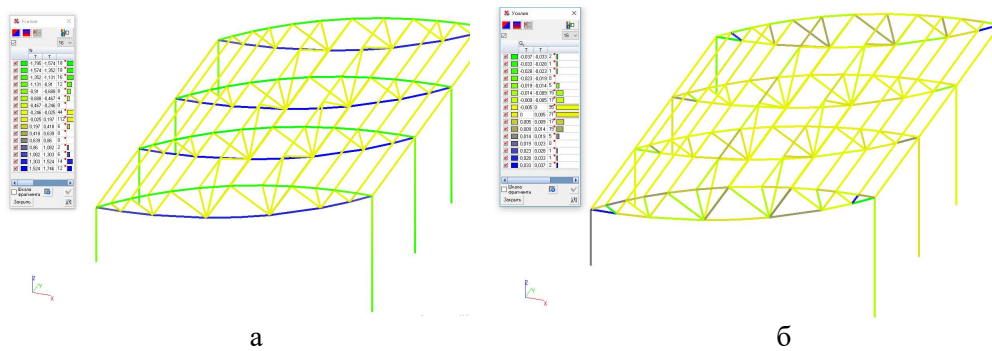
Рисунок 2 – План второго этажа

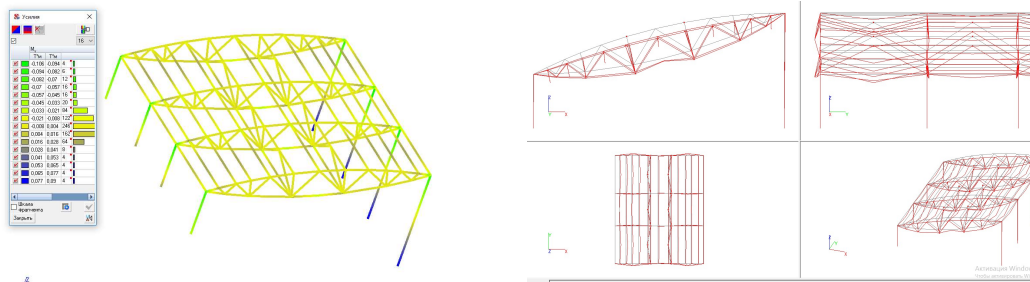
Кроме того, был произведен расчет пространственной двояковыпуклой металлической фермы в программном комплексе SolidWorks [2]. Разработанная трехмерная модель фермы с приложенными нагрузками и связями, а также результаты расчета представлены на рисунке 3.



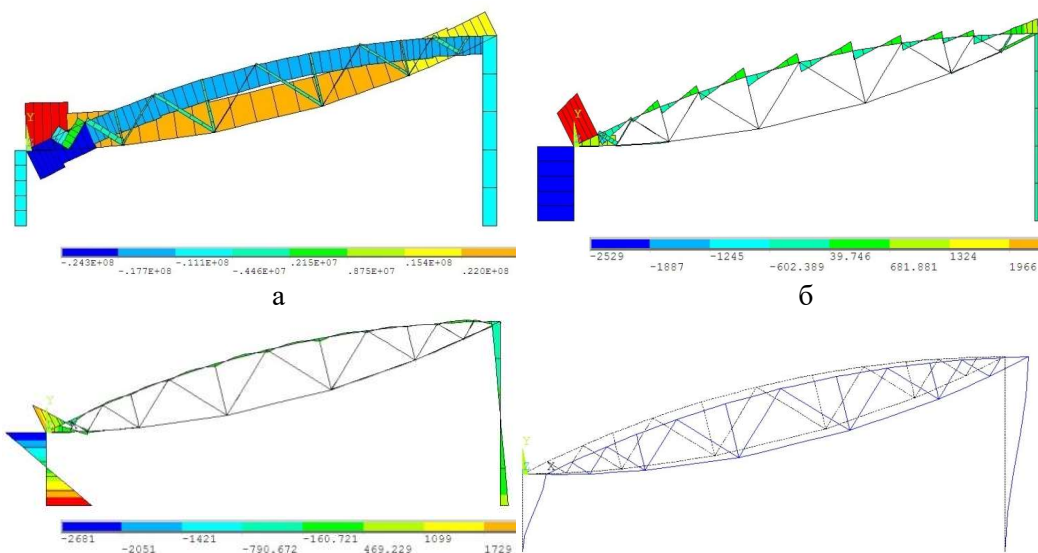
а – нагруженная и закрепленная модель фермы, б – распределение перемещений, в – распределение напряжений, г – распределение деформаций  
Рисунок 3

Для сравнения были проведены расчеты в программных комплексах SCAD [3] и ANSYS [4, 5]. Результаты расчета в SCAD представлены на рисунке 4, а в ANSYS – на рисунке 5.





а – распределение продольных усилий в элементах фермы, б – распределение поперечных усилий в элементах фермы, в – распределение изгибающих моментов в элементах фермы, г – деформированное состояние фермы  
Рисунок 4



а – эпюра продольных напряжений, б – эпюра поперечных сил, в – эпюра изгибающих моментов, г – деформированное состояние  
Рисунок 5

В результате выполнения работы была построена трехмерная модель оздоровительного центра в с. Ильинка Прибайкальского района Республики Бурятия с использованием программного комплекса SketchUp. Изучены и приняты оптимальные объемно-планировочные решение здания с учетом функциональной структуры, природно-климатических и региональных особенностей строительства. Кроме того, был выполнен расчет пространственной фермы в программных комплексах с получением результатов расчета, представленных в виде графических рисунков – эпюр.

#### Литература

1. Петелин А. SketchUp. Базовый учебный курс / А. Петелин. – Москва: Издательские решения, 2015. — 190 с.



2. *Сотников Н.Н.* Основы моделирования в SolidWorks / Н.Н. Сотников, Д.М. Козарь. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 129 с.
3. *Константинов И.А.* Строительная механика. Часть 1. Расчет статически определимых стержневых систем с использованием программы SCAD / И.А. Константинов, В.В. Лалин, И.И. Лалина. – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2008. – 206 с.
4. *Жидков А.В.* Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А.В. Жидков. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 115 с.
5. *Бохоева Л. А.* Исследование роста трещин в изделиях авиационной техники на основе натурных испытаний / Л.А. Бохоева, В.Ю. Курохтин, Е.А. Жерлова // Механика конструкций и материалов : сборник научных трудов по материалам 55-й научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГУТУ (19-21 апреля 2016 г., г. Улан-Удэ). Выпуск 1. – Улан-Удэ: Издательство ВСГУТУ, 2016. – С. 57-69.

#### References

1. *Petelin A.* SketchUp. Bazovyi uchebnyi kurs. – Moscow: Izdatelskie resheniya, 2015. – 190 p.
2. *Sotnikov N.N., Kozar D.M.* Osnovy modelirovaniya v SolidWorks. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Press, 2013. – 129 p.
3. *Konstantinov I.A., Lalin V.V., Lalina I.I.* Stroitel'naya mekhanika. Chast 1. Raschyot staticheski opredelimykh stержnevyykh system s ispolzovaniem programmy SCAD. – Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Polytechnic University Press, 2008. – 206 p.
4. *Zhidkov A.V.* Primemenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach geometricheskogo i konechno-elementnogo modelirovaniya. – Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Press, 2006. – 115 p.
5. *Bokhoeva L.A., Kurokhtin V.Yu., Zherlova E.A.* // Mekhanika konstruktсии i materialov: proceedings of 55<sup>th</sup> scientific-practical conference of ESSUTM teachers, researchers and graduate students (April 19-21, 2016, Ulan-Ude). Issue 1. – Ulan-Ude: ESSUTM Press, 2016. – P. 57-69.

УДК 621

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ КОНИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ANSYS LS-DYNA

© **Е. С. Нестеренко<sup>1</sup>, Е. А. Левченко<sup>2</sup>**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет)  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: <sup>1</sup>nesterenko77@mail.ru, <sup>2</sup>zhe9744@yandex.ru

*В статье представлено исследование вытяжки конического сепаратора штампе на кривошипном прессе. Рассмотрен характер пластической деформации материала заготовки при вытяжке и произведен анализ напряженно-деформированного состояния. Конический сепаратор в машиностроительном производстве относится к деталям высокой точности. Большое изменение толщины и высокая разнотолщинность по длине образующей является недопустимой при изготовлении конического сепаратора. Применение операции калибровки одновременно с операцией вытяжки позволит устранить высокую разнотолщинность. Снизит разнотолщинность с 25% без операции калибровки*

до 5% с операцией калибровки. В работе представлены результаты моделирования процессов вытяжка с калибровкой и вытяжка без калибровки. Произведен анализ изменения толщины сепаратора по длине образующей. Даны рекомендации по определению усилия калибровки.

**Ключевые слова:** вытяжка, моделирование, программный продукт ANSYS/LS-DYNA, конечный элемент, напряжения, деформации, разнотолщинность, усилие, калибровка.

## SEPARATOR'S DRAWING SIMULATION WITH THE USE OF ANSYS LS-DYNA

**E. S. Nesterenko<sup>1</sup>, E. A. Levchenko<sup>2</sup>**

Samara National Research University

34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia

E-mail: <sup>1</sup>nesterenko77@mail.ru, <sup>2</sup>zhe9744@yandex.ru

*This article presents an investigation of conical separator drawing in stamp by the crank press. Plastic deformation nature of workpiece material during extraction is described and stress-strain deformation state is analyzed. Conical separator in machine-building production refer to the details of high precision. A large variance in thickness and a high thickness difference by the length of the generating line is unacceptable in the manufacturing of a conical separator. The application of calibration operation at the same time as the extraction operation allow eliminate the high thickness. That can reduce the thickness variance from 25% without calibration operation to 5% with it. Results of extraction processes modeling with and without calibration are presented in that article. The analysis of changes in separator thickness along the generator line are demonstrated. Recommendations how to determine the calibration force are given.*

**Keywords:** drawing, modeling, ANSYS/LS-DYNA software product, finite element, stresses, deformations, thickness variation, force, calibration.

В силу геометрии и особенностей конструкции конические роликовые подшипники обладают некоторыми важными и единственными в своем роде эксплуатационными характеристиками, позволяющими использовать их в самых различных областях [1].

Конических роликовый подшипник включает четыре основных элемента, а именно: внутреннее кольцо, наружное кольцо, конические ролики и сепаратор (держатель роликов). При нормальных условиях эксплуатации нагрузку несут внутреннее и наружное кольца и ролики, а сепаратор служит для разделения роликов (рисунок 1) [2].

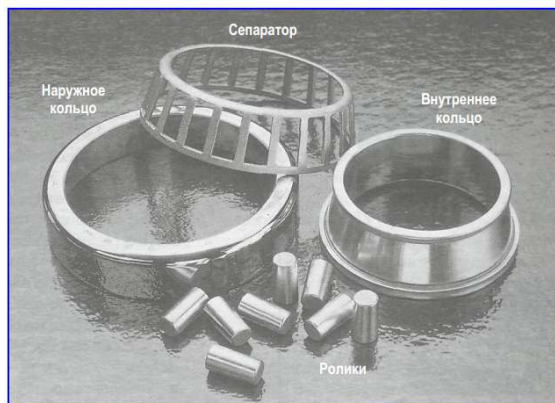


Рисунок 1 – Составные части однорядного конического роликового подшипника

Для изготовления конического сепаратора используют методы холодной листовой штамповки [3]. Это позволяет достичь значительного качества в создании деталей, параметры которых отвечают требованию проектного решения. Технически рабочий процесс осуществляется с использованием матрицы, пуансона, раздвижных секторов и вспомогательной оснастки, посредством которой осуществляется воздействие на заготовку [4]. Модель вытяжного штампа данного типа приведена на рисунке 2.

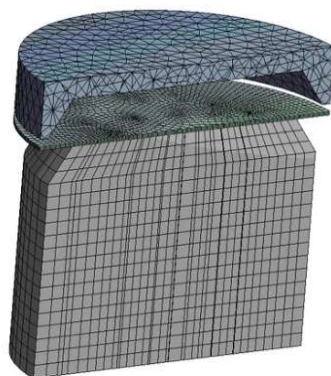


Рисунок 2 – Модель вытяжного штампа

Для моделирования процесса был выбран программный комплекс ANSYS/LS-DYNA. Обработке давлением подвергалась модель листовой заготовки, имеющая физико-механические свойства бронзы БрАЖ9-4-4. Контактное взаимодействие моделей формообразующих заготовок инструментов и листовой заготовки с учетом коэффициента трения 0,12. Физико-механические свойства матрицы и пуансона заданы свойством стали Х12МФ [5]. Начальная толщина заготовки 6мм, диаметр заготовки 530 мм.

Проведем процесс моделирования без операции калибровки. Результаты интенсивности напряжений представлены на рисунке 3.

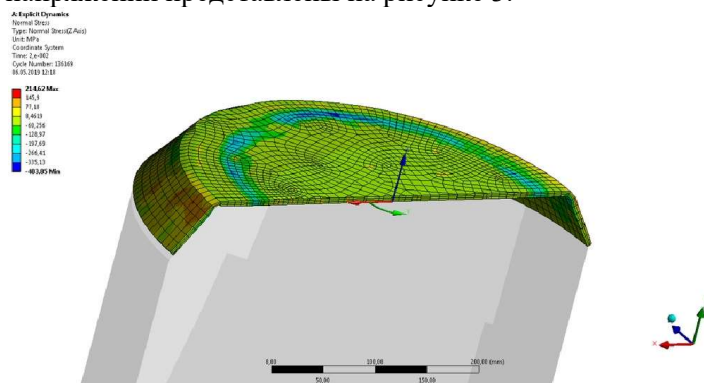


Рисунок 3 – Значение интенсивности напряжений

$$(\sigma_{min} = -214,62 \text{ МПа}, \sigma_{max} = 403,85 \text{ МПа})$$

Из рисунка 3 следует, что процесс вытяжки проходит без разрушения и напряжения не превышают предел прочности материала заготовки.

Результаты изменения толщины по образующей показаны на рисунке 4.

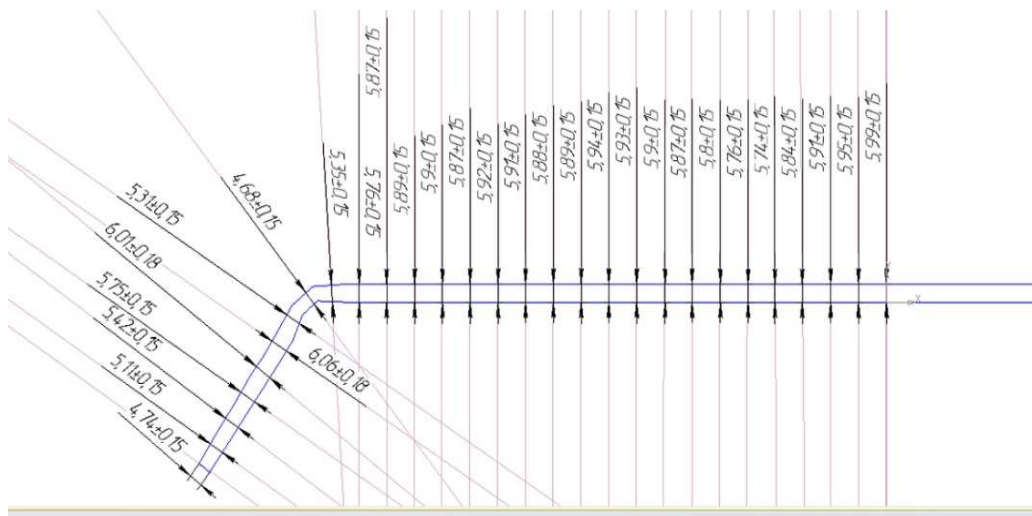


Рисунок 4 – Значения толщины детали при вытяжке ( $S_0=6$  мм,  $D_{заг}=530$  мм)

На рисунке 4 видно равномерное утонение заготовки и отсутствие гофров. Максимальная толщина составляет 6,01 мм, а минимальная 4,68 мм в месте скругления.

Разнотолщинность детали  $\Delta S = S_{max} - S_{min} = 6,01 - 4,68 = 1,33$  мм, что составляет 22%.

Теперь проведем процесс моделирования с учетом усилия калибровки. Усилия калибровки определим так:  $P_{кал} = qF$ , где  $F$  – площадь поверхности детали, мм<sup>2</sup>;  $q$  – погонная нагрузка, МПа.

Рассмотрим характер распространения интенсивности напряжений (рисунок 5).

Из рисунка 5 также следует, что процесс вытяжки с калибровкой проходит без разрушения и напряжения не превышают предел прочности материала заготовки.

На рисунке 6 предоставлена разнотолщинность детали в ходе моделирования процесса вытяжки с калибровкой.

На рисунке 6 видно равномерное распределение толщины заготовки и отсутствие гофров. Максимальная толщина составляет 6,06 мм, а минимальная 5,75 мм в месте фланца.

Разнотолщинность детали  $\Delta S = S_{max} - S_{min} = 6,06 - 5,75 = 0,31$  мм, что составляет 5,1%.

Таким образом, разнотолщинность конического сепаратора при вытяжке с калибровкой соответствует заданному параметру толщины согласно требованиям, к точности изготовления детали.

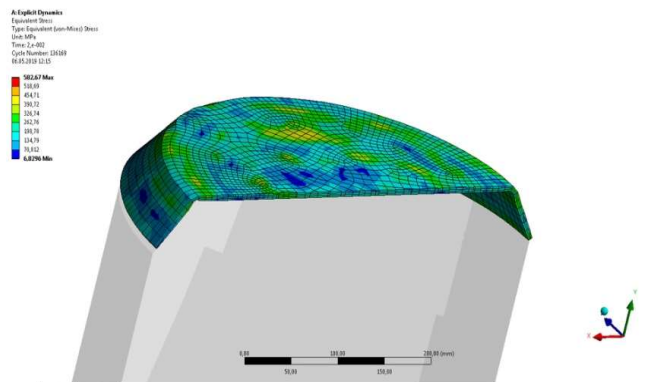


Рисунок 5 – Значение интенсивности напряжений при вытяжке ( $\sigma_{min} = 6.9$

МПа,  $\sigma_{max} = 582.67$  МПа)

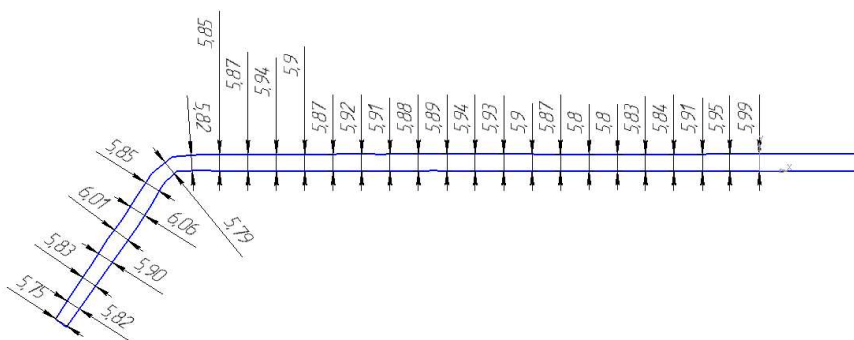


Рисунок 6 – Значения толщины детали при вытяжке с калибровкой ( $S_0 = 6$  мм,  $D_{зад} = 530$  мм)

#### Литература

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки: учебное пособие для вузов / Е.А. Попов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Ленинград: Машиностроение, 1979. – 520 с.
3. Маслов В. Д. Моделирование процессов листовой штамповки в программном комплексе ANSYS LS-DYNA / В.Д. Маслов. – Самара: Издательство СГАУ, 2007. – 80 с.
4. Нестеренко Е.С. Применение ИТ-технологий в решении задач по обработке металлов давлением с использованием системы ANSYS LS-DYNA / Е.С. Нестеренко, А.С. Головачев, А.Н. Алеева // Вестник Международного института рынка. – 2018. – № 2. – С. 130-136.
5. Попов И.П. Моделирование операции двухугловой гибки в штампе с упругим элементом / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, А.О. Кузин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 25-30.

#### References

1. Popov E.A. Osnovy teorii listovoi shtampovki: uchebnoe posobie dlya vuzov. – Moscow: Mashinostroenie, 1977, – 278 p.
2. Romanovskii V.P. Spravochnik po kholodnoi shtampovke. – Leningrad: Mashinostroenie, 1979. – 520 p.

3. Maslov V.D. Modelirovanie protsessov listovoi shtampovki v programmnom komplekse ANSYS LS-DYNA. – Samara: SSAU Press, 2007. – 80 p.

4. Nesterenko E.S., Golovachev A.S., Aleeva A.N. // Vestnik mezhdunarodnogo instituta rynka. – 2018. – No. 2. – P. 130-136.

5. Popov I.P., Nesterenko E.S., Kuzin A.O. // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – V. 18. – No. 4. – P. 25-30.

УДК 004.94

### **3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ЛАБОРАТОРИИ “НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ”**

© **Д. В. Оноева**, студент, **В. Ю. Курохтин**, старший преподаватель  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*Целью данной работы является создание 3D-модели испытательного стенда для испытаний подредукторной рамы вертолета. Согласно статистике, подредукторная рама часто разрушается во время эксплуатации из-за значительных нагрузок. Для обеспечения ее безопасной эксплуатации следует проводить усталостные испытания на специально разработанном стенде, который имитирует в лабораторных условиях реальные условия эксплуатации рамы. Одним из первых этапов разработки стенда является создание его 3D-модели на компьютере. Для моделирования испытательного стенда был использован программный комплекс SolidWorks.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, вертолет, подредукторная рама, испытательный стенд, SolidWorks.

### **3D-MODELING OF THE TEST BENCH FOR THE LABORATORY “RELIABILITY, STRENGTH OF PRODUCTS AND STRUCTURES”**

**D. V. Onoeva**, student, **V. Yu. Kurokhtin**, senior lecturer  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., +7(3012)431415  
E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*The aim of this work is to create a 3D model of a test bench for testing the helicopter's sub-gear frame. According to statistics, the sub-gear frame is often destroyed during operation due to significant loads. To ensure its safe operation, fatigue tests should be carried out on a specially designed bench that imitates, under laboratory conditions, the actual operating conditions of the frame. One of the first stages of the bench development is the creation of its 3D model on a computer. SolidWorks software package was used to simulate a test bench.*

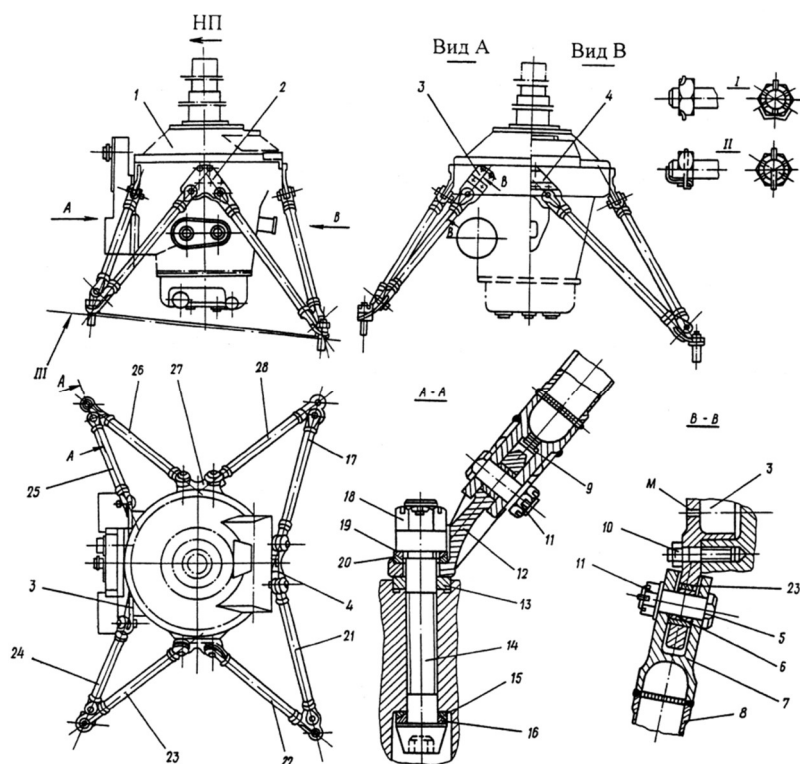
**Keywords:** computer simulation, helicopter, sub-gear frame, test bench, SolidWorks.

Ресурсные испытания узлов и деталей авиационной техники обширно используются в наше время для обеспечения безопасной эксплуатации летательных аппаратов. Разновидностью ресурсных испытаний являются усталостные испытания, в процессе которых производится циклическое нагружение авиационного устройства заданной программой, которая моделируется по условиям усталости внешних переменных нагрузок в реальных условиях эксплуатации [1]. В процессе усталостных испытаний по данным тензометрии, измерений нагрузок

и напряжений устанавливают эквивалентность нагружения модели в стендовых условиях по отношению к условиям эксплуатации.

Одним из узлов вертолета, испытывающим в процессе эксплуатации существенные нагрузки, является подредукторная рама главного редуктора трансмиссии вертолета. Для обеспечения ее безопасной эксплуатации следует проводить усталостные испытания на специально разработанном стенде, который имитирует в лабораторных условиях реальные условия эксплуатации рамы. Одним из первых этапов разработки стенда является создание его 3D-модели на компьютере.

Подредукторная рама необходима для крепления главного редуктора на вертолете, она воспринимает статические и переменные динамические нагрузки, которые возникают в полете. Рама состоит из восьми подкосов. Они соединены в четыре V-образные вилки, каждая из которых образуется из основного и прицепного подкосов. Подкосы изготовлены из двух узлов и трубы 50×45 мм. Трубы с узлами плотно соединены при помощи сварки. После сварки трубы с узлами термически обрабатывают. Основной подкос с одной стороны заканчивается узлом-пяткой, с другой — вилкой. Узел-пятка имеет дополнительное ухо для крепления к нему прицепного подкоса. Все восемь подкосов вилками крепятся к редуктору через узлы, которые имеют шаровые подшипники [2]. Общий вид подредукторной рамы представлен на рисунке 1.



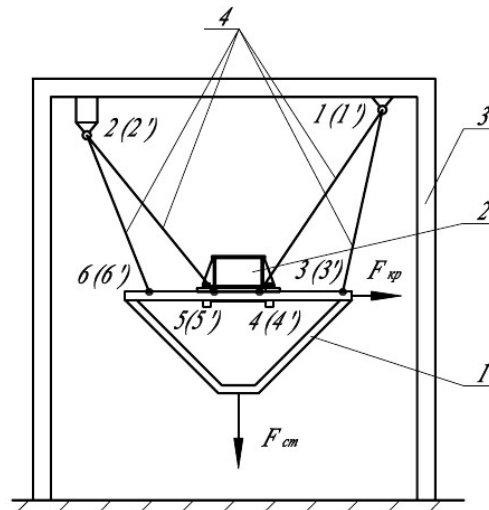
1 – главный редуктор; 2, 4, 27 – спаренные лапы; 3 – одинарные лапы; 5, 14 – болты; 7, 10 – шпангоуты; 9 – стальные пробки; 11, 14, 18 – гайки; 12 – узел-лапа; 15, 16, 19, 20 – сферические шайбы; 23, 26 – передние основные подкосы; 22, 28 – задние основные подкосы; 29 – фторопластовые прокладки

Рисунок 1 – Подредукторная рама вертолета типа Ми-8

На подредукторную раму действуют следующие основные силы и моменты:

- сила веса и инерционные силы, возникающие при маневрах, посадке;
- реактивный момент вращения лопастей;
- реактивный момент от двигателей;
- гироскопические моменты при вращении вертолета относительно пространственных осей.

Принципиальная схема стенда для испытания подредукторной рамы представлена на рисунке 2.



1 – упрощенная модель редуктора, 2 – вибратор, 3 – рама стенда, 4 – подкосы

Рисунок 2 – Принципиальная схема испытательного стенда

Для испытания подредукторной рамы на вибрационные нагрузки вместо макета главного редуктора вертолета используется упрощенная модель 1, которая представляет собой окружность из сваренных труб с узлами крепления основных подкосов, аналогичными используемым на вертолете. Упрощенная модель сверху армирована и имеет площадку под крепление вибратора 2. С другой стороны (снизу) имеет форму усеченной пирамиды, где крепится силовобуздитель и узлы натяжения. Схема расположения подредукторной рамы в стенде отличается от действительной поворотом на  $180^\circ$  относительно оси  $z$ , т.е. является перевернутой. Такая схема выбрана из-за экономии пространства в помещении лаборатории и более рационального подхода в способе задания статической нагрузки  $F_{см}$ , которая имитирует подъемную силу вертолета.

Помимо задания статической нагрузки  $F_{см}$ , до запуска вибратора задается дополнительная нагрузка –  $F_{кр}$ , имитирующая реактивный момент вращения лопастей. Дополнительная нагрузка  $F_{кр}$  задается при помощи тандеров, закрепленных на колоннах рамы испытательного стенда.

В программе SolidWorks главный редуктор заменяем упрощенной моделью редуктора. Данную модель создаем как единую деталь. Она состоит из двух площадок, на одной из которых в дальнейшем устанавливается вибратор, пяти горизонтальных и четырех вертикальных труб (рисунок 3).



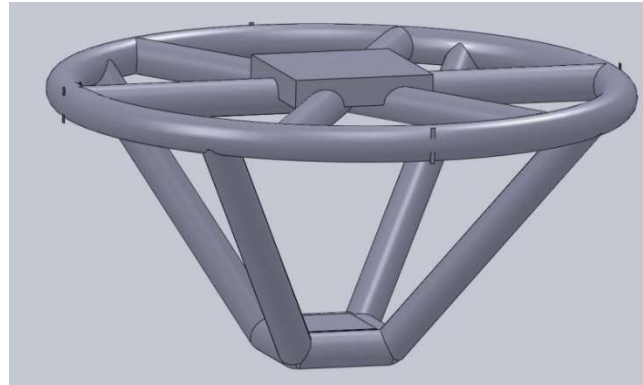


Рисунок 3 – Упрощенная модель редуктора

Рама состоит из подкосов, которые образуют V-образные вилки, всего их восемь штук. Подкосы делятся на основные (рисунок 4) и прицепные (рисунок 5).

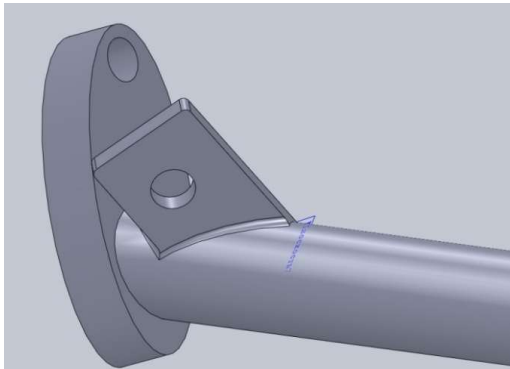


Рисунок 4 – Основной подкос

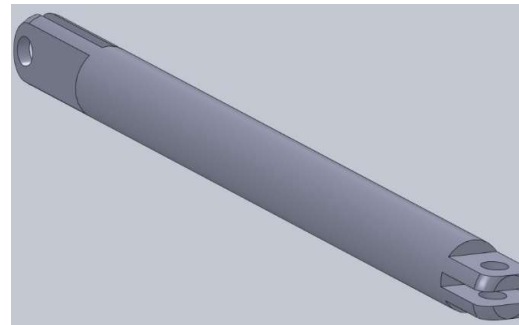


Рисунок 5 – Прицепной подкос

Основной подкос с одной стороны заканчивается вилкой, с другой – узлом-пяткой. На узле-пятке есть дополнительное ухо, чтобы прикрепить к нему прицепной подкос. Основной подкос моделируется как одна деталь. Узел-пятка создается на дополнительной плоскости. Аналогичным способом моделируем прицепной подкос, только вместо узла-пятки будет вилка, повернутая на 90 градусов. Подкосы соединяются между собой с помощью болтов, изготовленных согласно ГОСТу 7798-70 [3] и гаек, изготовленных согласно ГОСТу 5915-70 [4]. Рама стэнда состоит из четырех швеллеров и четырех вертикальных двутавров, изготовленных по ГОСТу 8240-97 [5] и ГОСТу 8239-89 [6] соответственно. Общий вид созданной в SolidWorks сборки испытательного стэнда представлен на рисунке 6.

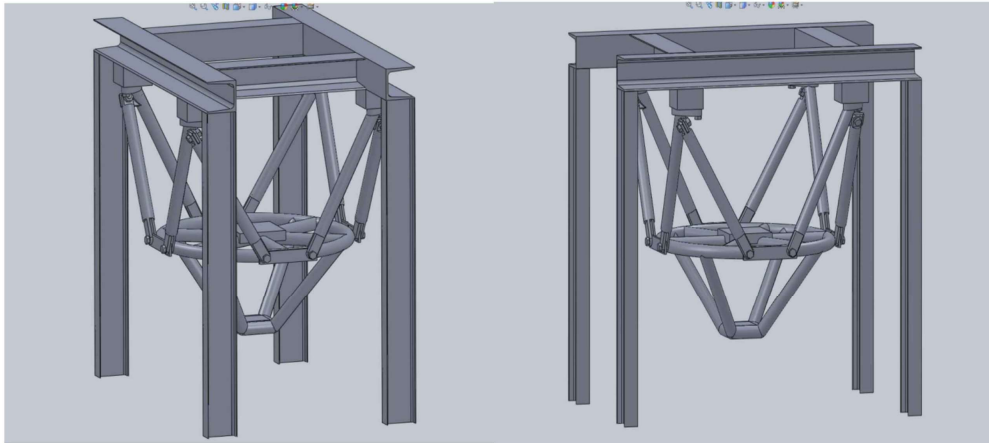


Рисунок 6

Созданная модель может быть использована для последующего изготовления испытательного стенда с использованием станков с числовым программным управлением.

#### *Литература*

1. Курохтин В. Ю. Определение усталостных прочностных характеристик авиационных изделий на основе ресурсных испытаний / В. Ю. Курохтин // Механика XXI века: научное периодическое издание по материалам XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (13–14 мая 2015 г., г. Братск). – Братск: Издательство БрГУ, 2015. – С. 22-28.
2. ГОСТ 3635-78. Подшипники шарнирные. Технические условия. – Москва: Издательство стандартов, 1991. – 27 с. – Введен 01.07.1979.
3. ГОСТ 7798-70. Болты с шестигранной головкой класса точности В. Конструкция и размеры. – Москва: Стандартиформ, 2010. – 12 с. – Введен 01.01.1972.
4. ГОСТ 5915-70. Гайки шестигранные класса точности В. Конструкция и размеры. – Москва: Стандартиформ, 2010. – 5 с. – Введен 01.01.1972.
5. ГОСТ 8240-97. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 10 с. – Введен 01.01.2002.
6. ГОСТ 8239-89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент. – Москва: Издательство стандартов, 1989. – 7 с. – Введен 01.07.1990.

#### *References*

1. Kurokhtin V.Yu. // Mechanical engineers to XXI century: proceedings of XIV All-Russian scientific and technical conference with international participation (May 13-14, 2015, Bratsk). – Bratsk: Bratsk state university press, 2015. – P. 22-28.
2. GOST 3635-78. Spherical plain bearings. Specifications. – Moscow: Izdatelstvo standartov, 1991. – 27 p. – Introduced 01.07.1979.
3. GOST 7798-70. Hexagon bolts, product grade B. Construction and dimensions. – Moscow: Standartinform, 2010. – 12 p. – Introduced 01.01.1972.
4. GOST 5915-70. Hexagon nuts, product grade B. Construction and dimensions. – Moscow: Standartinform, 2010. – 5 p. – Introduced 01.01.1972.
5. GOST 8240-97. Hot-rolled steel channels. Assortment. – Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 2001. – 10 p. – Introduced 01.01.2002.
6. GOST 8239-89. Hot-rolled steel flange beams. Rolling products. – Moscow: Izdatelstvo standartov, 1989. – 7 p. – Introduced 01.07.1990.

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ОКОННОГО ОТКОСА

© Т. В. Степанова, магистр, О. Б. Аюрова, доцент  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в, +7(3012)431415  
E-mail: tuyana\_stepanova@mail.ru

*Опираясь на проведенный анализ научно-технической и нормативной литературы, произведена разработка автоматизированной системы для расчета температурного поля оконного откоса для решения проблем, связанных с выпадением конденсата на стеклопакетах оконных блоков, а также на узлах примыкания оконного блока к стеновым проемам. Проведен сравнительный анализ данных, полученных с помощью разработанной автоматизированной системы и результатов тепловизионного обследования многоквартирного жилого дома в г. Улан-Удэ для определения оптимального положения оконного блока относительно эффективного утеплителя в наружной ограждающей конструкции для предотвращения выпадения конденсата на стеклопакетах оконного блока, а также на узлах примыкания оконного блока к стеновым проемам. Выполнена проверка корректности разработанной автоматизированной системы для расчета температурного поля оконного откоса с расчетом, проведенным в программном комплексе ANSYS. Согласно полученным результатам исследования температурных полей оконного откоса найдено решение поставленной проблемы.*

**Ключевые слова:** температурное поле, оконный откос, автоматизированная система, точка росы, конденсат.

## THE DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING THE TEMPERATURE FIELD OF A WINDOW SLOPE

T.V. Stepanova, master, O.B. Ayurova, associate professor  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Kluchevskaya St., 40v, +7(3012)431415  
E-mail: tuyana\_stepanova@mail.ru

*Based on the analysis of scientific, technical and regulatory literature, the development of an automated system for calculating the temperature field of the window slope to solve problems associated with the loss of condensate on the windows. A comparative analysis of the data obtained with the help of the developed automated system and the results of thermal imaging survey of an apartment building in Ulan-Ude city to determine the optimal position of the window unit relative to the effective insulation in the outer envelope to prevent condensation on the windows. The validation of the developed automated system for calculating the temperature field of the window slope with the calculation carried out in the ANSYS software package was performed. According to the obtained results of the study of the temperature fields of the window slope, a solution to the problem was found.*

**Keywords:** temperature field, window slope, automated system, dew point, condensate.

Помимо изучения литературы по температурным полям оконных блоков, изучены исследования отечественных и зарубежных авторов конструкций заполненных световых проёмов зданий. В первую очередь, следует отметить исследование К.Ф. Фокина [1], который определял теплозащитные свойства двойного остекления, теплопередачи оконных проемов и откосов зданий.

Для определения места установки оконного блока был изучен ГОСТ [2]. В соответствии с проектно-конструкторским решением выбирают место установки оконного блока по глубине стенового проема. При замене оконных блоков в эксплуатируемых помещениях или при отсутствии проектного решения коробку оконного блока в однослойной ограждающей конструкции рекомендуется устанавливать на расстоянии не более  $2/3$  ее толщины от внутренней поверхности стены, а в слоистых стенах с эффективным утеплением размещать в зоне утеплительного слоя [2].

В [3] указаны теплотехнические и конструктивные особенности установки окон в проемах наружных стен зданий, учитывая нормативные теплотехнические требования, даны более полные рекомендации по технологии монтажа окон в наружных стенах в Московской области, следовательно данные рекомендации могут не подойти для нашего климатического региона.

В качестве исходных данных для проведения исследования температурных полей оконных откосов был выбран жилой многоквартирный дом в г. Улан-Удэ по ул. Профсоюзная, 44, конструкция наружной стены которого представлена на рисунке 1.

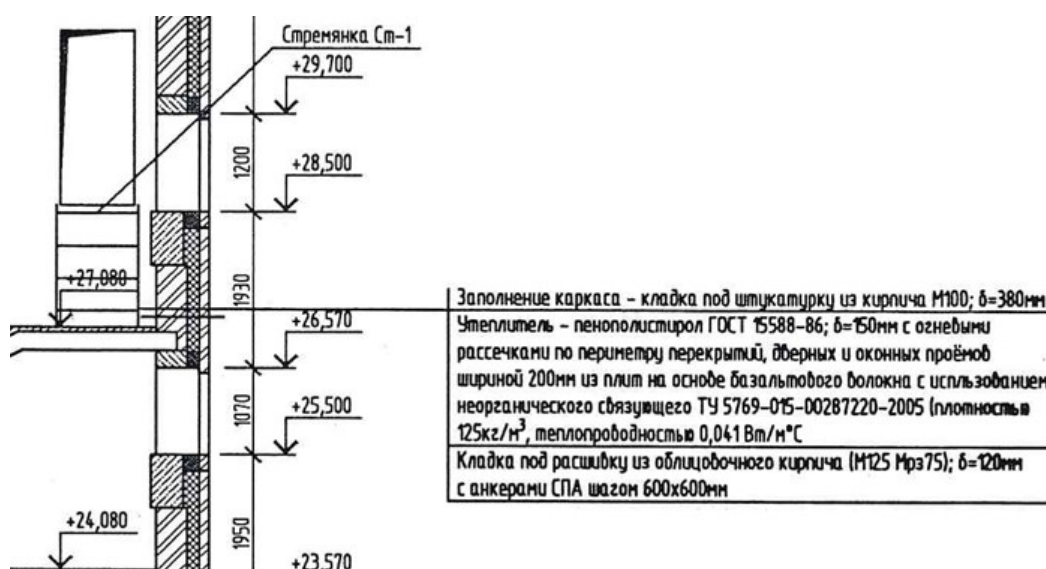


Рисунок 1 – Конструкция стены

Тепловизионное обследование здания было проведено в холодный период года при температуре наружного воздуха  $-5^{\circ}\text{C}$  тепловизором Testo 875-2.

Нами был произведен расчет двумя автоматизированными системами: Delphi и ANSYS. Автоматизированная система создана в Delphi (AC Delphi), которая является императивным структурированным объектно-ориентированным языком программирования со строгой статической типизацией переменных. Основной областью использования является написание прикладного программного обеспечения.

Приложение должно решать такие задачи, как разбиение исследуемого участка на узлы; нахождение сопротивления теплопередачи согласно введенным исходным данным; расчет температур на узлах; вывод результатов.

Необходимо ввести исходные данные:  $t_n$ ,  $t_в$ ,  $\alpha_в$  стены,  $\alpha_в$  окна,  $\alpha_n$ . Выбрать расположение окна относительно наружной стены. Также выбрать состав стены и толщину каждого слоя.

Вводятся исходные данные (пример представлен на рисунке 2):  $t_n = -37\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_в = 18\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{в\text{стены}} = 8,7\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ,  $\alpha_{в\text{окна}} = 6,2\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ,  $\alpha_n = 23\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ .

Рассматриваются два варианта расположения оконного блока: 1) после слоя утеплителя; 2) в слое утеплителя.

Состав стены: кирпич М100,  $b=0,38\text{ м}$ , пенополистирол,  $b=0,15\text{ м}$ , облицовочный кирпич М125,  $b=0,12\text{ м}$ .

Рисунок 2 – Ввод исходных данных

Расчет производится с помощью метода конечных элементов.

Общая формула для вычисления температуры во всех узлах сетки [1]:

$$\tau_{x,y} = \frac{k_{x-\Delta} \tau_{x-\Delta,y} + k_{y+\Delta} \tau_{x,y+\Delta} + k_{x+\Delta} \tau_{x+\Delta,y} + k_{y-\Delta} \tau_{x,y-\Delta}}{k_{x-\Delta} + k_{y+\Delta} + k_{x+\Delta} + k_{y-\Delta}},$$

где  $\tau_{x,y}, \tau_{x-\Delta,y}, \tau_{x,y+\Delta}, \tau_{x+\Delta,y}, \tau_{x,y-\Delta}$  – узлы с температурой;

$k_{x-\Delta}, k_{y+\Delta}, k_{x+\Delta}, k_{y-\Delta}$  – коэффициенты теплопроводности.

После расчета результаты выводятся в виде температурной сетки, представленной на рисунках 3-4.

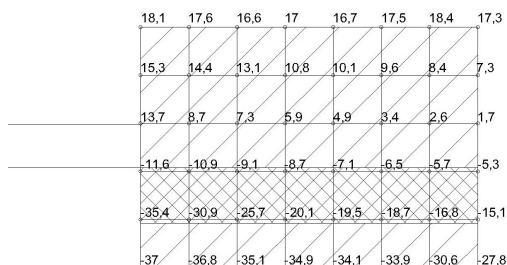


Рисунок 3 – вывод результатов варианта № 1 в графическом виде

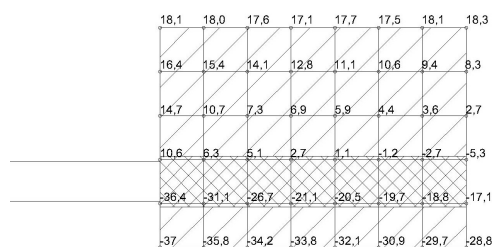


Рисунок 4 – вывод результатов варианта № 2 в графическом виде

Геометрия узлов для расчета в ANSYS была построена в AutoCAD 2015, затем путем экспорта через формат IGES перенесена в среду ANSYS.

В результате расчета температурных полей было установлено изменение температуры на внутренней поверхности откоса и количество теплоты, теряемое через него. Результаты представлены на рисунках 5-6.

При расчетных условиях минимальная температура в углу примыкания оконной коробки к откосу  $t_{min}$  составила: 1) 13,7 °С; 2) 10,6 °С.

Зона выпадения конденсата на внутренней поверхности откоса варианта № 1 отсутствует, так как температура точки росы  $t_d = 11,62$  °С, тогда как при варианте № 2 составляет 4 мм.

Количество теплоты, теряемое через оконный откос: 1) 19,8 Вт; 2) 35,4 Вт.

Таким образом, наиболее эффективным вариантом расположения оконного блока в проеме явился вариант – размещение оконного блока после утеплителя.

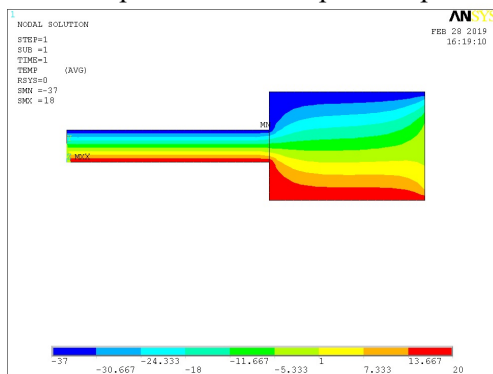


Рисунок 5 – График распределения температурного поля в варианте № 1

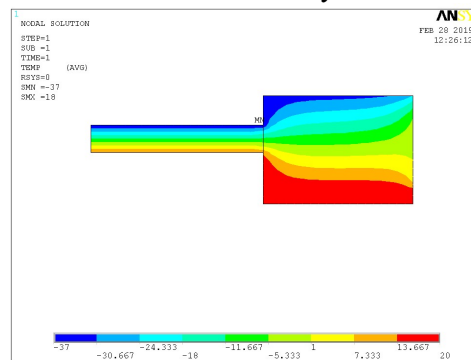


Рисунок 6 – График распределения температурного поля в варианте № 2

## Выводы

Поскольку оконный блок в варианте № 1 размещен после утеплителя, температурное поле оконного откоса в большей части находится в зоне положительных температур, следовательно, температура в углу выше температуры точки росы. Значит, отсутствует выпадение конденсата.

В варианте № 2 установки оконного блока в утеплителе, температура в углу откоса ниже температуры точки росы, значит возможно выпадение конденсата.

В целях повышения качества установки оконного блока в данную конструкцию наружной стены необходимо устанавливать после утеплителя.

Также была выполнена проверка корректности разработанной автоматизированной системы для расчета температурного поля оконного откоса в AC Delphi с универсальной AC ANSYS, которая показала хорошую сходимость.

## Литература

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – Москва: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
2. ГОСТ 30971-2002. Швы монтажные узлов примыканий оконных блоков к стеновым проемам. Общие технические условия. – 58 с. – Введен 01.03.2003.
3. Указание заместителя председателя Москомархитектуры № 4 «Об утверждении Рекомендаций по установке энергоэффективных окон в наружных стенах вновь строящихся и реконструируемых зданий». – 09.03.2004.

### References

1. Fokin K.F. Construction heat engineering of the enclosing parts of buildings. – Moscow, AVOK-PRESS, 2006. – 256 p.
2. GOST 30971-2002. Erection to joints of window assemblies adjoined to wall openings. General specifications. – 58 p. – Introduced 01.03.2003.
3. Directive of the Deputy Chairman of the Moscow City Architecture Committee No. 4 “On Approval of Recommendations for the Installation of Energy-Efficient Windows in the Exterior Walls of Newly Built and Renovated Buildings”. – 09.03.2004.

УДК 539.4

### РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПОЗИТНОГО АГРЕГАТА КРЫЛА ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСУ

© А. Ю. Тамм<sup>1</sup>, В. Н. Сергеев<sup>2</sup>, Т. В. Калинина<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29  
E-mail: <sup>1</sup>tamm@spbstu.ru, <sup>2</sup>sergeev\_vn@spbstu.ru, <sup>3</sup>kalinina\_tv@spbstu.ru

*Разработка цифрового двойника элемента механизации кессона крыла (элерона); разработаны виртуальные испытательные стенды для проведения виртуальных статических испытаний для критических случаев нагружения, анализ усталостной долговечности, а также живучести; по результатам виртуальных испытаний проведена валиация в соответствии с натурными испытаниями. По результатам статических испытаний, а также анализу усталостной долговечности, была проведена оптимизация срез навески.*

**Ключевые слова:** механизация крыла, слоистые композиты, сотовая структура, топологическая оптимизация, статическая испытания, цифровой двойник, усталостная долговечность, живучесть.

### DEVELOPMENT OF A DIGITAL FACTORY FOR DESIGN OF COMPOSITE WING ASSEMBLY WITH LIMITATIONS ON STRENGTH AND RESOURCE

A. Y. Tamm<sup>1</sup>, V. N. Sergeev<sup>2</sup>, T. V. Kalinina<sup>3</sup>

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University  
195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29  
E-mail: <sup>1</sup>tamm@spbstu.ru, <sup>2</sup>sergeev\_vn@spbstu.ru, <sup>3</sup>kalinina\_tv@spbstu.ru

*The digital twin of the wing caisson mechanization element (aileron) has been tested on a virtual test rig for several static, fatigue loadcases. Virtual durability tests were performed for critical area. Obtained results have been validated in accordance with full-scale tests. Based on the results of static tests and durability analysis, aileron earrings have been optimized in terms of stiffness.*

**Keywords:** wing mechanization, layer composites, honeycomb structure, topological optimization, static tests, digital twin, fatigue, durability.

В современном, быстрыми темпами развивающемся мире залогом конкурентоспособности являются методы, позволяющие упростить, ускорить и удешевить процессы производства конечного продукта.

В рамках работ, описанных в данной статье, был использован подход к проектированию с использованием технологий «цифровой фабрики». Данная технология подразумевает под собой систему комплексных технологических решений, обеспечивающие в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. Это относится ко всему жизненному циклу изделия, начиная от стадии исследования и планирования, когда закладываются базовые принципы изделия, и заканчивая созданием цифрового макета, «цифрового двойника», опытного образца или мелкой серии. «Цифровой двойник» в свою очередь представляет собой сложную мультидисциплинарную математическую модель объекта с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим процессам; Такая модель обеспечивает необходимую сходимость между результатами виртуальных испытаний и натуральных и учитывает особенности конкретного производства и технологии изготовления.

Применение данной методики моделирования будет представлено на примере элемента механизации крыла – элерона. Учитывая конструкцию исследуемого объекта, возникает ряд задач: моделирование слоистых композитов и сотового наполнителя. При разработке всех элементов конструкции необходимо учитывать, что будут проводиться виртуальные испытания на статическую прочность, усталостную долговечность и живучесть.

Для решения задачи на статическую прочность был использован САЕ пакет MSC Nastran. При моделировании композитных панелей в элероне кессона крыла использовались оболочечные элементы с заданием ламинатной структуры, слои композитных материалов задавались с помощью MAT8, позволяющим задать ортотропный материал для оболочечных элементов. Слой полимерсотопласта моделируется твердотельными элементами и материалом MAT9, позволяющим создать полностью анизотропный материал с упругими свойствами, определяемыми матрицей жесткости (рисунок 1). При выборе методики моделирования композитной структуры для различных вариантов представления были проведены модальный анализ, расчеты на кручение, трехточечный изгиб и растяжение [1].

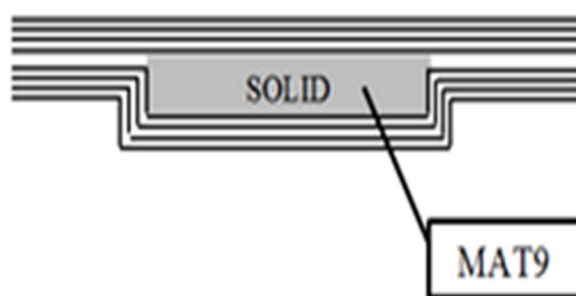


Рисунок 1 – Моделирование композиционных материалов

Для проведения виртуальных испытаний на статическую прочность и усталостную долговечность разрабатываются виртуальные испытательные стенды, аналогичные использованным при натуральных испытаниях (рисунок 2).



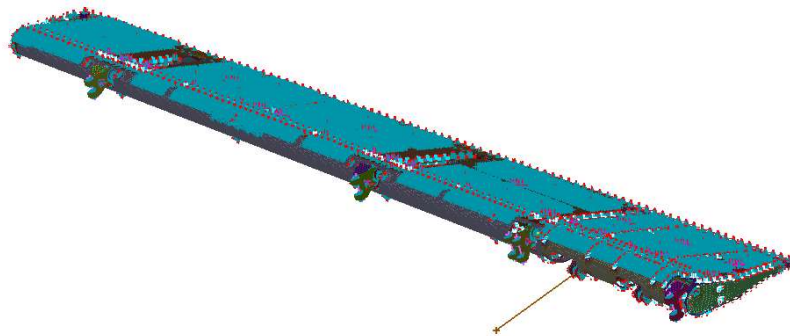


Рисунок 2 – КЭ-модель элемента механизации крыла

При проведении натурных испытаний на статическую прочность были зафиксированы значение силы на приводе бустера элерона, значения прогиба по передней и задней кромкам, а также значения напряжений, полученные с тензодатчиков. При создании «цифрового двойника» объекта была создана автоматическая обработка результатов, где данные параметры были заданы отслеживаемыми и результаты натурных и виртуальных испытаний сравнивались в автономном режиме. Результаты виртуальных испытаний на статическую прочность дали совпадение с результатами натурных испытаний с точностью необходимой для возможности дальнейших работ металлических частей конструкции. Далее были проведены виртуальные испытания усталостной долговечности, результаты которых качественно совпали с результатами натурных испытаний (рисунок 3).

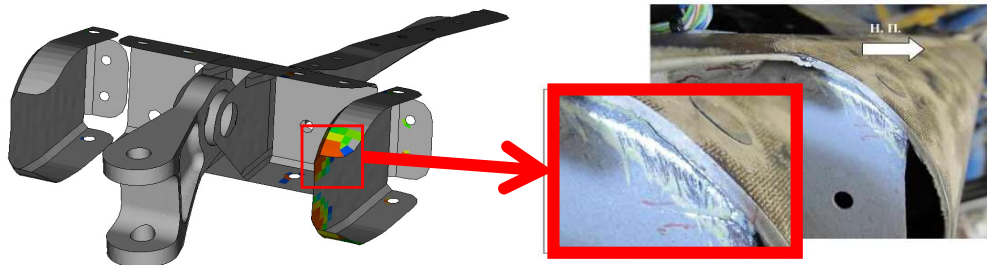


Рисунок 3 – Зоны разрушения при виртуальных и натурных испытаниях

Далее была проведена разработка виртуального стенда на усталостную долговечность в соответствии с программой натурных испытаний [2]. Для решения задачи усталостной долговечности был использован CAE пакет MAGNA FEMFAT.

Также был проведен полный анализ узлов крепления механизации крыла – серьги навески. По результатам расчета усталостной долговечности были выявлены потенциально опасные места развития трещин. При оценке живучести был использован CAE пакеты Ansys nCode и Abaqus XFEM. Расчет живучести был произведен для серьги, в которой наблюдаются наибольшие усталостные повреждения. Критическая зона с точки зрения усталостной прочности представлена на рисунке 4. Для решения данной задачи предварительно определяется коэффициент интенсивности напряжений путем рассмотрения ряда нагружений с различными значениями длины исходной трещины. Основным измеряемым крите-

рием является рост длины трещины в зависимости от числа приложенных циклов нагружения [3]. В результате расчетов были получены график зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины и график роста трещины, представленные на рисунке 5.

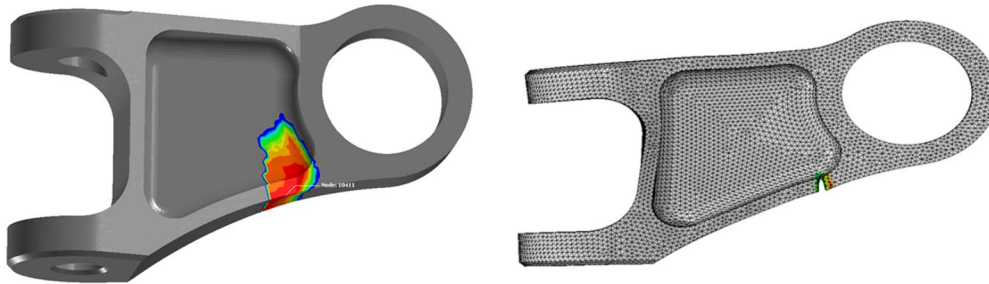


Рисунок 4 – Развитие трещины в узлах крепления механизации крыла

Следующей немаловажной задачей данной работы является оптимизация серег навески элементов механизации крыла по результатам виртуальных испытаний на статическую прочность и усталостную долговечность. Для оптимизации конструкции использован САЕ пакет Optistruct. Целью оптимизации выступает максимизация жесткости серег, т.е. перемещение под действием нагрузок должны быть меньшими или равными перемещениям при использовании оригинальной геометрии. По результатам виртуальных испытаний была проведена оптимизация не только минимизации массы деталей, но и изменение основных силовых путей в деталях с целью перераспределения нагрузок, а также разработка новых изделий под конкретный ресурс (рисунок 6). В качестве ограничений оптимизации выступают предельные допустимые напряжения и число жизненных циклов [4].

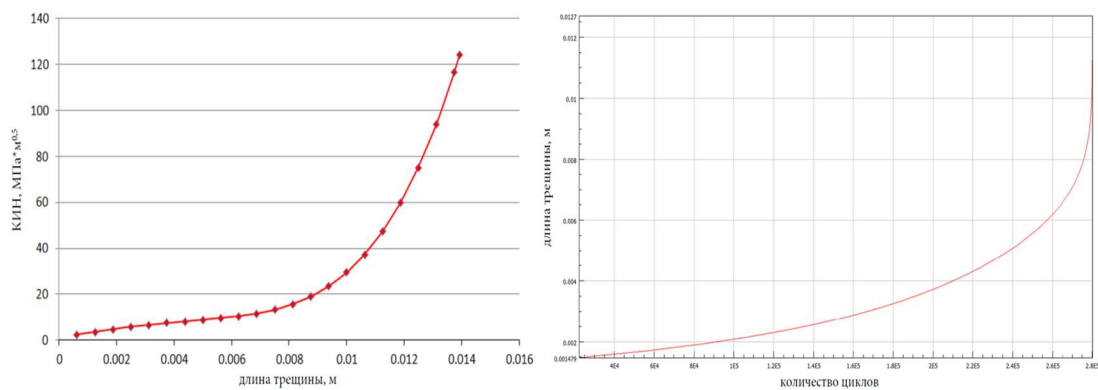


Рисунок 5 – Графики зависимости КИН от длины трещины и роста трещины

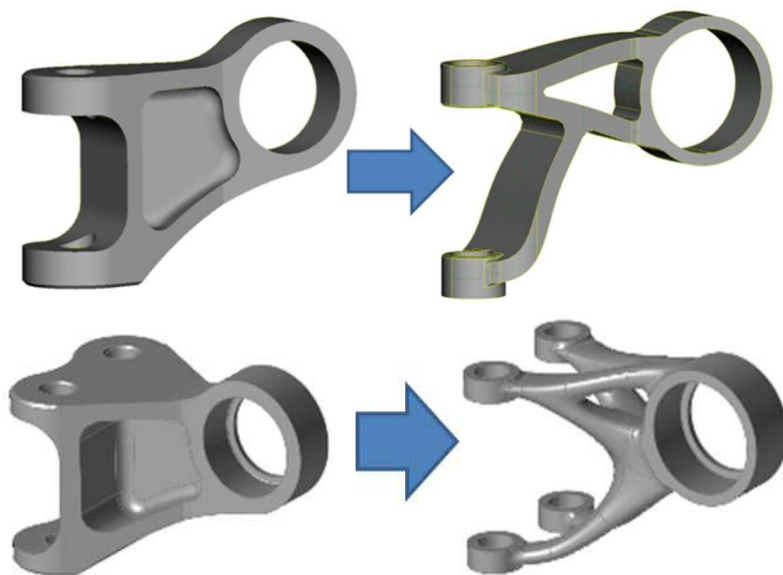


Рисунок 6 – Обработанные результаты топологической оптимизации

По результатам разработки цифрового двойника и испытательных стендов для проведения виртуальных испытаний получена полная картина НДС, выявлены узлы, которые требуют доработки. При доработке, выполненной с помощью топологической оптимизации, была спроектирована новая конструкция узлов навески, удовлетворяющая всем заданным критериям прочности и обеспечивающая необходимый ресурс. Данный подход при проектировании систем не отменяет сертифицированных натуральных испытаний, но значительно сокращает как временные, так и экономические затраты при разработке изделий техники.

#### *Литература*

1. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: справочник. – Москва: Издательство ПАО «Объединённая авиастроительная корпорация», 2011. – 304 с.
2. *Стрижиус В.Е.* Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций / В.Е. Стрижиус. – Москва: Машиностроение, 2012. – 272 с.
3. *Moes N.* A finite element method for crack growth without remeshing / N. Moes, J. Dolbow, T. Belytschko // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1999. – № 46. – С. 131-150.
4. *Bendsoe M.P.* Topology Optimization – Theory, Methods and Application / M.P. Bendsoe, O. Sigmund // Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.

#### *References*

1. Raschyotnye znacheniya kharakteristik aviatsionnykh metallicheskiykh konstruksionnykh materialov: spravochnik. – Moscow: PJSC United Aircraft Corporation Press, 2011. – 304 p.
2. *Strizhius V.E.* Metody raschyota ustalostnoi dolgovechnosti elementov aviakonstruksii. – Moscow: Mashinostroenie, 2012. – 272 p.
3. *Moes N., Dolbow J., Belytschko T.* // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1999. – No. 46. – P. 131-150.
4. *Bendsoe M.P., Sigmund O.* Topology Optimization – Theory, Methods and Application. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ,  
ФОРМИРУЕМЫХ НА СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКЕ ЛАЗЕРНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ**

© Н. С. Улаханов<sup>1</sup>, У. Л. Мишигдоржийн<sup>2</sup>

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В  
E-mail: <sup>1</sup>nulahanov@mail.ru, <sup>2</sup>druh@mail.ru

*Представлена методика разработки математической модели прогнозирования геометрических параметров покрытий на основе бора и алюминия, формируемых на стальной подложке лазерным оплавлением, комбинирующая принципы теории планирования эксперимента с аппаратом искусственных нейронных сетей. Выполнено построение, обучение и проверка адекватности нейронной сети для прогнозирования ширины и глубины ванны расплава на стальной подложке путем локального лазерного воздействия на предварительно нанесенную насыщающую смесь и проведено сопоставление результатов прогноза полученной сети и соответствующих линейных моделей. Показана эффективность рассматриваемого подхода и возможность его применения для построения прогноза значений лазерной обработки стальных деталей машин, подвергнутых поверхностному упрочнению. Представленный подход позволяет использовать одну математическую модель для прогнозирования нескольких параметров, тем самым сокращая количество экспериментов.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, искусственные нейронные сети, лазерное оплавление, покрытия.

**A NEURAL NETWORKS IN THE PREDICTING OF THE COATINGS  
GEOMETRICAL PARAMETERS FORMED ON A STEEL SURFACE BY  
THE LASER SURFACE ALLOYING**

N. S. Ulakhanov<sup>1</sup>, U. L. Mishigdorzhiiyn<sup>2</sup>

East Siberia State University of Technology and Management  
670013, Russia, Ulan-Ude, 40V Klyuchevskaya st.  
E-mail: <sup>1</sup>nulahanov@mail.ru, <sup>2</sup>druh@mail.ru

*A method for developing a mathematical model for predicting the geometric parameters of coatings based on boron and aluminum was presented. Coatings were formed on a steel substrate by laser surface alloying. Combination of the principles of the theory of the design of experiments with an artificial neural network apparatus was presented. The neural network was built, trained and tested for the prediction of the width and depth of the molten bath on a steel substrate by local laser impact on the previously applied treatment mixture. The prediction results of the obtained network were compared with the corresponding linear models. The effectiveness of the considered approach and the possibility of its application for building a prediction of the laser processing values of steel parts subjected to surface hardening were shown. The presented approach allows using a single mathematical model to predict several parameters, thereby reducing the number of experiments.*

**Keywords:** mathematical modeling, artificial neural networks, laser flashing, coatings.

В настоящее время в технологии машиностроения для упрочнения поверхностного слоя деталей машин можно эффективно использовать комбинирован-

ные процессы химико-термической обработки с методами высокоэнергетического воздействия, например, создавать локальное требуемое термическое воздействие лазерным или электронным лучом [1-3]. В частности, при воздействии лазерного излучения на диффузионные слои, несмотря на малую длительность существования жидкого состояния, в структуре ванны расплава формируются фазы, характерные для традиционного диффузионного борирования, имеющие иное строение, по сравнению с теми же фазами после упомянутой традиционной обработки [1].

Для практического применения в целях построения компьютерной системы прогнозирования результатов лазерного оплавления диффузионных слоев, интересны математические модели, обобщающие экспериментальные данные, которые получают в форме уравнения регрессии или в виде степенных зависимостей. В настоящее время одним из эффективных методов обработки экспериментальных данных является аппарат искусственных нейронных сетей [4].

Искусственные нейронные сети (ИНС) – это математическая модель, а также ее программная реализация, в которых процесс преобразования информации направлен на накопление экспериментальных знаний и их представления для последующей обработки [4-6]. Интерпретируемая информация имеет цифровое представление, позволяющее использовать ИНС в качестве модели объекта с неизвестными характеристиками.

Однако, возможности нейросетевых моделей ограничены методом их обучения. Наиболее известным методом обучения ИНС является алгоритм обратного распространения ошибки [4]. Недостатками этого метода является непредсказуемость результата, а также длительность процесса обучения. Длительность обучения может быть результатом неоптимального выбора длины шага и размера обучающей выборки, а проблема в обучении обычно возникают по двум причинам: паралича сети и попадания ее в локальный минимум.

Для повышения эффективности использования моделей, базирующихся на использовании математического аппарата ИНС, актуальным является уменьшение количества экспериментов для получения обучающих пар. Обучающая выборка должна в достаточной степени описывать процесс диффузионного упрочнения, т.е. содержать максимум информации о влиянии параметров лазерной обработки на геометрические параметры зоны оплавления. С этих позиций представляет интерес использование результатов математического планирования эксперимента (МПЭ) [7].

Цель настоящей работы заключается в синтезе ИНС прогнозирования геометрических параметров покрытий (ширина и глубина расплава) на основе бора и алюминия, формируемых на стальной подложке с помощью лазерного оплавления на основе экспериментальных данных.

Вся информация, которую ИНС имеет о задаче, содержится в наборе примеров. Поэтому качество обучения нейронной сети зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают данную задачу.

Для минимизации количества экспериментальных данных при обучении нейронной сети целесообразно получать недостающие обучающие пары из предварительно построенной математической модели, отражающей зависимость геометрических параметров покрытий на основе бора и алюминия от режимов лазерной обработки.

Приведем перечень этапов построения ИНС прогнозирования: 1) подготовка исходных данных; 2) построение математической модели с применением МПЭ; 3) подготовка факторного пространства для обучения ИНС на основании исходных данных и полученной полиномиальной математической модели; 4) построение модели ИНС; 5) обучение ИНС.

Подготовка исходных данных и построение математической модели прогнозирования зависимости геометрических параметров от значений скорости сканирования и фокусного расстояния представлена в работе [8]. В качестве обучающей выборки для ИНС используются те же экспериментальные результаты, что и для построения обобщенных математических моделей, а также для дополнения обучающей выборки используются обобщенные модели для увеличения количества обучающих пар без увеличения количества экспериментов [8]:

$$h = 302.38 - 0.06 \cdot V + 40.7 \cdot Z + 0.04 \cdot V \cdot Z$$

$$L = 242.46 + 0.19 \cdot V - 234.05 \cdot Z + 0.24 \cdot V \cdot Z$$

где  $V$  – скорость сканирования лазера, мм/мин;  $Z$  – фокусное расстояние, мм.

На основании математической модели и исходных данных, сформирована обучающая и тестовая выборка для ИНС (таблица 1) в фактических значениях, состоящая из 157 примеров.

Таблица 1 – Обучающая и тестовая выборка для ИНС

№	Скорость сканирования ( $V$ ), мм/мин	Фокусное расстояние ( $Z$ ), мм	Значение глубины ванны расплава ( $h$ ), мкм	Значение ширины ванны расплава ( $L$ ), мкм
1	200	-2,9	149,15	820
2	500	-2,9	96,35	668,21
...	...	...	...	...
156	287	-1	232,98	462,16
157	230	-1	238,68	465,01

Для решения задачи прогнозирования подходят два типа сетей [4]: многослойный перцептрон (MLP – multilayer perceptron) и сеть радиально-базисных функций (RBF – radial basis function). Сети RBF дают более точный результат, однако требуют большого количества экспериментальных данных. При относительно малой размерности обучающей выборки, что характерно для данного исследования, более эффективна ИНС типа MLP. Главная задача при построении ИНС – это определение количества нейронов скрытого слоя. На рисунке 1 показано графическое представление архитектуры синтезируемой нейронной сети, состоящей из входного, внутреннего и выходного слоев.

Обучение ИНС будем проводить с помощью метода обратного распространения ошибки [4,5], математическая интерпретация которого сводится к функциональной зависимости:

$$F : F(X_i) \rightarrow y_i, i = 1, 2 \dots 132,$$

где  $X_i$  –  $i$ -я строка матрицы входных значений  $X$ ;  $y_i$  –  $i$ -я строка матрицы выходных значений ( $i$ -й элемент вектор-столбца)  $Y$ .

Это достигается минимизацией целевой функции ошибки нейронной сети, вычисляемой методом наименьших квадратов:

$$MSE(\{\omega_{ij}\}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (r_k - y_k)^2$$

где  $r_k$  – значение  $k$ -го выхода ИНС,  $y_k$  – целевое значение  $k$ -го выхода ИНС,  $n$  – число нейронов в выходном слое,  $\omega_i^j$  – вес связи, соединяющий нейрон  $i$  с нейроном  $j$ .

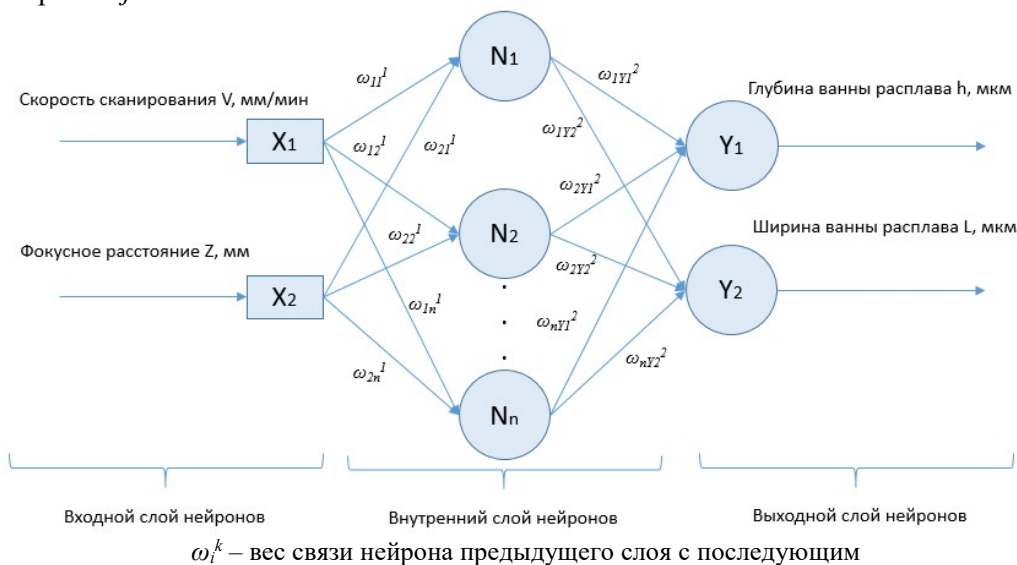


Рисунок 1 – Топология ИНС прогнозирования

### Моделирование ИНС

Моделирование ИНС проводили с помощью инструментального средства Artificial Neural Network пакета Scilab, выбирая лучшую топологию сети. Результаты моделирования представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты моделирования ИНС

Топология сети	Коэффициент корреляции, $R$
2-5-2	0.99999
2-7-2	0.99998
2-10-2	1

Лучшие показатели по коэффициенту корреляции показала сеть с архитектурой 3-7-1, где он равен 1. При  $R = 1$  существует точная линейная зависимость между выходом ИНС и целевым значением, если  $R$  близко к нулю, то между этими значениями линейной зависимости нет [4, 5]. Сравнение результатов расчетов глубины диффузионного слоя с помощью ИНС и модели, полученной с помощью МПЭ, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение результатов расчетов глубины диффузионного слоя

Скорость сканирования ( $V$ ), мм/мин	Фокусное расстояние ( $Z$ ), мм	Значение глубины ванны расплава ( $h$ ), мкм (МПЭ)	Значение ширины ванны расплава ( $L$ ), мкм (МПЭ)	Значение глубины ванны расплава ( $h$ ), мкм (ИНС)	Значение ширины ванны расплава ( $L$ ), мкм (ИНС)
200	-2,9	149,15	820	149,16	819,24
500	-2,9	96,35	668,21	96,58	668,24
200	-0,9	247,41	447,2	246,57	448,3
500	-0,9	219,92	438,34	217,83	440,16

Таким образом, в настоящей работе представлено построение нейросетевой прогностической модели на базе экспериментальных данных и результатов математического планирования эксперимента, способной выделять функциональные связи между геометрическими параметрами покрытий и режимами лазерной обработки. Показана эффективность данного математического инструмента в предметной области.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2641.2018.8.

#### Литература

1. *Мишигдоржийн У.Л.* Формирование покрытий на основе бора и алюминия на поверхности углеродистых сталей электронно-лучевым легированием / У.Л. Мишигдоржийн, И.Г. Сизов, И.П. Полянский // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 87–99.
2. *Bartkowska A.* Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel / A. Bartkowska, A. Pertek, M. Kulka, L. Klimek // *Opt Laser Technol.* – 2015. – № 74. – С. 145–157.
3. *Podchernyaeva A.* Formation and properties of a surface layer during comprehensive laser boriding of carbon steels / A. Podchernyaeva // *Powder Metall Met Ceram.* – 1997. – № 36. – С. 67–70.
4. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва: Вильямс, 2008. – 1104 с.
5. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва: Горячая линия—Телеком, 2006. – 252 с.
6. *Mebarek B.* A fuzzy neural network approach for modeling the growth kinetics of FeB and Fe<sub>2</sub>B layers during the boronizing process / B. Mebarek, M. Keddou // *Matériaux & Techniques.* – 2018. – № 106. – С. 603.
7. *Адлер Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 280 с.
8. *Улаханов Н.С.* Исследование микроструктуры и моделирование геометрических параметров покрытий на основе бора и алюминия формируемых на стальной подложке лазерной наплавкой / Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн // *Сборник трудов XXX Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2018)*. – 2019. – С. 73-76.

#### References

1. *Mishigdorzhiiin U.L., Sizov I.G., Polyanskiy I.P.* // *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. – 2018. – V. 20. – No. 2. – P. 87–99.



2. Bartkowska A., Pertek A., Kulka M., Klimek L. // Opt Laser Technol. – 2015. – No. 74. – P. 145–157.
3. Podchernyaeva A. // Powder Metall Met Ceram. – 1997. – No. 36. – P. 67–70.
4. Khaikin S. Neironnye seti: polnyi kurs. – Moscow: Viliams, 2008. – 1104 p.
5. Rutkovskaya D., Pilinskii M., Rutkovskii L. Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. – Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2006. – 252 p.
6. Mebarek B., Keddam M. // Matériaux & Techniques. – 2018. – No. 106. – P. 603.
7. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovii. – Moscow: Nauka, 1976. – 280 p.
8. Ulakhanov N.S., Mishigdorzhii U.L. // Proceedings of XXX International Conference of Young Scientists and Students “Topical Problems of Mechanical Engineering”. – 2019. – P. 73–76.

УДК 004.94

### РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

© **М.А. Пнева<sup>1</sup>**, магистр, **К.С. Усова<sup>2а</sup>**, студент, **В.Ю. Курохтин<sup>2,б</sup>**, старший преподаватель  
<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет  
 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
<sup>2</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
 670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская ул., д. 40в, +7(3012)431415  
 E-mail: kurokhtin91@gmail.com

*Расчет несущих конструкций на прочность является обязательным и ответственным этапом проектирования. Для выполнения расчетов применяются аналитические методы и программные средства, что намного упрощает расчеты и повышает их точность. Целью данной работы является проведение расчета на прочность рамной конструкции с целью замены на нее несущей стены с помощью аналитического метода и программных пакетов ANSYS, SolidWorks.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, рама, прочностной расчет, ANSYS, SolidWorks.

**M. A. Pnyova<sup>1</sup>**, master, **K.S. Usova<sup>2</sup>**, student, **V.Yu. Kurokhtin<sup>2</sup>**, senior lecturer

<sup>1</sup>Irkutsk national research technical university  
 664074, Russia, Irkutsk, 83 Lermontova St.

<sup>2</sup>East Siberia state university of technology and management  
 670013, Russia, Ulan-Ude, 40v Klyuchevskaya St., +7(3012)431415  
 E-mail: kurokhtin91@gmail.com

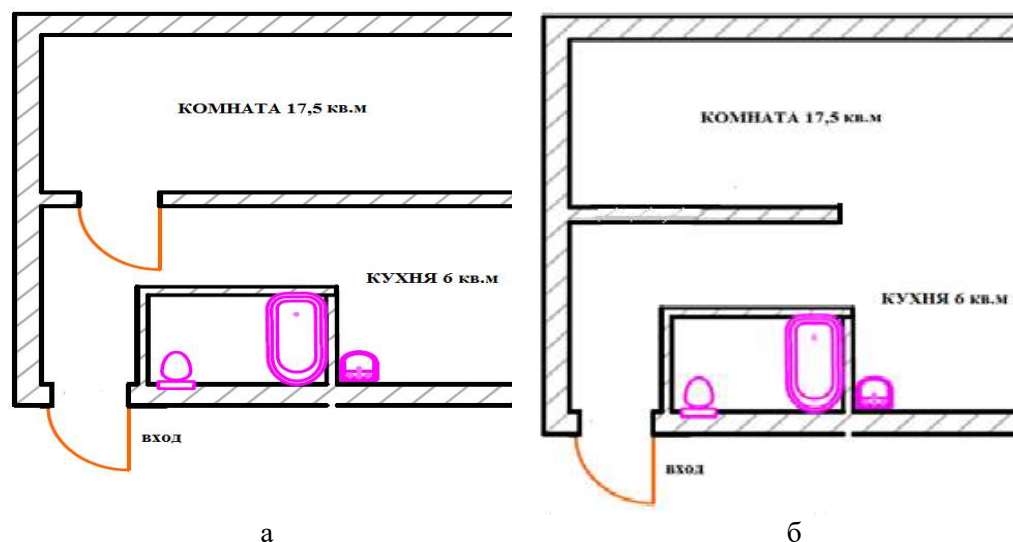
### CALCULATION OF ELEMENTS OF CONSTRUCTION STRUCTURES FOR STRENGTH USING SOFTWARE COMPLEXES AND ANALYTICAL METHODS

*Strength analysis of load-bearing structures is an obligatory and responsible stage of design. To perform the calculations, analytical methods and software are used, which greatly simplifies the calculations and increases their accuracy. The aim of this work is to calculate the strength of the frame structure in order to replace the supporting wall with it using the analytical method and ANSYS, SolidWorks software packages.*

**Keywords:** computer modeling, frame, strength analysis, ANSYS, SolidWorks.

В последнее время проявляется повышенный интерес к перепланировке квартир, которые не отвечают требованиям для удобного проживания. Это обуславливается небольшими площадями квартиры, маленькими комнатами, узкими коридорами, очень тесными кухнями, соединением ванной комнаты с туалетом. Площадь кухни составляет всего лишь 5-7 кв. м., такой размер кухонного помещения позволяет находиться в нем только одному человеку и приводит к концентрации запахов и недостатку кислорода в процессе активного приготовления пищи. Одним из распространенных вариантов при перепланировке жилья является удаление несущей стены. Зачастую такая необходимость возникает при расширении одного помещения за счет другого. При этом стена может быть заменена рамной конструкцией. Чтобы замена стены на рамную конструкцию не привела к потере несущей способности здания, необходимо произвести расчет этой конструкции на прочность и устойчивость.

Для расчета была выбрана однокомнатная квартира на четвертом этаже пятиэтажного панельного дома серии КПД 4570, 1980 года постройки (рисунок 1).



а – план квартиры до перепланировки, б – план квартиры после перепланировки  
Рисунок 1

Рамная система должна соответствовать прочностным характеристикам несущей конструкции, то есть нагрузки, приходящие на нее от выше расположенных элементов дома, не должны привести к потере устойчивости и прочности рамы [1]. Для этого на этапе проектирования рама рассчитывается на прочность и устойчивость.

В данной работе была выбрана расчетная схема рамной конструкции, соответствующая рисунку 2а, с учетом свойств материала и геометрической формы проема в несущей стене; эти характеристики дали возможность выбора допустимой длины ригеля, высоты стоек и способа закрепления рамы. Расчетная схема представляет собой П-образную конструкцию с двумя жесткими заделками. Длина ригеля составляет 3 м, высота рамы – 2,3 м. Величина распределенной нагрузки равна 16,255 кН/м. Аналитический расчет рамы проведен методом сил

[2]. В результате построены эпюры продольных сил (рисунок 2б), поперечных сил (рисунок 2в) и изгибающих моментов (рисунок 2г).

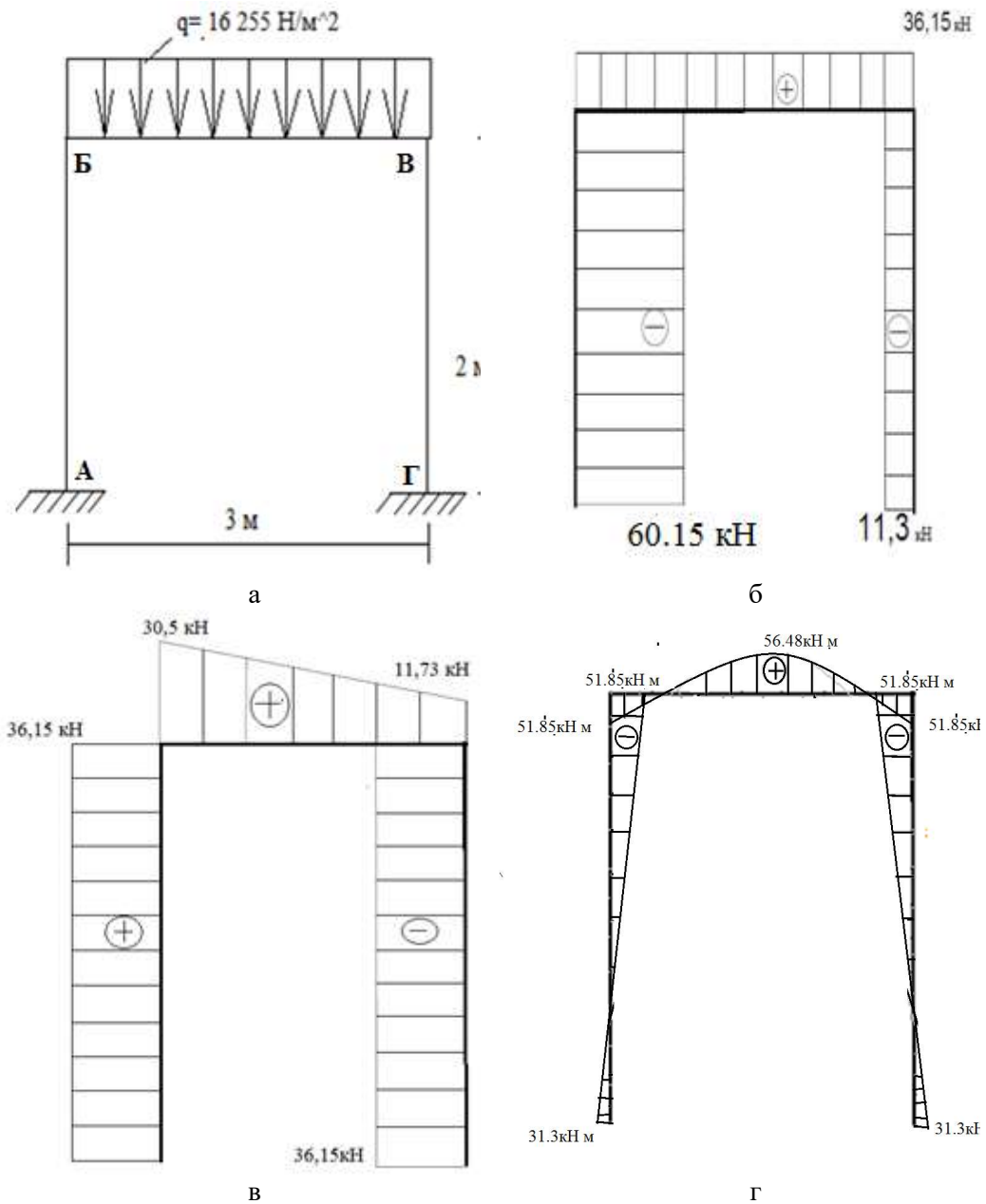
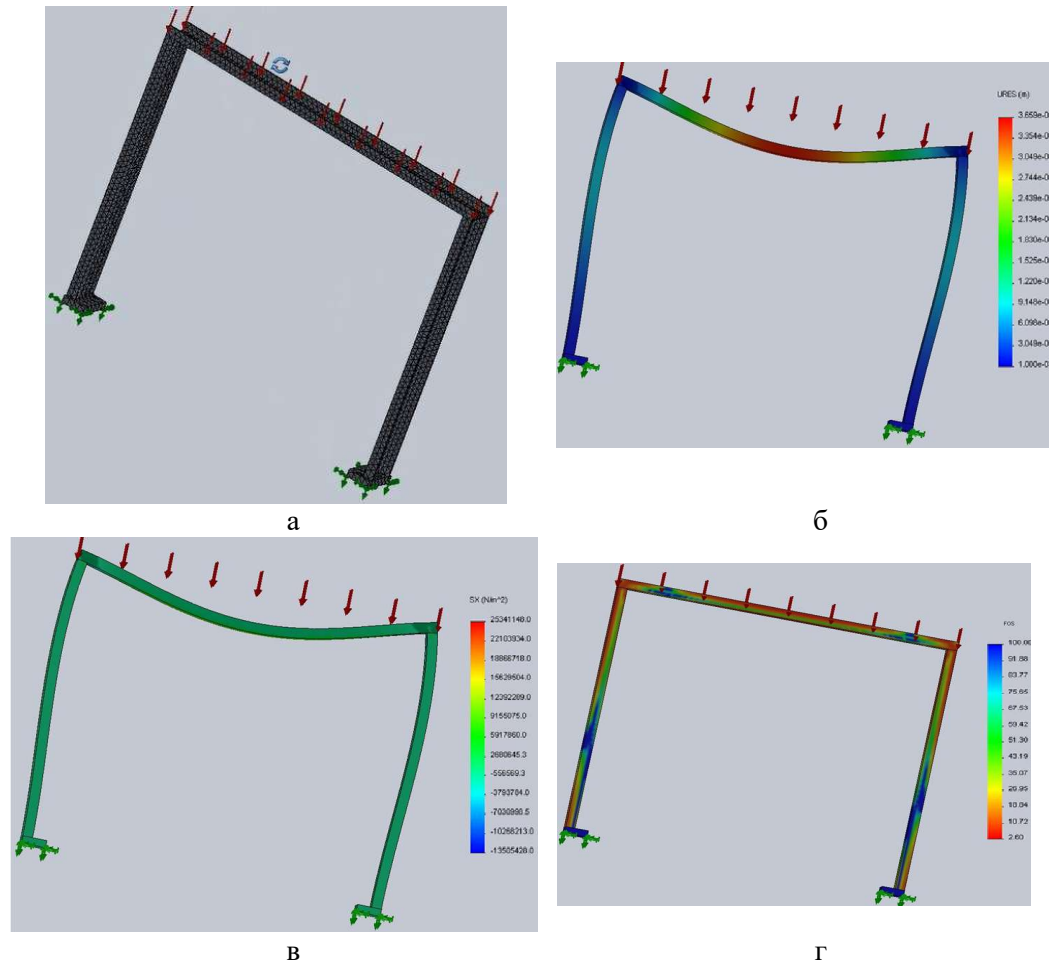


Рисунок 2

Проверка прочности и устойчивости показала, что условие прочности выполняется, а потеря устойчивости стоек рамы не будет происходить.

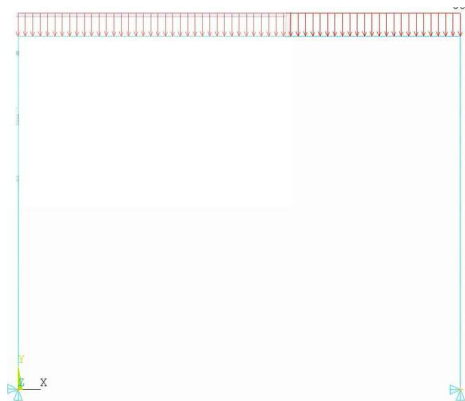
Для сравнения результатов были выполнены моделирование и расчет данной рамной конструкции в программных комплексах SolidWorks и ANSYS.

На рисунке 3а представлена расчетная схема рамы в программе SolidWorks [3]. Результаты расчета представлены на рисунках 3б – 3г.

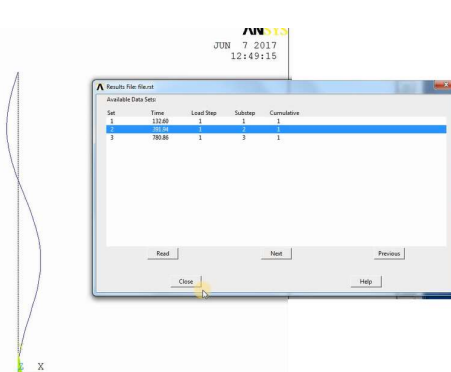


а – расчетная схема рамы, б – распределение перемещений, в – распределение напряжений, г – распределение запаса прочности  
Рисунок 3

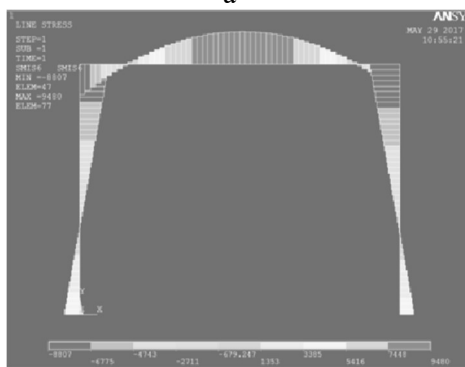
Расчетная схема и результаты расчета в ANSYS представлены на рисунке 4.



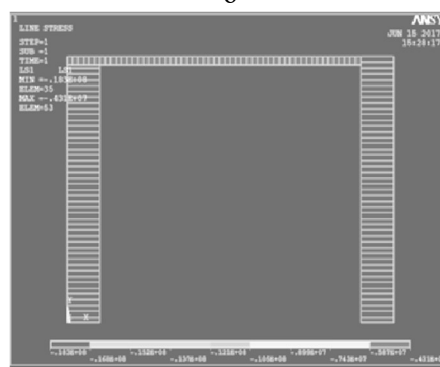
а



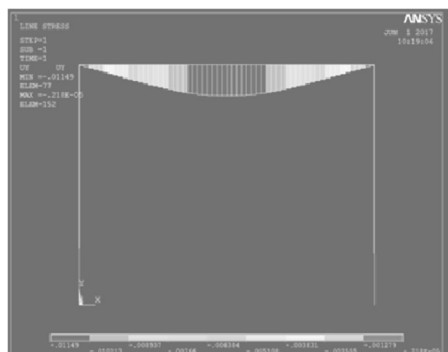
б



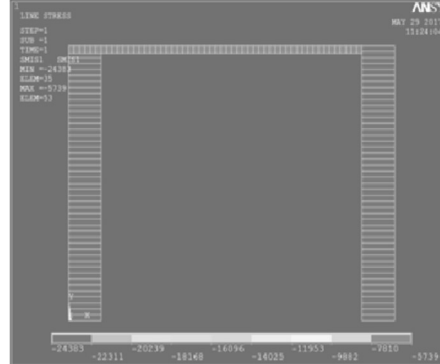
в



г



д



е

а – расчетная схема, б – расчет на устойчивость, в – эпюры изгибающих моментов, г – эпюры напряжений, д – эпюры перемещений, е – эпюры продольных сил  
Рисунок 4

По результатам расчетов рамной конструкции на прочность аналитическим методом и численными методами в программных пакетах можно сделать выводы, что выбранный тип рамы, ее материал и профиль обеспечили прочность и устойчивость рамы. Замена несущей стены на рамную конструкцию является целесообразной.

Рама может выдержать максимальную нагрузку, равную  $1,01 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>. Максимальная нагрузка, действующая на раму, составляет  $1,6 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>. Предел

текучести стали равен  $2,1 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>; максимальное напряжение в раме (расчет в Solidworks) составило  $2,5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>. Коэффициент запаса прочности при этом составил  $k = 2,64$ . По аналитическому расчету максимальное напряжение в рамной конструкции составило  $3,94 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, при этом коэффициент запаса прочности составляет  $k = 5,32$ . По результатам расчета в программном пакете ANSYS напряжение составило  $1,8 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, запас прочности составил  $k = 1,16$ .

#### *Литература*

1. Рамные конструкции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/5055889> (дата обращения: 12.08.2019).
2. Расчет статически неопределимых стержневых систем методом сил [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://soprotmat.ru/sila.htm> (дата обращения: 12.08.2019).
3. Расчеты в SolidWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.2d-3d.ru/samouchiteli/solidworks-books/1320-raschety-v-solidworks.html> (дата обращения: 12.08.2019).

#### *References*

1. Ramnye konstruktсии [Electronic resource]. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/5055889> (date of the application: 12.08.2019).
2. Raschyot staticheski neopredelimykh stержnevyykh sistem metodom sil [Electronic resource]. – URL: <http://soprotmat.ru/sila.htm> (date of the application: 12.08.2019).
3. Raschyoty v SolidWorks [Electronic resource]. – URL: <https://www.2d-3d.ru/samouchiteli/solidworks-books/1320-raschety-v-solidworks.html> (date of the application: 12.08.2019).

УДК 628.8

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ**

© **Г. В. Цыбendorжиева**, магистр, **В. В. Фёдорова**, преподаватель  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415  
E-mail: borbo96@mail.ru

*Состояние микроклимата зависит от температуры наружного воздуха, качества теплоизоляции наружных ограждающих конструкций и герметичности входных групп и окон, а также от эффективности работы систем отопления и вентиляции. В связи с этим, повышение качества, энергосбережение и улучшение эксплуатационных характеристик систем являются одной из актуальных научных и практических задач.*

*В статье представлены результаты исследования параметров микроклимата в помещениях общеобразовательной школы № 2 в г. Улан-Удэ по ул. Сухэ-Батора и обследования наружных ограждающих конструкций, на основании которых разработаны мероприятия по улучшению температурно-влажностного режима в здании. В данной работе разработаны мероприятия по энергосбережению, а именно на основании сравнения технико-экономических показателей в столовой к установке принят батарейный теплоутилизатор.*

**Ключевые слова:** параметры микроклимата, учебное помещение, наружные ограждающие конструкции, энергоэффективность, тепловизионная съемка.

## RESULTS OF RESEARCH OF PARAMETERS OF MICROCLIMATE OF THE GENERAL EDUCATIONAL INSTITUTION

G. V. Tsybendorzhieva, master, V. V. Fedorova, teacher  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Kluchevskaya, 40v, +7(3012)431415  
E-mail: borbo96@mail.ru

*The state of the microclimate depends on the outdoor temperature, the quality of the insulation of the external enclosing structures and the tightness of the entrance groups and windows, as well as the efficiency of the heating and ventilation systems. In this regard, improving the quality, energy saving and improving the operational characteristics of the systems are one of the urgent scientific and practical problems.*

*The article considered the results of the study microclimate parameters in the school No. 2 and the research of the building envelope, on the basis of which measures have been developed to improve the temperature and humidity conditions in the building. In this work, energy saving measures have been developed on the basis of a comparison of technical and economic indicators in the dining room, a heat exchanger battery has been adopted for installation.*

**Key words:** *microclimate parameters, class room, building envelope, energy efficiency, thermal imaging.*

Общеобразовательные учреждения являются одним из неотъемлемых этапов жизни каждого человека, где учащиеся проводят значительную часть времени. Как известно состояние микроклимата помещения оказывает большое влияние на качество освоения материала, а также на умственную и творческую деятельность детей. Состояние микроклимата зависит от температуры наружного воздуха, качества теплоизоляции наружных ограждающих конструкций и герметичности входных групп и окон, а также от эффективности работы систем отопления и вентиляции. В связи с этим, повышение качества, энергосбережение и улучшение эксплуатационных характеристик систем являются одной из актуальных научных и практических задач.

Объектом исследования является МБОУ средняя общеобразовательная школа № 2 в г. Улан-Удэ, являющаяся архитектурным памятником. Школа состоит из трех блоков, первый из которых – существующее трехэтажное здание с учебными классами, библиотекой и лабораторными кабинетами. Второй блок – вновь построенный трехэтажный пристрой, где размещаются столовая и спортивный зал, третий блок – существующий одноэтажный пристрой для кабинетов труда. Наружные стены – кирпичная кладка толщиной 380 мм из кирпича марки 75 на цементно-песчаном растворе марки 50, утепленная минераловатными плитами ISOVER толщиной 200 мм, а также покрытая базовым и декоративным слоем штукатурки толщиной 10 мм.

Для выявления мест значительных потерь тепла в здании выполнялись тепловизионные обследования наружных ограждающих конструкций тепловизором Testo 875-2. На рисунках 1, 2 приведены фрагменты с результатами тепловизионной съемки.

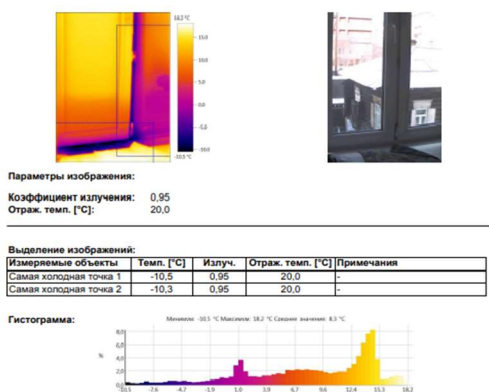


Рисунок 1 – Фрагмент тепловизионного отчета – окно

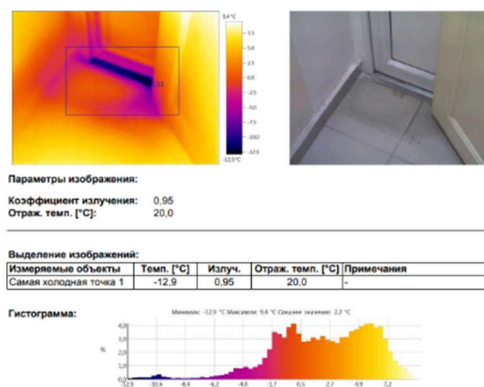


Рисунок 2 – Фрагмент тепловизионного отчета – дверь

Анализ результатов тепловизионного обследования ограждающих конструкций выявил, что значительные потери тепла характерны для входных групп 1 этажа и оконных проемов. Для снижения потерь тепла через указанные ограждения необходимо заменить уплотнители оконных и дверных проемов.

Натурные обследования параметров микроклимата проводились с использованием термоанемометра «TESTO 435» при наружной температуре  $-19^{\circ}\text{C}$ . Замеры температуры и относительной влажности воздуха проводились в наиболее проблемных помещениях по жалобам сотрудников. Результаты замеров приведены в таблице 1.

Результаты исследований микроклимата показали, что в основном в учебных классах и кабинетах температурно-влажностный режим удовлетворяет нормативным требованиям [1], за исключением угловых помещений: кабинеты русского языка и литературы, ОБЖ, географии, информатики и раздевалки при спортивном зале. Кроме того, в обеденном зале зафиксирована повышенная температура  $25,1^{\circ}\text{C}$ , а в спортивном зале повышенная относительная влажность  $69,1\%$ .

Таблица 1 – Результаты замеров температуры и относительной влажности воздуха

Наименование помещения	Нормируемые параметры [1]		Фактические параметры		Примечание
	$t_{в}, ^{\circ}\text{C}$	$\varphi_{в}, \%$	$t_{в}, ^{\circ}\text{C}$	$\varphi_{в}, \%$	
Кабинет русского языка и литературы	18-23	$\leq 60$	17,8	30,6	$t_{в}$ не соот-т треб-м
Кабинет 1 класса	18-23	$\leq 60$	18,2	32	
Кабинет ОБЖ	18-23	$\leq 60$	17,6	28,4	$t_{в}$ не соот-т треб-м
Кабинет музыки	18-23	$\leq 60$	19,1	28,7	
Кабинет географии	18-23	$\leq 60$	17,9	37,4	$t_{в}$ не соот-т треб-м
Кабинет 3 класса	18-23	$\leq 60$	18,7	40	



Кабинет математики	18-23	$\leq 60$	19,4	33,2	
Кабинет ИЗО и черчения	18-23	$\leq 60$	18,9	42	
Кабинет врача	20-24	$\leq 60$	19,8	39,8	
Кабинет информатики	18-23	$\leq 60$	17,8	30,1	$t_e$ не соот-т требованиям
Спортивный зал	15-21	$\leq 60$	16,2	69,1	$\varphi_e$ не соот-т требованиям
Обеденный зал на 200 человек	19-23	$\leq 60$	25,1	31,5	$t_e$ не соот-т требованиям
Раздевалка для девочек	20-24	$\leq 60$	19,7	30,6	$t_e$ не соот-т требованиям

Анализ результатов замеров температуры внутреннего воздуха в помещениях школы и натурного обследования технического состояния системы отопления показал, что необходимо произвести перед началом отопительного сезона гидравлическую регулировку системы, чтобы обеспечить нормируемые температуры воздуха в угловых помещениях.

Для снижения энергозатрат на систему вентиляции предлагается утилизация тепла вытяжного воздуха в системах, обслуживающих помещения столовой (П5В4-В9) и спортивного зала (ПВ3).

На основании сравнения технико-экономических показателей в столовой к установке принят батарейный теплоутилизатор фирмы «Swegon», так как потребляет меньше всего тепла, экономия составила 78 % (131,586 тыс.руб/год).

#### *Литература*

1. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 15 с. – Введен 01.01.2013.
2. Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Москва: ООО «Аналитик», 2012. – 100 с. – Введен 01.07.2013.

#### *References*

1. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. – Moscow: Standartinform, 2013. – 15 p. – Introduced 01.01.2013.
2. Set of rules SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003. – Moscow: Analitik Ltd, 2012. – 100 p. – Introduced 01.07.2013.

УДК 551.521.1

### **SOIL RADIOACTIVITY AND EROSION IN SOME TOWNS OF UVURKHANGAI AND ARKHANGAI PROVINCES IN MONGOLIA**

© **Ts. Erkhembayar, N. Chimedtsogzol, Ch. Tsolmonchimeg**

Mongolian University of Science and Technology

8th khoroo, Baga toiruu 34, Sukhbaatar district, Ulaanbaatar, Mongolia, 14191

E-mail:erkhem\_1@must.edu.mn

*The specific radioactivity concentrations of uranium, thorium, potassium and cesium were measured in soil samples, which was collected in some towns of Arkhangai and Uvurkhangai provinces in Mongolia, using gamma-spectrometer. Results of measurements of natural and man-made radioactive nuclides in soil samples were presented. There was determined soil erosion in this area.*

**Keywords:** radiation, dose, level, soil, erosion.

### Introduction

The Arkhangai Aimag was established in 1725, entitled to Sain Noyon Khan Aimag. After the victory of the People's revolution, it was renamed to Tsetserleg Mandal Uuliin Aimag in 1923, followed by Arkhangai Aimag in 1931.

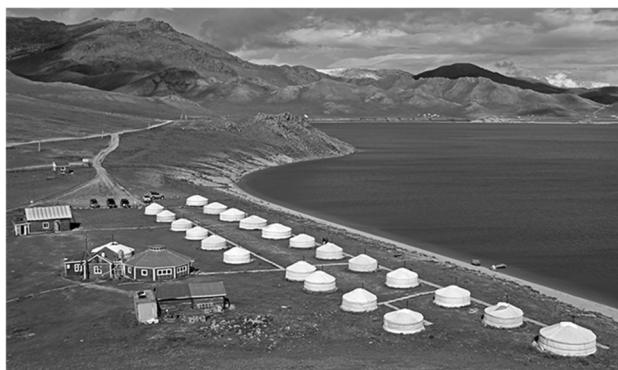


Figure 1

The area of Aimag is divided into three regions: high mountain, forest steppe, steppe. It borders the Khobsgol to the north; Uvurkhangai Aimag to the northeast and east; Bayankhongor Aimag to the southwest; and Zabkhan Aimag to the northwest. The average height is 2,414 m above sea level. The highest place is Kharlagtain Saridag of 3,539 m, and the lowest place is Okhon Tamiriin Belchir of 1,290 m. The beautiful northern Khangai Region is full of high mountains, wide canyons, clean lakes, long rivers, colorful flowers, delicious fruits, birds, and wild animals. Area: 55,300 km<sup>2</sup>, holding 28,2% of the Mongolia. It has a continental climate, and the average temperature of each month ranges from 15 degrees below zero to 15 degrees. The temperature reaches up and down even to 47 degrees and 40.6 degrees below zero. The average annual rainfall is 350~450 mm, and most of them are concentrated from April to July [2]. Uvurkhangai Province has very beautiful nature. Branches of Hangai Mountains are in the northern area and branches of Altai Mountains and steppes are in the central and southern area of the province. About 23% of the territory is covered by forests, 28,2% steppe, and 48,8% are covered by the Gobi Desert. There are many small and big springs that can be used as a medical treatment, including Arovor Khiatruun, Khamar mogoit, Taats, Most, Khvren khad, Takhi, Khorkhoi tvrvv, Khvremt, Emt, and Vvrt. Among these, the most famous spring with excellent medical effects are Khujirt.

There are many famous arts and historical assets in Uvurkhangai including monuments, human shaped stones, Khar Khot (the capital of Uighur), Khari Khorim (the capital of Mongol in the 13th Century) and Erdene zuu established in the late 16th Century. We have collected soil samples in some towns of Uvurkhangai and Arkhangai provinces in Mongolia and measured specific activity of isotopes in these samples and determined soil erosion.

### Methodology

In order to evaluate the inventory of the environmental radiation levels some towns of Uvurkhangai and Arkhangai provinces in Mongolia, samples of soils were appropriately collected and analyzed in the laboratory by gamma spectrometry. Surface soil of the vicinity of the along the road of Ulaanbaatar city was sampled from  $15 \times 15$  cm square area and 5 cm in depth. Soil sample was put into the Marinelli-beaker with capacity of 700 mL and measured for 3600 s at gamma spectrometry of Nuclear Research Center, National University of Mongolia. The samples were measured for 3600 s in a high-resolution gamma-spectrometry system, incorporating an HPGe detector of 20 % relative efficiency and a computerized multichannel analyzer of 4096 channels.

Gamma measurements were performed with a typical high-resolution gamma spectrometer based on a shielded High-Purity Germanium (HPGe) detector, coaxial type, with  $52 \text{ cm}^3$  effective volume and energy resolution of 2.0 keV FWHM for the 1332 keV gamma ray line of  $\text{Co}^{60}$ . The detector was coupled to the Multi-Channel Analyzer system (MCA) and PC board card S-100 Canberra analyzer. The spectrometer was calibrated using 1000 mL, 700 mL Marinell liquid calibration source of  $\text{Am}^{241}$ ,  $\text{Cd}^{109}$ ,  $\text{Co}^{57}$ ,  $\text{Ce}^{139}$ ,  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Y}^{88}$  and  $\text{Co}^{60}$  traceable to international standards and emitting  $\gamma$ -rays in the energy range of 59-1836 keV. Specific activity of  $\text{Ra}^{226}$ ,  $\text{Th}^{232}$ ,  $\text{K}^{40}$  and  $\text{Cs}^{137}$  was calculated based on the most intensity gamma energy of 609.3 keV ( $\text{Bi}^{214}$ ), 581.3 keV ( $\text{Tl}^{209}$ ), 1460 keV and 661.7 keV, respectively. The following formula has been used to determine the specific activity of radioactive isotope within soil by using the total absorption peak [3-5]:

$$A = \frac{N(E_i)}{k \cdot \varepsilon_0(E) \cdot k_\gamma \cdot m \cdot t},$$

where  $A$  – specific radioactivity (Bq/kg);  $N(E_i)$  – area under total absorption peak of  $\gamma$ -rays with the energy  $E_i$ ;  $k$  – geometry factor of the detector;  $\varepsilon_0(E_i)$  – detector efficiency;  $k_\gamma$  – gamma ray emission factor;  $m$  – sample mass (kg);  $t$  – measuring time (sec).

### Results and discussions

The results of the measurements were presented in figures 2–5.

Highest value of  $\text{U}^{238}$  belongs to the sample from bridge of Khujirt, where it was 1,92 times higher than world mean. Highest value of  $\text{Th}^{232}$  belongs to the samples from Khujirt, Kharkhorintowns of Uvurkhangai province and Khashaat town of Arkhangai province, where it was 1,48-1,56 times higher than world mean. Mean values of  $\text{U}^{238}$  in sampled area was 1,33 times higher than world mean, but mean value of  $\text{Th}^{232}$  was in the range of world mean value.

Highest value of specific radioactivity of  $\text{K}^{40}$  was in the sample from Behind of Tsaidam brigade, Khashaat town, Arkhangai province. Specific radioactivity of  $\text{K}^{40}$  in Uvurkhangai and Arkhangai provinces was 2,5-3,36 times higher than world mean.

Highest value of specific radioactivity of  $\text{Cs}^{137}$  belongs to the sampling points from Northeast of Khatan-Ugii camp, Ugii lake, Arkhangai province.

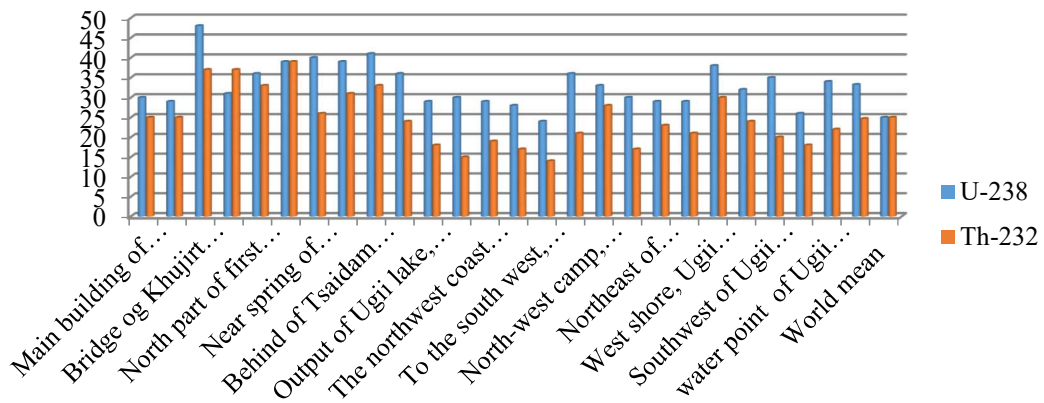


Figure 2 –  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  specific radioactivity in some points of Uvurkhangai and Arkhangai provinces, Bq/kg

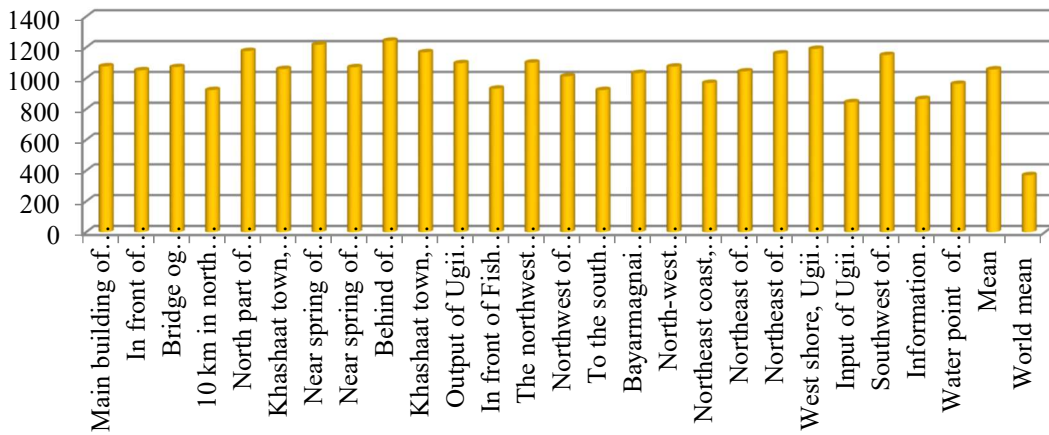


Figure 3 – Specific radioactivity of  $K^{40}$  in some points of Uvurkhangai and Arkhangai provinces, Bq/kg

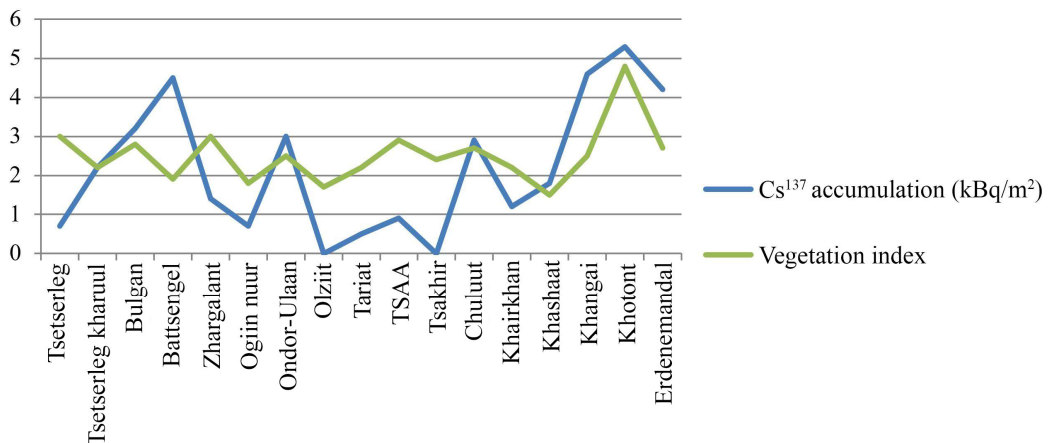


Figure 4 – Correlation between  $Cs^{137}$  accumulation and NDVI of Ugii lake in Arkhangai province

From figure 4 we can see that Cesium accumulation and NDVI of Ugi lake in Arkhangai province have a very good correlation.

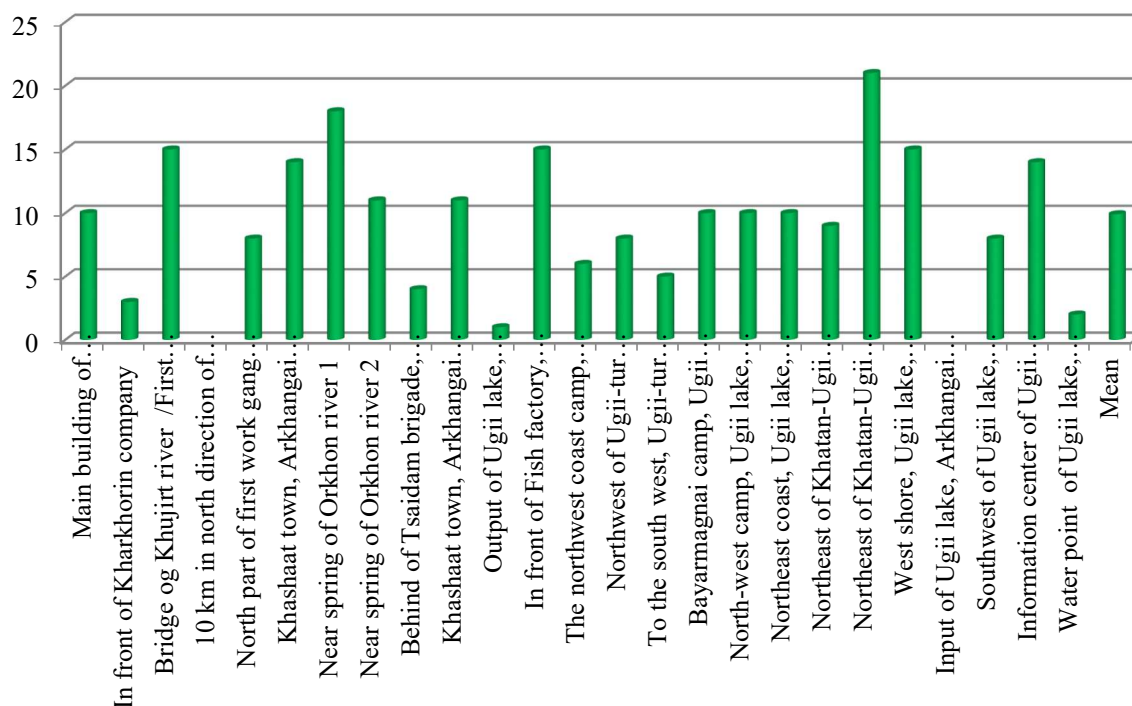


Figure 5 –Accumulation of Cs<sup>137</sup> in some towns of Uvurkhangai and Arkhangai provinces, Bq/m<sup>2</sup>

### Conclusion

1. Highest value of U<sup>238</sup> belongs to the sample from bridge of Khujirt, where it was 1,92 times higher than world mean. Highest value of Th<sup>232</sup> belongs to the samples from Khujirt, Kharkhorin towns of Uvurkhangai province and Khashaat town of Arkhangai province, where it was 1,48-1,56 times higher than world mean.

2. Mean values of U<sup>238</sup> in sampled area was 1,33 times higher than world mean, but mean value of Th<sup>232</sup> was in the range of world mean value.

3. Highest value of specific radioactivity of K<sup>40</sup> was in the sample from Behind of Tsaidam brigade, Khashaat town, Arkhangai province. Specific radioactivity of K<sup>40</sup> in Uvurkhangai and Arkhangai provinces was 2,5-3,36 times higher than world mean.

4. Highest value of specific radioactivity of Cs<sup>137</sup> belongs to the sampling points from Northeast of Khatan-Ugii camp, Ugi lake, Arkhangai province.

5. Cesium accumulation and NDVI of Ugi lake in Arkhangai province have a very good correlation.

### References

1. The Association of North East Asia Regional Governments. Mongolia. Arkhangai Province [Electronic resource]. – URL: [http://www.neargov.org/en/page.jsp?mnu\\_uid=3748](http://www.neargov.org/en/page.jsp?mnu_uid=3748) (date of the application 29.07.2019).
2. Imagine your Mongolia. Ugi lake [Electronic resource]. – URL: <http://mongoliatravel.guide/destinations/view/ugii-lake/> (date of the application 29.07.2019).

3. *Erkhembayar Ts., Norov N., Khuukhenkhuu G., Odsuren M.* // First International Ulaanbaatar Conference on Nuclear Physics and Applications. – Melville, NY: American Institute of Physics, 2009. – V. 1109. – P. 148-151.

4. *Norov N., Davaa S., Shagjjamba D.* // Scientific transactions of National University of Mongolia. – 1998. – No. 5 (138). – P. 51–57.

5. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. Report of the General Assembly. – New York: United Nations Scientific Committee on the effects of the Atomic Radiation, 1993.

6. *Erkhembayar Ts., Yasuda N., Izumi Y., Matuo Y., Chimedtsogzol N., Tsolmonchimeg Ch., Gandulam B.* Radiation Background in the Some Towns of Uvurkhangai Province in Mongolia // International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology. – 2017. – V. 2. – No. 1.

УДК 05.13.18

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

© **Т. Л. Дмитриева**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор, **А. Б. Черняго**<sup>2</sup>, аспирант Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83  
e-mail: <sup>1</sup>dmitrievat@list.ru, <sup>2</sup>abs706080@gmail.com

*Затронута проблема актуализации и модернизации межремонтных сроков службы дорожных одежд заданных в действующих нормативных документах, рассмотрены особенности предварительного национального стандарта – ПНСТ 265-2018, которые способны ухудшить качество дорожных одежд, в виду отсутствия общероссийской нормативной базы, по которой можно производить расчёт и конструирование дорожных одежд, удовлетворяющие тем межремонтным срокам, которые актуальны в наше время. Предлагается решение расчёта межремонтных сроков с помощью математической модели дорожной одежды, которая может интегрироваться в ВМ технологию автомобильной дороги.*

*Целью исследования является разработка алгоритма наиболее качественных и точных расчётов определения межремонтных сроков службы дорожных одежд, путём построения комплекса математических моделей, включающего расчёты на динамические и статические воздействия от подвижного состава, механику грунтов и комплекс природных факторов при использовании актуальных баз норм и правил в автодорожном проектировании и средств мониторинга.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, автомобильные дороги, дорожная одежда.

### **MATHEMATICAL MODEL OF ROAD PAVEMENT AS AN INTEGRAL PART OF THE INFORMATION MODEL OF AUTOMOBILE ROAD**

**T. L. Dmitrieva**<sup>1</sup>, D. Sc. (Eng.), Professor, **A. B. Chernyago**<sup>2</sup>, postgraduate  
Irkutsk national research technical university  
664074, 83 Lermontov street, Irkutsk, Russia  
E-mail: <sup>1</sup>dmitrievat@list.ru, <sup>2</sup>abs706080@gmail.com

*The article talks about the problem of updating and upgrading the specified pavement overhaul service life in the current regulatory documents, the actual problem of the preliminary national standard – PNST 265-2018. Such a national standard is capable of degrading the quality of pavements, in the absence of an all-Russian regulatory framework, according to*

*which it is possible to calculate and design pavements that satisfy the turnaround time, which is reflected and relevant there in our time. A solution is proposed for calculating the time between repairs using a mathematical pavement model that can be integrated into a BIM project.*

*The purpose of the study is the desire to produce the most high-quality and accurate calculations for determining the time between repairs of pavements. To do this, you can use a complex of mathematical models, including calculations of dynamic and static loads from rolling stock, soil mechanics and a complex of natural factors. At the same time, current databases of norms and rules in road design and monitoring tools with maximum automation are used.*

**Keywords:** *Mathematical modeling, public roads, road pavement.*

## **Введение**

С вступлением предварительных национальных стандартов по проектированию нежестких дорожных одежд (ПНСТ 265-2018), которые выйдут из разряда предварительных уже в мае 2021 года, введут новый ГОСТ, который заменит устаревший ОДН 218.046-01. Но в национальных стандартах (как и в отраслевых дорожных нормах) существует проблем отсутствия общероссийской нормативной базы, по которой можно рассчитывать и конструировать нежесткие дорожные одежды, способные выдержать те межремонтные сроки, которые отражены в ПНСТ 265-2018 [1]. Увеличение межремонтных сроков дорожных одежд (ДО) сегодня составляет 2,2–2,5 раза [1]. Это связано с модернизацией технологий и техники при устройстве ДО, применением новых перспективных материалов в основании и покрытии ДО.

Использование современных систем проектирования асфальтобетонных смесей таких как «Суперпейв» или СПАС, дает дополнительный фактор увеличения срока службы асфальтобетонных покрытий, требующий своего учёта в современных национальных стандартах.

В ОДН 218.046-01 п.3.2 сказано: «Методика оценки прочности конструкции включает как оценку прочности конструкции в целом (с использованием эмпирической зависимости допускаемого упругого прогиба от числа приложений нагрузки), так и оценку прочности с учетом напряжений, возникающих в отдельных конструктивных слоях и устанавливаемых с использованием решений теории упругости» [2]. То есть, если опираться на оценку прочности конструкции, предложенную в нынешних нормативных документах, не будут учтены возможные слои износа и поверхностные обработки дорожных покрытий. Также необходимо учесть, что расчеты на прочность в этих нормативных документах предполагаются в упругой стадии, т.е. все элементы ДО считаются абсолютно упругими телами, что обуславливает отсутствие в них остаточных деформации, а нагрузка на автомобильную ось берется статической. Все это вносит погрешности при задании межремонтных сроков. Решение этой проблемы можно получить на основе математической модели конструкции дорожной одежды, которая опираясь на нормативные данные, данные воздействия на ДО выбранного участка автомобильной дороги всех наиболее основных факторов, влияющих на прочность и устойчивость конструкции в целом, и данные по диагностике и мониторинге выбранного участка автомобильной дороги, увеличила бы точность расчёта прочности дорожной одежды, учитывая существующую обстановку.

## **Основная часть**

Цель исследования: производить наиболее качественные и точные расчёты определения межремонтных сроков службы дорожных одежд, полученные с

применением современных технологий и методами информационного моделирования.

Задача исследования: построение математической модели дорожной одежды для оперативного определения транспортно-эксплуатационных показателей и межремонтных сроков службы этой конструкции.

Методика исследования: построение комплекса математических моделей, включающих расчёты на динамическое и статическое воздействие от подвижного состава, механику грунтов и природные факторы на основе актуальных норм и правил в автодорожном проектировании, а также автоматизация алгоритма, построенного на основе этих моделей.

Дорожная одежда воспринимает нагрузку от транспортных средств и передаёт ее на земляное полотно, защищает от атмосферных осадков, обеспечивает морозоустойчивость и осушение конструкции. Для того чтобы данный конструктивный элемент автомобильной дороги был оснащён этим рядом важных функций, необходимо следовать всем нормативным показателям при проектировании и строительстве этого линейного сооружения. А чтобы сохранить нормативные показатели на протяжении положенного срока службы дорожной одежды, нужно обеспечить качественное содержание, а в дальнейшем и ремонт, с соблюдением всех установленных правил. Качественно смоделированная конструкция дорожной одежды должна предсказать возможное появление дефектов на дороге, а созданная на основе существующих методических рекомендаций база данных, поможет найти оптимальное решение устранения ещё не возникшего дефекта. Включение математической модели (ММ) дорожной одежды в автоматизированный банк дорожных данных (АБДД) создаст ещё одну возможность повысить качество контроля (получать более подробную информацию по состоянию дорожной одежды) федеральной сети дорог.

Чтобы создать такую модель нужно учесть большое количество внешних воздействий, оказываемых на автомобильную дорогу, в частности – климатические воздействия и нагрузки от подвижного состава. От всех внешних влияний будет напрямую зависеть внутреннее состояние линейного сооружения. Математическая модель в этом случае реализуется методом конечных элементов, в базу которой, включены всевозможные виды грунтов с параметрами их физических характеристик для расчета напряженно деформированного состояния всей системы выбранного участка автомобильной дороги [3].

Опираясь на ГОСТ 32960-2014 и ГОСТ Р 52748-2007, можно задаться конкретными значениями нормативной нагрузки и схемой нагружения для расчета дорожных одежд и земляного полотна на прочность и устойчивость. Климатические характеристики автомобильной дороги определяют исходя из климатических условий той местности, в которой будут производиться работы. Наша страна, а также постсоветское пространство, подразделяются в дорожном строительстве на дорожно-климатические зоны (ДКЗ) [4]. Большинство параметров (в частности, температурные показатели, расчёт сроков распутицы) известны или могут быть определены из строительной климатологии (СП 131.13330.2012).

Создание математической модели ДО будет наиболее актуальным на ранних стадиях жизненного цикла автомобильной дороги [5]. Когда ещё только собраны исходные данные, представляется возможность получения прогноза моделью о работоспособности конструкции. Обновлять и дополнять ММ будет проще, если получать отчётные данные прямо со строящего объекта в оцифрованном виде и



из единой базы данных [6], создание которой может быть частью ВІМ одного проекта.

### **Заключение**

При сегодняшней нормативной базе, дополнив её всей возможной актуальной информацией об объекте и о климатических особенностях места его расположения, есть возможность производить расчёты и конструировать ДО, с целью получения методики наиболее качественных и корректных расчётов, для оценки транспортно-эксплуатационного состояния конкретной автомобильной дороги и определения межремонтных сроков службы ДО, задающих периодичность назначения ремонта и капитального ремонта выбранных участков автомобильных дорог общего пользования. Для этого необходим комплекс математических моделей расчёта конструкции дорожной одежды, результатом которого, помимо определения межремонтного срока, могут являться также показатели, отвечающие за безопасность дорожного движения.

Задействовав национальные стандарты, мы можем брать значения климатических особенностей в пересчёте к конкретному региону с целью максимальной автоматизации для создания универсальной модели состояния конструкции ДО для любого субъекта нашей страны (учитывающую параметры местных материалов и уточненные расчетные значения характеристик).

### *Литература*

1. *Илиополов С. К.* Дороги. Инновации в строительстве / С. К. Илиополов. – Москва: ТехИнформ, 2018. – № 70. – 111 с.
2. Отраслевые дорожные нормы ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. – Москва: ГП «Информавтодор», 2001. – 148 с. – Введены 01.01.2001.
3. *Белостоцкий А.М.* Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов. – Москва: АСВ, 2016. – Том 2. – 596 с.
4. Свод правил СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. – Москва: ООО «Аналитик», 2013. – 112 с. – Введен 01.07.2013.
5. *Баранник С.В.* Применимость ВІМ-технологий в дорожной отрасли / С.В. Баранник // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2015. – №1 (4). – С. 24-28.
6. *Скворцов А. В.* Трудности перехода от автоматизированного проектирования к информационному моделированию дорог / А. В. Скворцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2015. – № 2 (5). – С. 4-12.

### *References*

1. *Iliopolov S.K.* Dorogi. Innovatsii v stroitelstve. – Moscow: TekhInform, 2018. – No. 70. – 111 p.
2. Sectoral traffic norms ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhyostkikh dorozhnykh odezhd. – Moscow: State enterprise «Informavtodor», 2001. – 148 p. – Introduced 01.01.2001.
3. *Belostotskii A.M., Akimov P.A.* Aktualnye problemy chislenного modelirovaniya zdaniy, sooruzhenii i kompleksov. – Moscow: ASV, 2016. – V. 2. – 596 p.
4. Set of rules SP 34.13330.2012. Automobile roads. – Moscow: Analitik Ltd, 2013. – 112 p. – Introduced 01.07.2013.
5. *Barannik S.V.* // CAD & GIS for roads. – 2015. – No. 1 (4). – P. 24-28.
6. *Skvortsov A.V.* // CAD & GIS for roads. – 2015. – No. 2 (5). – P. 4-12.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ МИКРОКЛИМАТА АДМИНИСТРАТИВНОГО  
ЗДАНИЯ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ В КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЯХ Г.УЛАН-УДЭ**

© **Е. А. Шашин**, магистр, **В. В. Федорова**, старший преподаватель  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, Ключевская, 40в, +7(3012)431415  
E-mail: hop456321@mail.ru

*В статье представлены результаты обследования ограждающих конструкций, которые позволили визуализировать работу отопительной системы, определить насколько равномерно обогревается здание, какова эффективность отопления, и места утечки тепла, а также результаты натурного обследования параметров микроклимата в помещениях, являющихся наиболее проблемными по жалобам сотрудников. Анализ результатов обследования микроклимата показал, что в помещениях верхних этажей здания зафиксирована пониженная температура внутреннего воздуха, что не соответствует нормативным требованиям в холодный период года. Замеры показали, что пониженные температуры воздуха наблюдаются в помещениях, расположенных на хвостовых участках горизонтальных веток системы отопления. Это можно объяснить конструктивной схемой существующих горизонтальных поэтажных веток и присоединением нагревательных приборов по принципу однотрубной системы. Для повышения эффективности систем отопления рекомендуется изменить схему присоединения нагревательных приборов к магистралям с однотрубного на двухтрубный принцип. Для экономии тепла на системы вентиляции, обслуживающие актовъый зал (П4) и помещения второго и третьего этажей (П5), предлагается применить системы утилизации тепла вытяжного воздуха систем В4 и В5, проект которых разрабатывается в магистерской диссертации.*

**Ключевые слова:** параметры микроклимата, наружные ограждающие конструкции, температурно-влажностный режим помещений, тепловизионная съемка.

**STUDY OF MICROCLIMATE SYSTEMS OF THE ADMINISTRATIVE BUILD-  
ING OF THE MANAGEMENT CENTER IN CRISIS SITUATIONS OF ULAN-UDE**

**D. A. Shashin**, master M317-21, **V. V. Federova**, teacher  
East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Kluchevskaya, 40v, +7(3012)431415  
E-mail: hop456321@mail.ru

*The article presents the results of the survey of enclosing structures, which allowed to visualize the operation of the heating system, determine how evenly the building is heated, how efficient the heating is, and where the heat leaks. Also, the results of a full-scale survey of the microclimate parameters in the premises, which are the most problematic according to the staff complaints. Analysis of the results of the microclimate survey showed that the premises of the upper floors of the building recorded a low temperature of the internal air, which does not meet the regulatory requirements in the cold period of the year. Measurements showed that the reduced air temperatures are observed in the rooms located on the tail sections of the horizontal branches of the heating system. This can be explained by the design scheme of the existing horizontal floor-by-floor branches and the connection of heating devices on the principle of a single-pipe system. To improve the efficiency of heating systems, it is recommended to change the scheme of connection of heating devices to the mains from one-pipe to two-pipe principle. To save heat on the ventilation systems serving the Assembly hall (P4) and the premises of the sec-*

*ond and third floors (P5), it is proposed to apply the heat recovery systems of exhaust air systems B4 and B5, the project of which is developed in the master's thesis*

**Keywords:** *microclimate parameters, external enclosing structures, temperature and humidity conditions of the premises, thermal imaging.*

Административное здание Центра Управления в кризисных ситуациях построено в 2014 году по проекту ООО «Антарктида». Здание 4-х этажное с подвалом предназначено для размещения административных служб оперативного управления МЧС по Республике Бурятия. В подвале размещаются бокс для стоянки оперативных автомобилей, и автостоянка на 5 машино-мест. На 1 этаже располагаются кабинеты, на 2-м этаже – кабинеты, актовый зал, на 3-м этаже – кабинеты, залы заседаний, на 4-м этаже – спортзал, раздевалки, душевые. Наружные стены – кирпичная кладка толщиной 250 мм из кирпича марки М100 с утеплителем из минеральных плит «БАЗАЛИТ ВЕНТИ» толщиной 200мм (ТУ 5769-020-00287220-2010). Фасад вентилируемый «Металл Профиль» с ветрозащитной мембраной «Tyvek Housewrap».

Система отопления здания – водяная двухтрубная с нижней разводкой магистралей с элементами двухтрубных вертикальных стояков, по этажам разводка выполнена по однотрубной горизонтальной схеме. Присоединение системы отопления к тепловым сетям осуществляется через индивидуальный тепловой пункт (ИТП) фирмы «Danfoss», расположенный в подвале здания.

Для создания и поддержания воздушного режима в помещениях здания проектом предусмотрены 5 систем приточной и 16 систем вытяжной вентиляции с механическим и естественным побуждением. В помещениях с повышенными требованиями к микроклимату (серверная, актовый зал, зал оперативных совещаний) запроектированы 6 мультizonальных систем кондиционирования воздуха с переменным расходом хладагента типа «VRV».

В процессе пятилетней эксплуатации здания были выявлены проблемы, связанные с эффективностью работы существующих систем отопления и вентиляции. В связи с этим в работе поставлена задача обследования состояния наружных ограждающих конструкций и микроклимата по помещениям здания.

#### **Тепловизионная съемка ограждающих конструкций**

Для обследования ограждающих конструкций была проведена съемка тепловизором «Testo 875-2» при наружной температуре воздуха -25 °С, которая позволила визуализировать работу отопительной системы, определить, насколько равномерно обогревается здание, какова эффективность системы отопления, а также места утечки тепла.

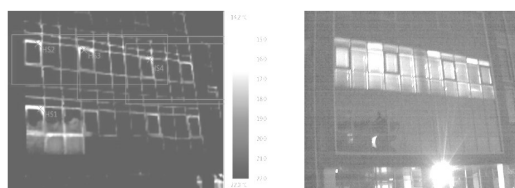
На представленных рисунках 1, 2 и 3 показаны характерные места потерь тепла: оконные проемы, входные группы, ворота цокольного этажа.

Анализ результатов тепловизионного обследования показал, что для снижения потерь тепла через указанные ограждения необходимо заменить уплотнители оконных и дверных проемов, а также ворот цокольного этажа.

#### **Обследование температурно-влажностного режима в помещениях**

Натурные обследования параметров микроклимата были проведены с использованием термоанемометра «TESTO 435» при наружной температуре -12 °С. Исследования микроклимата проводились в помещениях, являющихся наиболее проблемными по жалобам сотрудников.

В таблице 1 представлены результаты замеров параметров микроклимата в выбранных помещениях и их нормируемые значения.



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95  
Отраж. темп. [°C]: 20,0

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Самая теплая точка 1	-14,2	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 2	-15,6	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 3	-15,7	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 4	-16,0	0,95	20,0	-

Гистограмма:

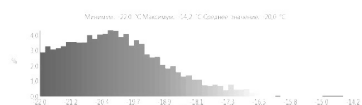
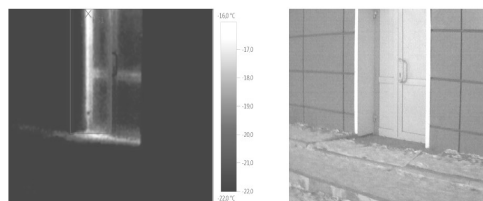


Рисунок 1 – Фрагмент тепловизионного отчета – оконные проемы



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95  
Отраж. темп. [°C]: 20,0

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Самая теплая точка 1	-16,0	0,95	20,0	-

Гистограмма:

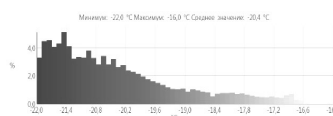
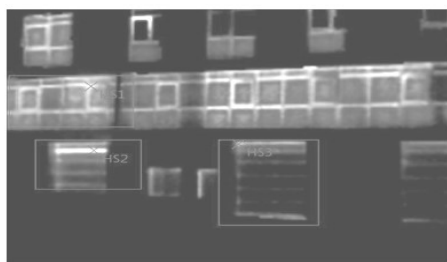


Рисунок 2 – Фрагмент тепловизионного отчета – входная группа



Параметры изображения:

Коэффициент излучения: 0,95  
Отраж. темп. [°C]: 20,0

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Самая теплая точка 1	-13,8	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 2	-11,9	0,95	20,0	-
Самая теплая точка 3	-15,4	0,95	20,0	-

Гистограмма:

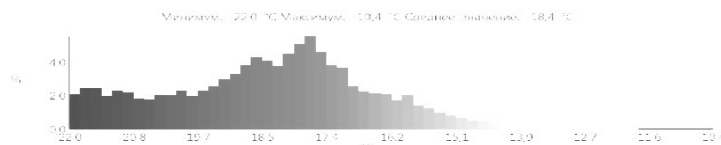


Рисунок 3 – Фрагмент тепловизионного отчета – ворота цокольного этажа

Таблица 1 – Результаты замеров температуры и влажности воздуха

Наименование помещения	Нормируемые параметры микроклимата		Фактические значения		Примечания
	t, °C	φ, %	t, °C	φ, %	
1. Кабинет отдела кадров 1-ый этаж	18-23	≤60	20,1	31,6	Норма
2. Отдел кадров ЦУКС 1-ый этаж	18-23	≤60	20,3	32	Норма
3. Актный зал 2-ой этаж	19-23	≤60	18,3	35	Не соотв.

4. Класс для проведения секретных совещаний 2-ой этаж	18-23	≤60	19,2	34,5	Норма
5. Кабинет начальника Главного управления 2-ой этаж	18-23	≤60	18,8	32,1	Норма
6. Класс подготовки и инструктажа оперативной 3-ий этаж	18-23	≤60	17,8	31,6	Не соотв.
7. Малый зал селекторных совещаний 3-ий этаж	19-23	≤60	17,6	31,3	Не соотв.
8. Зал оперативной дежурной смены 3-ий этаж	18-23	≤60	17,5	32,3	Не соотв.
9. Комната отдыха оперативной дежурной смены 3-ий этаж	18-23	≤60	17,2	33,2	Не соотв.
10. Спортзал 4-ый этаж	15-21	≤60	15,7	36,2	Норма
11. Раздевалка 4-ый этаж	20-24	≤60	16	47,8	Не соотв.

Анализ результатов обследования микроклимата показал, что в помещениях верхних этажей здания зафиксирована пониженная температура внутреннего воздуха, что не соответствует нормативным требованиям [1] в холодный период года. Замеры показали, что пониженные температуры воздуха наблюдаются в помещениях, расположенных на хвостовых участках горизонтальных веток системы отопления. Это можно объяснить конструктивной схемой существующих горизонтальных поэтажных веток и присоединением нагревательных приборов по принципу однотрубной системы (рисунок 4).



Рисунок 4 – Существующая схема присоединения нагревательного прибора



Рисунок 5 – Предлагаемая схема присоединения нагревательного прибора

Для повышения эффективности систем отопления рекомендуется изменить схему присоединения нагревательных приборов к магистралям с однотрубного на двухтрубный принцип (рисунок 5).

Замеры по относительной влажности внутреннего воздуха показали, что во всех помещениях относительная влажность находится в допустимых пределах.

Для экономии тепла на системы вентиляции, обслуживающие актовыв зал (П4) и помещения второго и третьего этажей (П5), предлагается применить си-

стемы утилизации тепла вытяжного воздуха систем В4 и В5, проект которых разрабатывается в магистерской диссертации.

#### *Литература*

1. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 15 с. – Введен 01.01.2013.
2. Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Москва: ООО «Аналитик», 2012. – 100 с. – Введен 01.07.2013.

#### *References*

1. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. – Moscow: Standartinform, 2013. – 15 p. – Introduced 01.01.2013.
2. Set of rules SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated edition of SNiP 23-02-2003. – Moscow: Analitik Ltd, 2012. – 100 p. – Introduced 01.07.2013.

УДК 004.42

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ТИПОВОГО ПЛАНА ЗДАНИЯ В AUTOCAD**

© **А. О. Щербаков, Ж. Б. Дашиев, А. Б. Балданов**

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
670013, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40в, строение 1  
E-mail: slider.98@mail.ru

*Разработана программа для автоматического составления чертежей типового проекта здания на языке Java в САПР Autodesk AutoCAD. Рассмотрен пример составления чертежей типового здания общежития № 3 ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ.*

**Ключевые слова:** план здания, AutoCAD, Excel, чертеж.

### **THE WORKING OUT OF THE PROGRAM FOR THE AUTOMATIC CONSTRUCTION OF A STANDARD BUILDING PLAN IN AUTOCAD**

**A. O. Shcherbakov, Zh. B. Dashiev, A.B. Baldanov**

East Siberia state university of technology and management  
670013, Russia, Ulan-Ude, Kluchevskaya St., 40v, building 1  
E-mail: slider.98@mail.ru

*The program for automatic drawings preparation of a building typical project using Java language in the CAD Autodesk AutoCAD has been developed. The example of the typical building drawings preparation of the hostel No. 3 of FSBEI HE «East Siberian state university of technology and management» in Ulan-Ude has been considered.*

**Keywords:** building plan, AutoCAD, Excel, drawing.

**Введение.** AutoCAD ориентирован на изготовление двухмерных чертежей любой степени сложности, а также позволяет работать и в трехмерном пространстве. Программный продукт AutoCAD постоянно модернизируется, расширяет свои возможности, но создание качественных чертежей здания в нем по-прежнему не просто, и процесс занимает определенное время [1, 2]. Поэтому

процесс ускорения составления типового плана здания является задачей полезной и интересной.

**Материалы и методы исследования.** В работе разработана программа автоматизации процесса составления чертежей в AutoCAD на примере типового здания общежития №3 ВСГУТУ. Технический паспорт первого этажа здания представлен на рисунке 1, где даны размеры комнат, толщина стен и размеры коридора.



Рисунок 1 – Технический паспорт здания

Первым шагом к разработке программы для автоматического построения типового плана здания в AutoCAD является обработка данных в программном комплексе Excel [2, 3]. Результаты расчета представлены на рисунке 2. Данные о длине и ширине комнат, толщине внешней стены и перегородок, из типового проекта заносятся в таблицу в столбцы С-Г (рисунок 2а). Координатные точки комнат для нижнего пролета (столбцы Н-К, рисунок 2а) определяются по расчётным формулам:

1. Для первой комнаты стартовые точки по  $X$  и  $Y$  задаются самостоятельно в зависимости от формата чертежа ( $\$H\$3$ ;  $\$I\$3$ );

2. В столбцах Н4-Н21 определяются стартовые точки по  $X$ , которые равны значению конечной точки по  $X$  минус толщина перегородки, и стартовые точки по  $Y$ , равные заданному первоначальному значению (столбцы I4-I21);

3. В столбцах J3-J21 определяются конечные точки по  $X$ , которые равны ширине комнат минус стартовая точка по  $X$ , и в столбцах K3-K21 определяются конечные точки по  $Y$ , которые равны длине комнат плюс стартовая точка по  $Y$ .

Координатные точки комнат для верхнего пролета (столбцы Н-К, рисунок 2б) определяются по расчётным формулам:

1. Стартовая точка по  $X$  (для первой комнаты) будет равна стартовой точке по  $X$  нижнего пролёта ( $\$H\$28$ , рисунок 2б), значения в столбцах Н29-Н48 вычисляются по формулам нижнего пролёта;

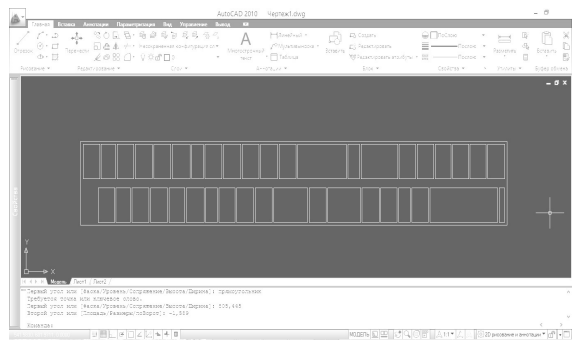
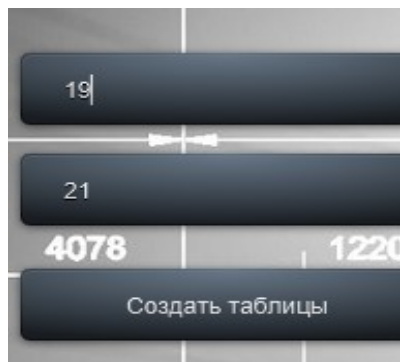
2. Стартовая точка по  $Y$  будет равна стартовой точке по  $Y$  (нижнего пролёта) плюс длина коридора плюс длина первой комнаты (столбцы I28-I48, рисунок 2б);

3. Конечные точки вычисляются по формулам нижнего пролёта.

а) Нижний пролет											б) Верхний пролет														
№ комнаты по плану	тип	длина	ширина	площадь	длина	ширина	площадь	длина	ширина	площадь	длина	ширина	площадь	длина	ширина	площадь	длина	ширина	площадь	длина	ширина	площадь			
1	спальня	3,5	3,0	10,5	5,9	10	59	10	787	458	795	509													
2	спальня	5,5	12,8	70,4	5,9	128	757	458	659	509															
3	кухня	5,5	3,1	17,1	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184
4	ванная	5,5	2,2	12,1	5,9	22	133	5,9	22	133	5,9	22	133	5,9	22	133	5,9	22	133	5,9	22	133	5,9	22	133
5	жилая	5,5	3,1	17,1	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184
6	жилая	5,5	3,3	18,2	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196
7	спальня	5,5	6,2	34,1	5,9	62	367	5,9	62	367	5,9	62	367	5,9	62	367	5,9	62	367	5,9	62	367	5,9	62	367
8	спальня	5,5	3,2	17,6	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191
9	тамбур, лестничная клетка	5,5	6,4	35,2	5,9	64	381	5,9	64	381	5,9	64	381	5,9	64	381	5,9	64	381	5,9	64	381	5,9	64	381
10	кухня	5,5	3,2	17,6	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191
11	кухня	5,5	3,2	17,6	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191
12	жилая	5,5	3,1	17,1	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184
13	жилая	5,5	3,3	18,2	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196
14	жилая	5,5	3,0	16,5	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180
15	жилая	5,5	3,2	17,6	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191
16	жилая	5,5	3,3	18,2	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196
17	жилая	5,5	3,0	16,5	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180	5,9	30	180
18	жилая	5,5	3,2	17,6	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191	5,9	32	191
19	жилая	5,5	3,3	18,2	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196	5,9	33	196
20	жилая	5,5	2,7	14,8	5,9	27	160	5,9	27	160	5,9	27	160	5,9	27	160	5,9	27	160	5,9	27	160	5,9	27	160
21	спальня	5,5	3,1	17,1	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184	5,9	31	184
22	коридор			1,51	76,6		118,1	16	766																

а – нижний пролет, б – верхний пролет  
 Рисунок 2 – Исходные данные в системе Excel

Для автоматизации работы была написана программа для автоматического построения типового плана здания в AutoCAD на языке Java. На рисунке 3а представлено окно интерфейса программы. Согласно техническому паспорту здания (рисунок 1) для верхнего и нижнего пролетов здания задаются количество комнат, затем нажимается кнопка «Создать таблицы». На рисунке 4 показаны таблицы, которые соответствуют таблицам в Excel (рисунок 2). На рисунке 4а представлены данные для верхнего пролёта здания, на рисунке 4б – для нижнего пролёта здания. После заполнения таблицы выполняем операцию «Создать файл». Открывается окно, где необходимо ввести имя файла и путь, где он будет сохранён. Файл сохраняется в виде текстового файла. Следующий шаг – работа в AutoCAD. В командную строку AutoCAD записываем ссылку на текстовый файл и получаем чертеж, который соответствует чертежу первого этажа типового здания общежития № 3 ВСГУТУ (рисунок 3б).



а – окно программы, б – результат автоматического процесса построения чертежей  
 Рисунок 3 – Программа для автоматического построения типового плана здания



№ комнаты по плану	Назначение	Длина	Ширина	Площ	Длина(баз)	Ширина(баз)	ст.г.ж	ст.г.у	к.г.ж
1	сарай	5,9	1	5,9	30	850	450		700
2	спортзал	5,9	12,8	75,52000...	59	128	787	450	659
3	кабинет	5,9	3,1	18,29000...	59	31	656	450	625
4	электрощитовая	5,9	2,2	12,98000...	59	22	622	450	600
5	жилая	5,9	3,1	18,29000...	59	31	597	450	566
6	жилая	5,9	3,2	18,88000...	59	32	563	450	531
7	склад	5,9	6,2	36,58000...	59	62	528	450	466
8	тамбур/клад	5,9	3,2	18,88000...	59	32	463	450	431
9	ванна	5,9	6,4	37,76000...	59	64	428	450	364
10	кабинет	5,9	3,2	18,88000...	59	32	367	450	329
11	кабинет	5,9	3,2	18,88000...	59	32	330	450	294
12	жилая	5,9	3,1	18,29000...	59	31	297	450	260
13	жилая	5,9	2,2	12,98000...	59	22	257	450	235
14	жилая	5,9	3,3	19,47	59	33	232	450	199
15	жилая	5,9	3	17,70000...	59	30	196	450	166
16	жилая	5,9	3,2	18,88000...	59	32	163	450	131
17	жилая	5,9	3,2	18,88000...	59	32	128	450	96
18	жилая	5,9	2,7	15,93000...	59	27	93	450	66
19	сарай	5,9	3,1	18,29000...	59	31	83	450	52
20	коридор	1,55	76,6	118,7299...	16	766	0	0	0

а

б

Рисунок 4 – Расчетные данные для верхнего и нижнего пролетов здания: а – для верхнего пролета, б – для нижнего пролета

**Выводы.** Разработана программа для автоматического построения типового плана здания в AutoCAD, которая ускоряет процесс построения чертежей. Возможно усовершенствование программы, для более детального составления чертежа здания.

Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ, проект № 9.7667.2017/БЧ.

*Литература*

- САПР Autodesk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/solutions/cad-software> (дата обращения: 25.02.2019).
- Создание плана здания в AutoCAD с использованием script-файла / Л. А. Бохова [и др.] // Механика XXI века. – 2018. – № 17. – С. 234-237.
- Рогов В. Е. Оценка прочности каркаса юрты из композиционного материала с использованием САД/САЕ-систем / В. Е. Рогов, А. Б. Балданов // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. – 2016. – № 2-3. – С. 57-62.

*References*

- CAD Autodesk [Electronic resource]. – URL: <https://www.autodesk.ru/solutions/cad-software> (date of the application: 25.02.2019).
- Bokhova L.A., Shcherbakov A.O., Ipatov D.N., Butorin A.A., Bairov S.A., Kondratieva A.N. // Mechanical engineers to XXI century. – 2018. – No. 17. – P. 234-237.
- Rogov V.E., Baldanov A.B. // BSU bulletin. Chemistry. Physics. – 2016. – No. 2-3. – P. 57-62.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<b>Гордиенко Е. В., Дубов В. В., Карпюк П. В., Досовицкий Г. А.</b> Сцинтилляционные порошки и керамика многокомпонентных оксидов со структурой граната – влияние изменения состава на люминесцентные свойства	5
<b>Иванов А. А., Чермошенцева А. С.</b> 3D-аэрозольная печать как способ получения низкотемпературных керамических слоев печатных плат	10
<b>Аверина А. Е., Дасковский М. И., Скрипачев С. Ю., Николаев Е. В.</b> Применение квантово-химических расчётов для оценки стойкости эпоксидной матрицы полимерного композиционного материала к внешним воздействиям	15
<b>Ежов И. В., Казанцева Н. В., Давыдов Д. И., Меркушев А. Г.</b> Сравнительный анализ микроструктуры медицинского сплава CoCrMo, полученного методом литья и аддитивной технологией	20
<b>Gu Yi-Chuang, Mei Shun-Qi</b> Study on the bending property of shirt sleeve slits	24
<b>Tserenjav E., Jigmeddorj V., Lygdenov B. D., Shavrai P., Munhkbat N., Omoontsoo G.</b> Study on physical properties of dispersed silica	30
<b>Zhang Yan-wei, Zhen Quan, Lygdenov B., Гурьев А. М., Mei Shun-qi</b> Research on the technology of paste boronizing for h13 die steel	36
<b>Амбарцумов М. Г., Тарала В. А., Крандиевский С. О., Лапин В. А., Кулешов Д. С., Чикулина И. С., Тарала Л. В.</b> Зависимость микроструктуры тонких пленок нитрида алюминия, выращенных методом плазмоактивированного атомно-слоевого осаждения, от длительности плазменной экспозиции	40
<b>Анчилов Н.Н., Рогов В.Е.</b> О результатах комплексных исследований структуры исходного сырья и пеностекла с применением современных физико-химических методов	44
<b>Yun-Qi Gong, Shun-Qi Mei</b> Stretch elasticity and garment pressure of shaping-underwear fabric	49
<b>Бадмаева Э. В., Урханова Л. А., Лхасаранов С. А.</b> Сухие строительные смеси на основе композиционных вяжущих с модифицирующими добавками	55
<b>Бохоева Л. А., Садовский Г. П., Гуртовой С. С.</b> Многослойные защитные конструкции из композиционных материалов	59
<b>Исакова Т. А., Петрова П. Н.</b> Модификация фторполимерами наполнителей при разработке новых полимерных композитов на основе политетрафторэтилена	64
<b>Калмыкова Т. П., Северин А. В., Гопин А. В., Костина Ю. В.</b> Физико-химические особенности композитов наногидроксипатита с гиалуроновой кислотой	69
<b>Кибирева Е. Е., Рогов В. Е.</b> Фиксация дисперсных наполнителей во фторопластовой матрице	73
<b>Кондранова А. М., Ложкомоев А. С., Казанцев С. О., Первиков А. В.</b> Синтез и антимикробная активность композитных оксидов на основе	

оксида цинка	77
<b>Ланцев Е. А., Нохрин А. В., Болдин М. С., Попов А. А.</b> Влияние содержания углерода в твердых сплавах на электроимпульсное плазменное спекание WC-CO	82
<b>Лыгденов Б. Д., Гурьев А. М., Мэй Шунчи, Чжен Чен, Чжан Янвей, Цыдыпов Б. С.</b> Структурно-фазовый состав и свойства диффузионного борированного слоя на стали H13	86
<b>Mei Shunqi, I. Garmaeva, Zheng Quan, Zhang Yangwei, Tsypov B., Samaev J., Lygdenov B., Guriev A.</b> Structure and properties of the diffusion layer during the process of surface saturation on medium-carbon steel in the amorphous boron in compound	92
<b>Пнева М. А., Рогов В. Е.</b> Формирование покрытий из тефлонсодержащих частиц на поверхностях трения в двигателе автомобиля	95
<b>Полянский И. П., Сизов И. Г., Лазарева О. В., Волков А. С., Максимов Б. А., Алхимова Е. С.</b> Исследование хрупкости бороалитированных слоев, полученных с применением электронно-лучевого нагрева	99
<b>Пронин С. А., Кочнева А. В., Зелинская Е. В.</b> Контроль качества полимерных композиционных материалов на основе поливинилхлорида и промышленных отходов Иркутской области	103
<b>Суаридзе Т. Р., Хлебникова Ю. В., Родионов Д. П., Егорова Л. Ю.</b> Окисление ленточных эпитаксиальных подложек из упрочненных сплавов CU-ME и (CU+NI)-ME	108
<b>Урханова Л. А., Шестаков Н. И.</b> Исследование влияния фуллеренсодержащих добавок на адгезионные свойства битума	112
<b>Хуснутдинов Р. М., Мокшин А. В.</b> Структурные особенности и микроскопическая динамика объемного металлического стекла ZrCuAl	116
<b>Шаранова А. В., Дмитриева М. А., Захаров А. А.</b> Формирование свойств наномодифицированных бетонов	121
<b>Shefer K. I., Kovtunova L.M., Rogozhnikov V. N., Stonkus O. A., Chetyrin I. A., Larina T. V., Suprun E. A.</b> Study of platinum and rhodium catalysts supported on alumina for the reaction of partial oxidation of hydrocarbons	126
<b>Mei Shunqi, Guriev A. M., Ivanov S. G., Guriev M. A., Lygdenov B. D.</b> Complex saturation of corrosion resistant steels AISI 430 and AISI 303 with boron and carbon	129

#### МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

<b>Митрофанов О. В.</b> Прикладные задачи обеспечения несущей способности композитных панелей авиационных конструкций при ограничениях по прочности	132
<b>Воронов С. А., Киселев И.А., Воронова И. С.</b> Оценка качества и точности шлифования маложестких деталей с учетом динамики	137
<b>Аистов И. П., Вансович К. А., Нахлесткин А. .</b> Применение дискретной модели роста усталостного дефекта для оценки срока безопасной эксплуатации участка магистрального трубопровода с коррозионным дефектом	144
<b>Захаров М. Н., Любченко М. А.</b> Методика оценки несущей способно-	

сти резбовой пары из углерод-углеродных композиционных материалов на стадии проектирования изделия	149
<b>Бохоева Л. А., Перевалов А. В., Шевченко Я. А.</b> Межслойные дефекты в сферических оболочках	154
<b>Бабич А. В., Рогачев М. С., Штерн М. Ю., Шерченков А. А.</b> Исследование термических свойств и стабильности наноструктурированного термоэлектрического материала Sn <sub>0,9</sub> Pb <sub>0,1</sub> Te	158
<b>Ganbat Tumen-Ulzii, Ganbat Danaa, You Huh</b> An innovative way to produce nanofibrous bundle by condensation and heat-drawing of a nanofiber web	162
<b>Баскакова М. И., Конушкин С. В., Насакина Е. О., Сергиенко К. В., Леонов А. В., Севостьянов М. А.</b> Разработка биосовместимого сплава с памятью формы на основе титана для медицинских изделий	169
<b>Бохоева Л. А., Бочектуева Е. Б.</b> Исследование на сжатие слоистых композитов	173
<b>Тарасов В. А., Гордеев А. Б.</b> Зондирующие и акустические волны в звукоизолирующих перегородках	179
<b>Горошко Е. А., Гафнер Ю. Я., Гафнер С. Л.</b> Формирование структуры наночастиц Cu-Au при синтезе из газовой фазы	182
<b>Кулинич Н. А., Черных А. Г.</b> Соединения деревянных конструкций с использованием самонарезающихся нагелей факторы, влияющие на несущую способность соединения	187
<b>Курохтин В. Ю.</b> Моделирование композитного люка в грузовой створке вертолета МИ-171	192
<b>Кушнарёв А. Г., Щербаков И. В., Даутбаева Д. Б., Козулин А. А.</b> Моделирование нелинейно-упругого поведения резиновых элементов конструкций при больших степенях деформаций	196
<b>Новосельцев П. В.</b> Экспериментальное исследование деформативности бесстыкового рельсового пути под действием осевой силы	200
<b>Пнева В. В., Рогов В. Е.</b> Возможность регулирования и изменения размеров фторопластовых заготовок	205
<b>Покровский А. М., Чермошнцева А. С., Дубовицкий Е. И.</b> Расчет КИН по фронту полуэллиптической поперечной трещины в растянутой полосе	209
<b>Попов А. А., Берендеев Н. Н., Болдин М. С., Ланцев Е. А.</b> Новая методика оценки прочности перспективных мелкозернистых конструкционных керамик, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации в условиях многоосного напряженно-деформированного состояния	215
<b>Чермошнцева А. С., Покровский А. М., Иванов А. А.</b> Экспериментальное исследование моделей тонкостенных сжатых колец с трещиноподобными дефектами из слоистых композиционных материалов	219
<b>Эрдэнэбат Т.-О., Эрдэнэбат Б., Ганбат Д.</b> Новый способ увеличения тяги воздушного винта за счет дополнительной несущей поверхности	224
<b>КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ</b>	
<b>Арапова И. А., Курохтин В. Ю.</b> Компьютерное моделирование конструкции автомобильного моста через реку Сухая	233

<b>Ашыров Т. А.</b> Математическое моделирование процессов теплопроводности при плавлении металлов	239
<b>Базарон С. А.</b> Способ обработки экспериментальных видеоданных развития трещины в образцах	242
<b>Базарон С. А., Гуртовой С. С.</b> Расчет на прочность защитного экрана для космического аппарата из слоистых композиционных материалов	246
<b>Базарон С. А., Шевченко Я. А., Садовский Г. П.</b> Компьютерное моделирование защитного экрана космического аппарата	252
<b>Нестеренко Е. С., Олейников А. И.</b> Моделирование процесса вытяжки цилиндрической детали «Тарель» с использованием системы ANSYS LS-DYNA	256
<b>Банина Е. С., Курохтин В. Ю., Даваадорж Н.</b> Компьютерное моделирование и расчет на прочность фермы центра культурного развития п. Саган-нур	260
<b>Steinhauer M., Steinhauer V., Steinhauer L.</b> Artificial neural networks: a machine learning example with neuroph	264
<b>Башкова Д. А., Гафнер Ю. Я., Замулин И. С.</b> Анализ возможности использования нанокластеров сплава Cu–Au в качестве битов в устройствах рст памяти	272
<b>Бохоева Л. А., Балданов А. Б., Рогов В. Е.</b> Обеспечение жесткости консоли крыла беспилотного летательного аппарата за счет оптимального угла укладки волокон	277
<b>Бохоева Л. А., Бочектуева Е. Б., Балданов А. Б., Курохтин В. Ю.</b> Расчет прочности слоистых плоских экранов при ударе с использованием CAD/CAE-систем	281
<b>Steinhauer V., Steinhauer A.</b> Stock market forecasting using neural networks	287
<b>Бохоева Л. А., Буторин А. А., Баиров С. А., Кондратьева А. Н., Ипатов Д. Н.</b> Моделирование элементов конструкции беспилотного летательного аппарата в программном комплексе SolidWorks	291
<b>Бохоева Л. А., Курохтин В. Ю., Эрдэнэбат Т.-О.</b> Определение параметров развития усталостной трещины в образцах лопастей несущего винта вертолета на основе обработки видеозаписей	297
<b>Бохоева Л. А., Щербаков А. О., Ипатов Д. Н.</b> Создание плана здания в AutoCAD с использованием script-файла	305
<b>Виноградова В. К., Дашиев Ж. Б., Бохоева Л. А.</b> Расчет в ANSYS теплопередачи пеностеклокерамики и пенобетона	310
<b>Гончикжапов А. Б., Курохтин В. Ю.</b> Моделирование элементов строительных конструкций на примере станции технического обслуживания с использованием информационных технологий	314
<b>Данеев В. В., Баташов А. И., Дашеев Д. Е., Чередов Э. Н., Лыгденов Б. Д.</b> Анализ работы системы наружного освещения на основе возобновляемых источников энергии	318
<b>Дашинимаев Б. Ц., Курохтин В. Ю., Цоож Ш.</b> Моделирование здания учебного заведения с использованием компьютерных технологий	323
<b>Каблукова А. Е., Курохтин В. Ю., Улзийсайхан П.</b> Компьютерное моделирование жилого дома с автоматизированной системой управления зданием	327

<b>Козлов А. А., Нестеренко Е. С.</b> Исследование влияния упругих свойств штамповой оснастки на процесс вытяжки осесимметричных деталей типа «полусфера»	332
<b>Короткая О. В.</b> Расчет циклически симметричных конструкций методом подконструкций в конечно-элементном комплексе ANSYS	335
<b>Кузнецова Д. А., Аюрова О. Б.</b> Исследование и совершенствование систем обеспечения микроклимата СТО «Байкал автотрак»	339
<b>Мельникова Т. В., Преображенский А. П., Львович Я. Е.</b> Моделирование и оптимизация процессов турбулентности	344
<b>Некрасова В. В., Курохтин В. Ю.</b> Построение 3D-модели оздоровительного центра и расчет пространственной фермы	348
<b>Нестеренко Е. С., Левченко Е. А.</b> Моделирование процесса вытяжки конического сепаратора с использованием системы ANSYS LS-DYNA	353
<b>Оноева Д. В., Курохтин В. Ю.</b> 3D-моделирование испытательного стенда для лаборатории “надежность, прочность изделий и конструкций”	358
<b>Степанова Т. В., Аюрова О. Б.</b> Разработка автоматизированной системы для расчета температурного поля оконного откоса	363
<b>Тамм А. Ю., Сергеев В. Н., Калинина Т. В.</b> Разработка цифровой фабрики при оптимальном проектировании композитного агрегата крыла при ограничениях по прочности и ресурсу	367
<b>Улаханов Н. С., Мишигдоржийн У. Л.</b> Применение нейронных сетей в прогнозировании геометрических параметров покрытий, формируемых на стальной подложке лазерным оплавлением	372
<b>Пнева М. А., Усова К. С., Курохтин В. Ю.</b> Расчет элементов строительных конструкций на прочность с использованием программных комплексов и аналитических методов	377
<b>Цыбендоржиева Г. В., Фёдорова В. В.</b> Результаты исследования параметров микроклимата общеобразовательного учреждения	382
<b>Erkhembayar Ts., Chimedtsogzol N., Tsolmonchimeg Ch.</b> Soil radioactivity and erosion in some towns of uvurkhangai and arkhangai provinces in mongolia	385
<b>Дмитриева Т. Л., Черняго А. Б.</b> Математическая модель дорожной одежды как неотъемлемая часть информационной модели автомобильной дороги	390
<b>Шашин Е. А., Федорова В. В.</b> Исследование систем микроклимата административного здания центра управления в кризисных ситуациях г. Улан-Удэ	394
<b>Щербаков А. О., Дашиев Ж. Б., Балданов А. Б.</b> Разработка программы для автоматического построения типового плана здания в AutoCAD	398

Научное издание

III МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
ПО СОВРЕМЕННЫМ ПРОБЛЕМАМ МАТЕРИАЛОВ  
И КОНСТРУКЦИЙ

**Сборник статей**

Дизайн обложки *В. М. Нагуслева*  
Компьютерная верстка *Т. А. Олоевой*

Свидетельство о государственной аккредитации  
№ 2670 от 11 августа 2017 г.

Подписано в печать 26.08.19. Формат 70х108 1/16.  
Уч.-изд. л. 27,60. Усл. печ. л. 35,7. Тираж 120. Заказ 146.  
Цена свободная.

Издательство Бурятского госуниверситета  
670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а  
E-mail: [riobsu@gmail.com](mailto:riobsu@gmail.com)

Отпечатано в типографии Бурятского госуниверситета  
670000, г. Улан-Удэ, ул. Сухэ-Батора, 3а