

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Уральское отделение Российской академии наук

Технический комитет 17 (Неразрушающая оценка)  
Европейского общества структурной целостности (ESIS)

Российский комитет ESIS

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» –  
филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

# **XVI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»**

Сборник материалов

(Екатеринбург, 16–20 мая 2022 г.)

Екатеринбург  
ИМАШ УрО РАН  
2022

УДК 620.17+620.16:620.18+620.19:620.179

ББК 34

XVI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» : сб. материалов (Екатеринбург, 16–20 мая 2022 г.). – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2022. – 214 с. – ISBN 978-5-6040873-3-6. – Режим доступа: <https://www.imach.uran.ru/conf2022/attend/psi/>

В сборнике представлены материалы международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», продолжающей традиции конференций «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» и «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», проводимых с 2001 г.

Сборник адресован специалистам различных научных специальностей: механиков, физиков, материаловедов и т. д., а также представителям промышленности, что объясняется междисциплинарным характером опубликованных докладов.

### **Организаторы конференции:**

МИНОБРНАУКИ России, УрО РАН, Технический комитет 17 (Неразрушающая оценка) Европейского общества структурной целостности (ESIS), Российский комитет ESIS, ИМАШ УрО РАН, ИФПМ СО РАН, ИФМ УрО РАН, ИМСС УрО РАН.

### **Оргкомитет:**

#### **Сопредседатели оргкомитета:**

Смирнов С.В. *Екатеринбург, Россия*; Седмак А. *Белград, Сербия*

#### **Зам. председателя оргкомитета:**

Швейкин В.П., *Екатеринбург, Россия*

#### **Члены оргкомитета:**

Батаев А.А., *Новосибирск, Россия*

Беляев А.К., *Санкт-Петербург, Россия*

Берто Ф., *Тронхейм, Норвегия*

Божич З., *Загреб, Хорватия*

Брезинова Ж., *Кошице, Словакия*

Буренин А.А., *Комсомольск-на-Амуре, Россия*

Вухерер Т., *Марибор, Словения*

Горячева И.Г., *Москва, Россия*

Дегтярь В.Г., *Миасс, Россия*

Индейцев Д.А., *Санкт-Петербург, Россия*

Колубаев Е.А., *Томск, Россия*

Ломакин Е.В., *Москва, Россия*

Марсавина Л., *Тимишоара, Румыния*

Марущак П.О., *Тернополь, Украина*

Матвеев В.П., *Пермь, Россия*

Матвеев Ю.Г., *Москва, Россия*

Мену А., *Касабланка, Марокко*

Миронов В.А., *Екатеринбург, Россия*

Морозов Н.Ф., *Санкт-Петербург, Россия*

Москвичев В.В., *Красноярск, Россия*

Мулюков Р.Р., *Уфа, Россия*

Палин-Люк Т., *Бордо, Франция*

Панин С.В., *Томск, Россия*

Прентковскис О., *Вильнюс, Литва*

Рейс Л., *Лиссабон, Португалия*

Сундер Р., *Бангалор, Индия*

Трампус П., *Будапешт, Венгрия*

Фомин В.М., *Новосибирск, Россия*

Ченцов А.Г., *Екатеринбург, Россия*

Шиплюк А.Н., *Новосибирск, Россия*

Якушенко Е.И., *Санкт-Петербург, Россия*

### **Программный комитет:**

**Председатель:** Просвиряков Е.Ю., *Екатеринбург, Россия*

#### **Зам. председателя программного комитета:**

Кузнецов А.В., *Екатеринбург, Россия*

#### **Члены программного комитета:**

Батаев И.А., *Новосибирск, Россия*

Берестова С.А., *Екатеринбург, Россия*

Буров С.В., *Екатеринбург, Россия*

Гладковский С.В., *Екатеринбург, Россия*

Дементьев В.Б., *Ижевск, Россия*

Коновалов А.В., *Екатеринбург, Россия*

Костин В.Н., *Екатеринбург, Россия*

Макаров А.В., *Екатеринбург, Россия*

Наймарк О.Б., *Пермь, Россия*

Плехов О.А., *Пермь, Россия*

Поволоцкая А.М., *Екатеринбург, Россия*

Пугачева Н.Б., *Екатеринбург, Россия*

Радченко В.П., *Самара, Россия*

Соболева Н.Н., *Екатеринбург, Россия*

Трусов П.В., *Пермь, Россия*

Худорожкова Ю.В., *Екатеринбург, Россия*

*Издается в авторской редакции. Ответственность за содержание и оформление представленных материалов несут авторы.*

ISBN 978-5-6040873-3-6



9 785604 087336

© ИМАШ УрО РАН, 2022 г.

© Авторы, 2022 г.

# **STIFFNESS DEGRADATION FATIGUE MODEL FOR POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

A. Elkin\*, V. Gaibel, I. Sergeichev

Center for Materials Technologies,

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow 143025, Russian Federation

Investigations of advanced polymer composites showed degradation of their stiffness and residual strength due to cyclic loading. To predict fatigue limit of composite parts and ensure structural integrity, we propose a multiaxial stiffness degradation material model, where multiaxial stress state is considered, and a degradation of tensile and compressive stiffnesses is analyzed separately. We implemented the material model as a user subroutine to the ABAQUS finite element software and performed virtual fatigue tests. Currently, the model was identified and verified by previously published fatigue data, and new testing procedures were proposed for further evolution of the model. Agreement with the test data indicated needs of separating tensile and compressive stiffness, because the considerable stiffness degradation occurred under compression due to accumulation of micro-cracks in matrix, causing delamination and buckling. The proposed fatigue model predicts stiffness degradation and fatigue limit of the laminates under biaxial stress state.

**APPLICATION OF THE NONLINEAR ELASTOPLASTIC MODEL  
WITH STRESS STATE DEPENDENCY FOR THE ANALYSIS  
OF THERMOPLASTIC COMPOSITE STRUCTURES.**

A. Fedorenko<sup>a, \*</sup>, B. Fedulov<sup>b</sup>, E. Lomakin<sup>b</sup>, I. Sergeichev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Skolkovo Institute of Science and Technologies, Center for Materials Technologies, 1  
21205, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, Russia

<sup>b</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics,  
119991, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, Russia

Nonlinearity of mechanical behavior with dependency on the stress state is inherent to composite materials. There are many examples of nonlinearity of fiber-reinforced plastics are widely presented in literature, including nonlinear shear and bimodular response in tension and compression. The modelling of such behavior commonly begins with the analysis of plasticity, damage and strain-rate influence on loading diagrams. This usually requires complex experiments, which are inappropriate for practical usage in industry. In the presented study a flexible modelling approach is presented, which requires the minimum experimental data for initiation, but allows reasonable enhancements with additional tests, e.g., biaxial loadings. In the proposed model, the stress state type is characterized by the stress triaxiality parameter, and the use of functional dependency on this parameter in elastic potential representation forms constitutive equations with dependency on loading conditions.

The model was implemented into ABAQUS finite element solver via a user material subroutine for practical usage. The application is demonstrated in the examples of thermoplastic composites for industry, for which the analysis on the base of linear model is inappropriate. The variety of the stress states, which are typical for considered structure, was investigated in order to evaluate what types of experiments are required to improve the accuracy of the model.

*The research was supported by Russian Science Foundation project number 21-19-00563.*

# **SURFACE-DISLOCATION INTERACTION AT THE NANOSCALE**

M. A. Grekov\*, T. S. Sergeeva

St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab.,  
199034, St. Petersburg, Russia

In the recent two decades, thousands of studies have used various continuum models of material surface to allow for the surface energy in many practical problems involving nanostructures, fracture, contact problems, etc. Most surface elasticity models in publications are simplified versions of the original Gurtin–Murdoch (GM) one. As a rule, selecting some of these models, authors don't adduce any reasons for such simplification.

The main objective of the paper is to collect different surface elasticity models related to the GM one and to compare the stress fields around the flat surface, which arise due to interaction of the periodic array of edge dislocations with the free surface. It is supposed that the semi-infinite elastic body is under the plane deformation and the dislocations can reach the distance to the surface up to several nanometers. For each model including the GM one, the boundary equation is separately formulated in terms of complex variables. The solution of the problem for all models is presented in terms of the Fourier series for the stress field. The effect of surface stresses on the elastic field around the dislocations and at the surface and on the image force is numerically investigated comparing results of all models considered.

**EXPERIMENTAL STUDY OF STRAIN-RATE DEPENDENCE  
OF UNIDIRECTIONAL FILAMENT WOUND CARBON/EPOXY  
COMPOSITE UNDER COMPRESSION**

S. D. Konev<sup>a,\*</sup>, A. Yu. Konstantinov<sup>b</sup>, A. V. Basalin<sup>b</sup>, I. V. Sergeichev<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Skolkovo Institute of Science and Technologies, Center for Materials Technologies,  
121205, Bolshoy Boulevard 30/1, Moscow, Russia

<sup>b</sup> Research Institute of Mechanics, Lobachevsky Nizhniy Novgorod State University,  
603600, Gagarin ave. 23/6, Nizhniy Novgorod, Russia

Strain-rate dependence of mechanical properties of fiber-reinforced composites is required for many applications involving exposure to impact loads. In order to analyze the dynamic compressive behavior of unidirectional carbon FRP, a validation of shapes and sizes of the specimens and fixtures is required for appropriate calculations and synchronization of stress and strain time plots.

In the present study, we propose a modification of classic split Hopkinson pressure bar setup to achieve the valid compressive failure modes in the specimen's gauge length sections under longitudinal and off-axis loading for strain rate up to 2000 1/s. C-fiber specimens were fabricated by filament winding. Shapes and sizes for the designed specimens were validated by finite element analysis of distributions of stress, strain, and damage parameters within the specimens gauge length during the pulse propagation within SHPB system. As a result, the stress and strain directly calculated in the specimens were compared to ones expressed through the SHPB relationships. High-speed imaging also confirmed the valid failure modes achieved for the given orientation of the specimens. Whereas the standard static tests demonstrated mean values 620 and 120 MPa of compressive strength for specimens loaded along and across fibers respectively, more than 50 % increase was observed under high strain rate.

*The research was supported by Russian Science Foundation <https://rscf.ru/en/project/21-19-00563>*

**FEATURES AND LIMITATIONS OF MAGNETIC  
PULSE METHOD FOR STUDYING OF HIGH STRAIN RATE  
DEFORMATION OF METALS**

S. I. Krivosheev<sup>a</sup>, D. I. Alekseev<sup>b</sup>, M. V. Manzuk<sup>b</sup>,

S. G. Magazinov<sup>a</sup>, E. S. Ostropiko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29, Russia

<sup>b</sup>JSC "D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus"

196641, Saint-Petersburg, Metallostroy, Doroga na Metallostroy, 3 bld. Russia

The high energy density of the magnetic field and a reliable and simple technique for monitoring its parameters make it possible to use the magnetic pulse method of generating controlled pressure pulses of microsecond duration with an amplitude of ~1 GPa to study the processes of deformation and fracture of materials/metals in various loading schemes.

A classification of methods for high strain rate deformation of conductive materials by magnetic-pulse loading is carried out and features of magnetic-induction and magnetic-force implementations of the method and limitations associated with Joule heating and inhomogeneity of current density distribution are revealed.

An analysis of the experimental results showed the applicability of the magnetic-pulse method for studying plastic deformation processes with strain rates up to  $10^4$  1/s and more and the possibility to formulate requirements for the magnetic system and pulse current sources.

# **STRENGTH AND THERMAL STABILITY CHARACTERISTICS OF GRAPHENE-REINFORCED LAYERED COMPOSITES BASED ON PURE RU AND ALLOY RU-PD**

E. D. Kurbanova, V. A. Polukhin

Institute of Metallurgy of UB RAS 620016, Russia, Yekaterinburg, st. Amundsen, 101

The results of MD simulation of thermoactivated relaxation and formation of metal/graphene interface structures, their disordering and destruction (analog of melting in low-dimensional systems) under further heating are summarized in the present article. The potential functions describing the interactions of the atoms Ru-Ru, Ru-Pd, as well as the interactions of the Ru, Pd atoms with the carbon of the graphene substrate have been estimated and parameterized using the Sutton-Chene quantum-mechanical immersed atom method. In contrast to a carbide-forming Ru film and an Ru-Pd alloy, the interface forms on the base Ru and Ru-Pd due to physical adsorption and van der Waals forces, where Pd atoms are located over graphene hexagonal C atoms with the minimum distortion of Pd-Pd bonds, rather than due to chemisorption. Also it was shown that the strength characteristics and the thermal stability of interfaces with graphene reinforced metallic films can be improved by the formation of both hydrogenated mutually related point defects and metallic complexes made of intercalated alloying atoms, which compensates for the deformation stresses in parametrically incommensurate configurations of unlike atoms.

*The work was carried out under the State Assignment of the IMET UB RAS in the framework of the Program of Fundamental Research of State Academies (topic 122013100200-2).*



# **DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC APPROACHES TO ASSESSING THE CYCLIC STRENGTH AND DURABILITY OF PIPES AND PRESSURE VESSELS CONTAINING SEMI-ELLIPTICAL SURFACE CRACKS**

Yu. G. Matvienko, D. O. Reznikov

Mechanical Engineering Research Institute, Maliy Kharitonevsky per., 4, 101000, Moscow, Russia

The article presents a numerical approach to estimating the probability of failure of structural components containing elliptical surface cracks, taking into account the statistical spread of the initial crack sizes, the parameters of the equations describing the kinetics of fatigue cracks, and the parameters that appear in the failure criteria of the considered structural components. The developed approach uses the method of statistical simulation (Monte Carlo method) and makes it possible to compare the results of the assessment of the cyclic durability of structural components under consideration for various initial crack configurations, as well as using various forms of kinetic equations and fracture criteria.

# TENSILE STRENGTH OF UNIDIRECTIONAL CARBON/EPOXY COMPOSITE UNDER SHOCK WAVE LOADING

I. Sergeichev<sup>a,\*</sup>, A. Fedorenko<sup>a</sup>, Y. Sudenkov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Skolkovo Institute of Science and Technologies, Center for Materials Technologies,  
121205, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, Russia

<sup>b</sup> Research Center of Dynamics, Saint Petersburg State University,  
198504, Universitetskiy ave., 28, Peterehof, Russia

Strain-rate dependency of fiber-reinforced composites subjected to dynamic tensile loading is required for many structural applications involving exposure to intensive impact loads. In the present study, the previously developed laboratory setup was adopted for shock wave loading of cylindrical filament wound carbon/epoxy specimens by electrical explosion of a thin copper conductor. To implement this technique, specimens were fabricated by circumferential winding of carbon fiber layers over Plexiglas rods with a diameter of 20 mm. The total thickness of the wound layers was 2 mm. The rods were cut into testing specimens of 30 mm long. Holes with a diameter of 1 mm were drilled along the axis of the cylinders to install the copper conductor with a diameter of 0.5 mm. The free surface speed of the specimens under explosion was measured by laser interferometer in radial direction and then circumferential tensile stress was calculated. It was assumed that the stress gradient is negligible inasmuch as the travel time of the shock wave through the thickness of the composite shell is several times less than the length of the loading pulse. As results, the failure stress was obtained for the discharge energies 0.9-1.9 kJ as 2200-3400 MPa. Considering the static longitudinal strength 1900 MPa, significant strain rate sensitivity can be mentioned in the microsecond loading range.

*The research was supported by Russian Science Foundation <https://rscf.ru/en/project/21-19-00563>.*

**HIGHER ORDER COEFFICIENTS OF THE WILLIAMS SERIES  
EXPANSION OF THE NEAR MIXED MODE CRACK TIP FIELDS BY ODM  
BASED ON EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD: STATE  
OF THE ART AND PERSPECTIVES**

V. Turkova

Samara National Research University, 443086, 34, Moskovskoye shosse, Samara, Russian Federation

The evaluation of stress intensity factors, T-stresses and higher order terms of the multi-parameter Williams expansion is one of the essential problems in linear elastic fracture mechanics. Accuracy of computations, number of terms which have to be taken into account and convergence of the analysis is important. This study aims at obtaining higher order coefficients of the Williams series expansion for the stress and displacement fields in the vicinity of the inclined crack tip in cracked specimens with the over-deterministic method. The higher-order terms up to 20-25 are kept. It allows us to give a more accurate description of the near-crack-tip stress field and extend the domain of validity for the Williams power series expansion.

To realize the finite over-deterministic method computational experiments with XFEM in CAE package Simulia Abaqus were performed. The developed technique provides possibility to use any number of contours surrounding the crack tip. Thus, one can formulate strongly over-deterministic system of equations in which number of unknown coefficients of the Williams series expansion is much less than the number of equations. The algorithm uses only stress tensor components to compute the stress intensity factors, T-stresses and coefficients of higher-order terms.

The comparison of the theoretically reconstructed and computational stress fields obtained by XFEM shows that the coefficients of the Williams series expansion are determined with high accuracy.

# МЕХАНОХИМИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНОМ ПОРОШКА Ti-Ni

Е. В. Абдульменова\*, С. П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИФПМ СО РАН), 634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Сплав  $Ti_2Ni$  является перспективным материалом для металлгидридных батарей. В работе изучен фазовый состав и структура порошка, полученного механохимическим легированием титаном с последующей термической обработкой порошка Ti-Ni. Содержание титана, вводимого в порошок Ti-Ni, варьировалось от 7 до 25 % масс. Механохимическое легирование проводили в планетарной шаровой мельнице со скоростью вращения барабана 1820 об./мин. Термическая обработка легированного порошка Ti-Ni осуществлялась в вакуумной печи при 1000 °С с изотермической выдержкой 30 мин. Методом рентгенофазового анализа показано, что после механохимического легирования и термической обработки порошки (Ti-Ni) – Ti состояли из фаз  $TiNi$  (B2, B19') и  $Ti_2Ni$  разного генезиса. Фаза  $Ti_2Ni$  (I) наследована из исходного порошка Ti-Ni. Параметр элементарной ячейки  $Ti_2Ni$  (I)  $a = 1,1283$  нм. Фаза  $Ti_2Ni$  (II) сформировалась в процессе механохимического легирования и термообработки. Параметр ячейки  $Ti_2Ni$  (II) уменьшался при увеличении содержания титана в порошке, от 1,1276 до 1,1269 нм. Выявлено, что максимальное содержание фазы  $Ti_2Ni$  формируется в порошковой смеси состава Ti-Ni (85% масс.) – Ti (15% масс.). Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что в процессе термической обработки порошков (Ti-Ni) – Ti, с увеличением введенного титана, средний размер частиц увеличивался с 9,6 до 19,2 мкм в процессе консолидации частиц.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО ВОЛОКНАМИ РАЗНОГО ДИАМЕТРА

Ю. А. Агабабян<sup>а, б</sup>, И. Г. Горячева<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Московский физико-технический институт (ГУ)

<sup>б</sup>Федеральное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики

им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)

Скорость изнашивания волокнистого композита в значительной степени определяется его структурой и прочностными характеристиками волокон и матрицы.

Рассмотрена износоконтактная задача в плоской постановке о скольжение жесткого индентора с плоским основанием по поверхности композитного материала, представляющей собой матрицу, армированную однонаправленными периодически расположенными волокнами разного диаметра. Проведен расчет скорости изнашивания композита в установившемся режиме и формы его изношенной поверхности. Изучено влияния прочностных свойств волокон и плотности их расположения в матрице на исследуемые характеристики

В ходе исследования определяются формы поверхности при установившемся износе при разных значениях безразмерных диаметров волокон и коэффициентов износа.

Полученные результаты могут быть использованы для управления структурой волокнистых композитов с целью повышения его износостойкости при заданных режимах трения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 19-19-0058).*

# **К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ**

М. А. Артемов, Ю. Н. Бабкина, Е. С. Барановский, Д. И. Соломатин

Воронежский госуниверситет, 394018, Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация

Предложен алгоритм решения задач определения напряженного и деформированного состояния круговых дисков и цилиндрических труб из упругопластического материала, подверженных воздействию комбинированной нагрузки. Предполагается, что приложенные внешние нагрузки вызывают малые деформации, которые равны сумме обратимых и необратимых деформаций. Упругие деформации связаны с напряжениями соотношениями закона Гука. Рассматриваются гладкие функции пластичности общего вида, зависящие от всех инвариантов тензора напряжений. Пластические деформации связаны с напряжениями соотношениями ассоциированного закона пластического деформирования. Выбор гладких функций пластичности позволяет избежать разрыва пластических деформаций характерного для кусочно-гладких функций пластичности при решении задачи плоского напряженного состояния, когда происходит смена несингулярных режимов пластичности, а функция пластичности является пластическим потенциалом. Для получения оценки значений внешних параметров, при которых происходит зарождение пластических зон, или переход объекта полностью в пластическое состояние, или появление области, где деформации могут стать не малыми, рассматриваются двумерные подпространства пространства внешних параметров. Для сравнения результатов численного решения ряда задач с известными решениями, основанными на выборе кусочно-линейных условий пластичности, рассматриваются гладкие функции, позволяющие с необходимой точностью аппроксимировать функции пластичности Треска и Ишлинского–Ивлева.

# МЕТОД ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Р. С. Ахметханов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова,  
101990, Малый Харитоньевский пер. 4, Москва, Российская Федерация

В докладе представлен метод оценки локальных пластических напряжений в деталях конструкций пассивным тепловым методом неразрушающего контроля. Основой возможности пассивного теплового контроля является термопластический эффект повышения температуры в области пластических деформаций. При нагружении конструкции в зависимости от наличия дефектов, концентраторов напряжений происходит перераспределение напряжений. Если в зонах упругих напряжений конструкция охлаждается, то при пластической деформации нагревается. Эти области хорошо видны на термограммах особенно при вязком разрушении конструкции. На термограммах можно проследить все стадии развития деформаций в образце и их локальные распределения. При этом области с повышенной температурой определяются концентраторами напряжений, дефектами и линиями скольжения.

В представленном методе выделяются остовы изображения термограммы в виде скелетных линий, определяются их температурные профили, что позволяет определить зоны с наибольшими значениями пластических деформаций и вид предполагаемого разрушения. В докладе рассмотрена тонкая пластина с отверстиями при одноосном растяжении. Также была проведена проверка на конечно-элементной модели в АНСИС.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СМЕШЕНИЯ**

**Р. С. Ахметханов**

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова,  
101990, Малый Харитоньевский пер. 4, Москва, Российская Федерация

В докладе представлен фотометрический метод анализа структуры многокомпонентной среды по изображению материала. Метод направлен на исследование особенности структуры материала, т.е. оценивается пространственная однородность и геометрические характеристики фаз составляющих материала - содержание наполнителя в материале; размер и форма частиц наполнителя, масштабная значимость размеров зерен и степень измельчения.

Для анализа структурных характеристик материала использованы следующие характеристики изображения и процедуры: выделение фаз, последующее измерение зерен (размеров), распределение по размерам в виде гистограммы и пространственного распределения по изображению материала, статический момент инерции сечения (оценка однородности пространственного распределения), фрактальная размерность и мультифрактальный спектр изображения структуры материала. Приведенный в докладе метод показан на примере двухкомпонентного композиционного материала (ПКМ) полученного технологией вибрационного смешивания.



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДЕФЕКТА В ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКЕ МЕТАМАТЕРИАЛА

Л. Р. Ахметшин

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634055, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Метаматериалы – это искусственно созданные материалы, обладающие необычными свойствами, чаще всего, не встречающимися в природе. При создании метаматериалов наибольшее внимание уделяется созданию структур на микроуровне и выше, а не химическому составу базового составляющего материала. Исследование влияния микроархитектуры метаматериалов на их эффективные свойства позволяет создать уникальные многофункциональные материалы путем целенаправленной модификации их микроструктуры для достижения требуемых свойств.

Одна из разновидностей метаматериалов основана на хиральных структурах. Хиральность – это свойство предмета не накладываться на свое зеркальное отображение, и она бывает лево или право сторонней. Благодаря такой структуре, хиральные метаматериалы способны скручиваться при одноосном нагружении. Расположение тетрахиральных структур в трехмерном образце из метаматериала позволяет влиять на его эффективные свойства. Например, можно ввести топологический дефект в элементарную ячейку – тетрахиральную структуру, имеющую отличную от остальных хиральность. Это можно обнаружить, раскладывая грани кубической элементарной ячейки на одну плоскость. Численное исследование одноосного нагружения элементарных ячеек с регулярным расположением тетрахиральных структур и с введенным топологическим дефектом позволило выявить влияние дефекта на механический отклик образца. Внедренный топологический дефект увеличил угол скручивания в одном из направлений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.*

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННОЙ СЕКЦИИ ПУТЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ OPENFOAM**

Е. С. Байметова

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
426069, ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, Российская Федерация

Большой класс современных пакетных Open source технологий позволяет проводить достаточно точные численные расчеты теплогидравлических характеристик теплообменных аппаратов, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам. Работа выполнена на примере многосекционной коллекторной системы маслоохладителя, который является одним из широко распространенных и эффективных видов теплообменных аппаратов используемых для охлаждения теплоносителя. На основе численного моделирования в пакете OpenFOAM теплогидравлических характеристик теплообменной секции с развитой внешней поверхностью было проведено исследование течений и теплообмена, а так же влияния на них конструктивных особенностей радиаторов (множественное внешнее и внутреннее оребрение).

В результате численных экспериментов приведен ряд оптимальных геометрических характеристик теплообменной секции. Так установлено, что оптимальная длина канала для высоты плоской трубы с шестью внутренними каналами шириной 1 мм составляет – 226 мм при шаге оребрения 2 мм с высотой ребра 7,45 мм.

В ходе работы были определены теплогидравлические характеристики многосекционного коллектора с развитой внешней поверхностью, не прибегая к натурному эксперименту, а так же разработан ряд рекомендаций для устранения конструкторских недостатков для наиболее эффективной работы маслоохладителя.

# **ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ, ИНИЦИИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ, НА РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЦИРКОНИЕВЫХ МИШЕНЕЙ**

А. Н. Балахнин<sup>а, \*</sup>, С. В. Уваров<sup>а</sup>, И. А. Банникова<sup>а</sup>, А. Н. Вшивков<sup>а</sup>,  
А. Е. Прохоров<sup>а</sup>, И. А. Глухов<sup>б</sup>, А. Ю. Ерошенко<sup>б</sup>,  
Ю. П. Шаркеев<sup>б</sup>, О. Б. Наймарк<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614013, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Исследованы закономерности деформирования и разрушения сплава циркония в условиях динамического воздействия, инициированного лазерным импульсом. В качестве мишеней использовались диски диаметром 13 мм, толщиной 0,9 мм из циркониевого сплава Э110. Ударно-волновое нагружение мишени осуществлялось путем однократного воздействия импульсом лазера Beamtech SGR-Extra-10 со следующими параметрами: энергия импульса до 10 Дж, длительность импульса 10 нс, пятно контакта – квадрат со стороной 1 мм. В ходе эксперимента производилось измерение скорости тыльной поверхности образца с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR. Изучение внутренней структуры материала осуществлялось на металлографических шлифах в поперечном сечении образца в зоне воздействия в направлении распространения ударной волны.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности локализации внутренних повреждений, предшествующих отколу в циркониевом сплаве Э110, в исследованном диапазоне интенсивностей воздействия. Установлено соответствие результатов структурных исследований по распределению локализованной пористости с изменениями акустического импеданса по данным VISAR, предшествующей стадии формирования откола.

*Исследования выполнены в соответствии с проектом РНФ № 21-79-30041 и государственным заданием ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0004.*

# **КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ**

**О. В. Балина, В. В. Нассонов**

Тюменский индустриальный университет,  
625000, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, Российская Федерация

Превышение допустимых механических напряжений, вызывающих пластическую деформацию, является одним из самых распространенных механизмов повреждения металлоконструкций. В связи с чем, обнаружение такого рода дефектов на ранней стадии всегда является актуальной задачей.

Работа посвящена изучению применения магнитного коэрцитиметрического метода для обнаружения участков пластической деформации и оценке напряженного состояния металлоконструкций.

Исследования выполнены на сварных образцах из элементов металлоконструкций мостов из стали 09Г2С. В ходе эксперимента установлены статистический разброс значений коэрцитивной силы ( $H_c$ ) в пределах партии металла одной плавки и зависимость изменения коэрцитивной силы от механических растягивающих напряжений, пластической деформации и твердости основного металла и зоны термического влияния.

При анализе экспериментальных данных апробирован метод оценки напряжений в долях от предела текучести материала с учетом анизотропии коэрцитивной относительно растягивающей нагрузки.

Полученные результаты позволяют определять величины упругих напряжений с относительной погрешностью 25 % и пластической деформации от 0,2 %.

# ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ И ПОКРЫТИЙ

Р. Р. Балохонов, В. А. Романова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Методом пошагового заполнения созданы трехмерные структуры композитов с однородной (ОМ) и поликристаллической матрицей (ПМ). Краевые задачи в динамической постановке решаются в ABAQUS Explicit. Развита изотропная и анизотропная упругопластические модели типа Дюамеля–Неймана с учетом систем скольжения и модели разрушения частиц и матрицы. Проведены расчеты растяжения и сжатия композитов из начального состояния, а также после охлаждения.

Показано, что трещины зарождаются в областях объемного растяжения и распространяются вдоль направления сжатия и перпендикулярно направлению растяжения композита. Прочность композита ниже при растяжении, чем при сжатии. В результате охлаждения композита керамические частица объемно сжимаются, а матрица сжимается и растягивается, причем в матрице вокруг частицы образуется область чистого сдвига с высокими значениями остаточных напряжений. ПМ препятствует образованию сквозных трещин при последующем механическом нагружении композита благодаря распределенным концентрациям напряжений вблизи границ зерен. Сжимающие остаточные напряжения в частице играют положительную роль, задерживая формирование и развитие трещин и повышая прочность композита.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00273).*

# ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

А. А. Батаев\*, И. А. Батаев

Новосибирский государственный технический университет,  
630073, пр-т К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Российская Федерация

В докладе представлены результаты собственных работ авторов в области применения дифракции синхротронного рентгеновского излучения для *in-situ* и *operando* исследований поведения микроструктуры материалов при реализации различных методов воздействий. В частности, описывается применение современных методов профильного анализа для исследования эволюции микроструктуры материалов в условиях трения, а также деформации и нагрева. Описывается возможная концепция станций для решения материаловедческих задач на строящемся синхротроне четвертого поколения «СКИФ». Поскольку именно материаловеды являются одной из наиболее многочисленных групп пользователей современных источников синхротронного излучения, то появление специализированных «материаловедческих» станций на источнике «СКИФ» представляется естественным развитием этого проекта. Независимо от специализации ученых-материаловедов объединяет необходимость получения максимально разнообразной информации о структуре изучаемого объекта. Таким образом, возможность совмещения определенного набора взаимодополняющих методов исследования в рамках одной станции представляется чрезвычайно актуальной задачей.

# ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛА И БЕТОНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

С. П. Батуев\*, П. А. Радченко, А. В. Радченко

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

В работе представлены результаты численного исследования взаимодействия цилиндра из кварцевого стекла с жесткой стенкой, взаимодействия стального шарика с пластиной из силикатного стекла и взаимодействие цилиндрического ударника с бетонной преградой. Задачи решаются методом конечных элементов, в трехмерной постановке в рамках феноменологического подхода механики деформируемого твердого тела. Для расчетов используется авторский программный комплекс EFES и алгоритм, позволяющий проводить параллельные вычисления с высокой производительностью на сложных геометрических объектах. Для описания процессов разрушения и трещинообразования материалов и конструкций использовалась модель JH-2, позволяющая учитывать высокие скорости деформации и большие давления, возникающие в материале. Используемый алгоритм расчета учитывает образование несплошностей материала и разрушение материала с образованием новых свободных поверхностей.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-21-20091)*

# МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ ПЛАСТИНЫ С ОДНИМ БОКОВЫМ НАДРЕЗОМ И ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ

О. Н. Белова\*, Л. В. Степанова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева,  
443086, ул. Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Разрушение материалов происходит из-за образования, слияния и распространения дефектов и трещин. Количественно критическое состояние последних описывается континуальной механикой разрушения. Однако континуальная теория перестает работать на нано уровне, где следует учитывать особенности кристаллического строения материала. Чтобы изучить природу разрушения на нано масштабе можно использовать метод молекулярной динамики (МД).

В работе проведено атомистическое компьютерное моделирование распространения бокового надреза в пластине с одним боковым надрезом в условиях смешанного нагружения. МД моделирование выполнено в программном комплексе LAMMPS (Large-scale Atomistic/Molecular Massively Parallel Simulator).

Представлен способ определения коэффициентов асимптотического разложения М. Уильямса полей напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) на основе результатов МД моделирования. В исследовании получены КИН для некоторых параметров смешанности нагружения с помощью переопределенного метода. Проведен анализ влияния выбора области атомов и временного шага на значения коэффициентов.

Выполнено сравнение полей напряжений вблизи вершины трещины и КИН полученных из атомистического моделирования и из конечно-элементного решения в Abaqus. Показано, что результаты атомистического моделирования хорошо согласуются с численным конечно-элементным решением.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта № 20-31-90082*



# **ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА ШТАМПУЕМОСТЬ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА**

С. А. Берестова\*, Е. М. Романовская, К. В. Серков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Листовые материалы обладают ярко выраженной анизотропией упругих и пластических свойств, которая определяет их дальнейшее использование. Анизотропией можно управлять, создавая благоприятную текстуру. Для оценки штампуемости листовых материалов важным техническим показателем анизотропии механических свойств является коэффициент нормальной пластической анизотропии, который определяется отношением приращений пластических деформаций по толщине и по ширине плоского образца, вырезанного под фиксированным углом, при его одноосном растяжении в области равномерной деформации. Меняя преимущественную ориентацию кристаллографических осей (текстуру), можно увеличить способность листовых материалов к глубокой вытяжке. В работе для металлических листов установлена аналитическая связь коэффициента нормальной пластической анизотропии с соответствующими параметрами текстуры и степенью анизотропии монокристалла. В качестве примеров вычислены коэффициенты для листов малоуглеродистой стали. Экспериментальные данные о текстуре материала и об измеренных и рассчитанных различными способами значениях коэффициента нормальной пластической анизотропии были взяты из независимых источников.

# ИЗГИБ НАНОБАЛКИ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ

А. О. Бочкарев

Санкт-Петербургский государственный университет,  
199804, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Наноразмерные тонкостенные структуры находят все большее применение при изготовлении в различного рода сенсоров, акселерометров, резонаторов и т.п. Механические свойства таких структур проблематично исследовать экспериментально, а классические континуальные модели уже не работают. И здесь наномеханика предлагает новые континуальные подходы, которые совместно с классическим позволяют строить двумерные и одномерные модели таких наноструктур, что находит подтверждение и молекулярно-атомистическим моделированием. Одним из таких подходов является поверхностная упругость.

Различными методами было замечено, что одна из основных упругих характеристик, модуль Юнга, для одного и того же материала у нанобъекта и у макрообъекта отличаются. Его корректировку позволяет осуществить эффективный модуль Юнга с помощью поверхностных напряжений, предложенных Гуртином и Мердохом. На их основе были предложены многочисленные модели изгиба нанопластин и нанобалок. Однако оказалось, что модуль Юнга при растяжении и изгибе наноструктуры тоже отличается, и это уже не может быть объяснено с позиции одних только поверхностных напряжений. Проблему позволяют разрешить поверхностные моментные напряжения Стейгманна и Огдена. В докладе предлагается модель изгиба нанобалки с учетом поверхностных напряжений и моментов. Разобраны тестовые задачи.

# **КОНЦЕНТРАЦИОННО-ЗАВИСИМАЯ ДИФФУЗИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРАХ: НЕУСТОЙЧИВОСТИ И СТРУКТУРЫ**

Д. А. Брацун

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
914990, Комсомольский проспект, 29 г. Пермь, Российская Федерация

Двухслойная система двух смешивающихся растворов, начинающая свою эволюцию из отдельного состояния и помещенная в поле тяжести, может испытывать разнообразные виды конвективной неустойчивости. В докладе обсуждаются эффекты, связанные с концентрационно-зависимой диффузией растворенных компонент, влияние которой в литературе ранее систематически игнорировалось. Многие наблюдаемые явления, которые не получали своего объяснения в рамках традиционной теории диффузии, было принято связывать с кросс-диффузией компонент. Мы показываем на примере ряда конкретных смешивающихся систем, как реагирующих, так и химически инертных, что такое игнорирование указанных эффектов было неверным. Вся совокупность представленных результатов свидетельствует, что концентрационно-зависимая диффузия должна быть выведена из тени кросс-диффузии как самостоятельное отдельное явление, наблюдаемое в многокомпонентных растворах.

В докладе проводится обзор работ автора, посвященных концентрационно-зависимой диффузии, обсуждаются управляющие уравнения, приводятся аналитические, численные и экспериментальные результаты, полученные автором и его коллегами по данной тематике.

# МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХЕМОМЕХАНИКИ КЛЕТОЧНОЙ ТКАНИ: РЕШЕННЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Д. А. Брацун\*, И. В. Красняков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
914990, Комсомольский проспект, 29 г. Пермь, Российская Федерация

Развитие компьютерных технологий привело к тому, что возникли условия для реалистичного имитационного моделирования хемобиомеханики клеточной ткани, в рамках которой воспроизводится как средняя динамика ткани, как целого, так и отслеживается поведение каждой отдельной клетки. В работе описывается математическая модель квазидвумерной клеточной ткани (например, эпителия). Ткань состоит из клеток, представленных динамически меняющимися многоугольниками. Модель включает в себя два важных процесса, которые имитируют свойства реальных клеток: митотическое деление и интеркаляцию клеток. Для каждой вершины клетки-многоугольника записывается уравнение движения, основанное на эластичной потенциальной энергии. В ходе эволюции ткань стремится занять положение, отвечающее минимуму потенциальной энергии. Модель допускает простое обобщение на случай обратной связи между биомеханическими и химическими свойствами среды (например, процессами генной регуляции в клетках), введения нескольких конкурирующих типов ткани (например, раковой опухоли), трехмерной клеточной ткани.

Приводится обзор уже рассмотренных авторами задач, а также обсуждаются перспективы развития данного подхода к моделированию.

# ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ УГЛЕРОДНЫХ ИМПЛАНТАТОВ ПО ДАННЫМ МИКРОРЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

А. М. Игнатова<sup>а, \*</sup>, А. Н. Балахнин<sup>а</sup>, М. В. Банников<sup>а</sup>, К. Э. Купер<sup>б</sup>,  
А. С. Никитюк<sup>а</sup>, О. Б. Наймарк<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614013, ул. Ак. Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

<sup>б</sup> Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, пр-т Ак. Лаврентьева, 11, г. Новосибирск, Российская Федерация

Остеоинтеграция имплантатов из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) определяется факторами, среди которых особенно значимыми являются механические свойства и пористость. Механические свойства УУКМ взаимосвязаны с пористостью, которая характеризуется не только общей долей пор в материале, но и расположением элементов пористости относительно друг друга. Таким образом, определение характеристик пористости УУКМ необходимо для выявления структурных характеристик имплантатов, обеспечивающих оптимальную остеоинтеграцию. Характеристики пористости в исследовании устанавливали микрорентгеновской томографией, с помощью анализа изображений определяли приведенный диаметр, объем и расположение элементов пористости относительно друг друга. Расположение оценивалось через величину расстояния между элементами пористости, угол их ориентации и показатель равномерности распределения. Исследование показало, что диаграмма в координатах «угол ориентации – равномерность распределения» является показательной для оценки иерархической структуры пористости и оценки изменения структуры пористости при различном механическом воздействии, а диаграмма в координатах «расстояние между элементами пористости – отношение площади поверхности к объему элемента пористости» является показательной для критических параметров пористости, при которых механические свойства материала, могут осложнять его остеоинтеграцию.

*Исследования проведены в соответствии с госконтрактом № 122012400263-7.*

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Т. А. Брусенцева, С. Э. Лукин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, ул. Институтская 4/1, г. Новосибирск, Российская Федерация

В настоящей работе разработан новый композитный материал на основе эпоксидной смолы и фотолюминесцентной добавки. Полученный композиционный материал после воздействия на него дневного или искусственного освещения излучает свет в течение нескольких часов, тем самым виден в ночное время суток.

Для получения опытных образцов, фотолюминесцентный порошок с помощью ультразвукового диспергатора замешивался в эпоксидную матрицу, далее производилась полимеризация. Концентрация порошка варьировалась от 0 до 5 % массовой концентрации. Исследованы прочностные характеристики в режиме трехточечного изгиба на испытательной установке Zwick Roell Allround Z005. Микромеханические испытания по определению микротвердости и карт распределения приведенного модуля упругости осуществлялась с помощью наноиндентора Наноскан-4D.

В результате экспериментов получены зависимости модуля упругости, напряжения при разрушении, микротвердости от концентрации наполнителя и определены области, в которых реализуется наилучшее сочетание свойств полимерного композита. Введение фотолюминесцентного порошка обеспечивает композиту достижение новых, не свойственных ненаполненному полимеру характеристик.

# ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ НА СУЩЕСТВОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОЙ КОНВЕКЦИИ ДЛЯ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ ПРОТЯЖЕННОМ СЛОЕ

Н. В. Бурмашева<sup>а, б, \*</sup>, Е. Ю. Просвиряков<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Конвективные процессы в вязкой жидкости играют важную роль в различных технологических процессах: как при переносе тепла жидкими теплоносителями, так и, например, при формировании сварного соединения в процессе лазерной сварки. Традиционно для описания тепловой конвекции в вязкой несжимаемой жидкости используется модель, состоящая из уравнений Навье-Стокса, уравнения несжимаемости и уравнения теплопроводности. Это пять скалярных уравнений для определения пяти неизвестных функций, три из которых определяют поле скорости течения, две оставшиеся – распространение тепла и распределение давления. В случае сдвиговых течений (т. е. течений, в которых две компоненты вектора скорости существенно преобладают над третьей) число функций, подлежащих определению, становится на одну меньше, но при этом число уравнений модели остается прежним. Таким образом, возникает проблема переопределенности: решения отдельных уравнений модели могут не согласовываться решениями других ее уравнений.

Ранее авторами было подробно исследованы способы получения условий совместности решений уравнений рассматриваемой системы в классе функций, линейных по части координат. Но в предыдущем исследовании изучалось течение в инерционных системах отсчета, т.е. системах без учета вращения. В данном докладе основное внимание будет уделено вопросам разрешимости системы уравнений тепловой конвекции в случае, когда вращение описывается одним параметром Кориолиса.

# **АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ, ОПИСЫВАЕМОГО ПОЛНОЙ КУБИКОЙ ДВУХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ, В ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ О СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ СЛОЕ**

Н. В. Бурмашева<sup>а, б, \*</sup>, Е. Ю. Просвиряков<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

При моделировании сдвиговых изотермических течений вязкой несжимаемой жидкости приходится перед непосредственным анализом точного решения установить факт его существования, поскольку число уравнений модели превышает число неизвестных функций, описывающих поведение гидродинамических полей. Авторами была разработана методика получения условий совместности, при выполнении которых соответствующая система уравнений Навье-Стокса имеет решение. В это условие совместности входят вторые производные поля давления по части пространственных координат. Исследования, проводимые ранее, касались, преимущественно, задач с квадратичным (по части пространственных координат) полем давления. В результате чего в построенных условиях совместности члены, связанные с давлением, не зависели от данных пространственных координат.

Однако эксперименты, проводимые в различных областях науки и техники, говорят о том, что поле давления порой имеет очень нетривиальное распределение по области течения жидкости. В связи с этим авторами предпринята попытка смоделировать данное поле в виде кубики по части пространственных координат. Показано, что коэффициенты этой кубики при членах второго и выше порядков будут постоянными функциями, определяемыми краевыми условиями. Зависимость от оставшихся пространственных координат будет иметь место только в коэффициентах при линейных и однородных членах.



# **ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦЕ КОНТАКТА СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В СЛОЕ С ГИДРОФОБНОЙ И СВОБОДНОЙ ГРАНИЦАМИ**

Н. В. Бурмашева<sup>а, б, \*</sup>, Е. А. Ларина<sup>а, б</sup>, Е. Ю. Просвиряков<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В работе исследуется краевая задача, описывающая сдвиговое изотермическое течение двуслойной вертикально завихренной вязкой несжимаемой жидкости в тонком слое. Полагаем, что геометрические и физические параметры каждого слоя (толщина слоя, плотность и динамическая вязкость) могут быть различны. Фактически, рассматривается модельное представление стратифицированной вязкой несжимаемой жидкости с кусочно-постоянными функциями плотности и вязкости. На нижней границе слоя задано условие идеального скольжения (т. е. речь идет о контакте с гидрофобной твердой поверхностью). На верхней границе задано поле касательных напряжений. Выбор данного граничного условия обоснован тем, что касательное напряжение является одним из самых распространенных факторов, не воздействующих на изменение свойств жидкости, но вызывающих ее движение. На общей границе двух слоев потребовано выполнение условий равенства скоростей и напряжений.

Показано, что для непротиворечивости выбранных условий необходимо, чтобы верхняя граница была свободной (т. е. поле напряжений должно быть нулевым). Кроме того, условие идеального скольжения и задание касательных напряжений – это условия на производные искомым компонент поля скорости. Значит, необходимо выбрать дополнительное условие для построения частного точного решения, отвечающего физике процесса. Основное внимание в докладе будет уделено обсуждению вариантов при выборе этого дополнительного условия и анализу точного решения, полученного с его учетом.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ  
КОМПОНЕНТ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧЕ  
О КОНВЕКТИВНЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЕРТИКАЛЬНО  
ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ СЛОЕ**

Н. В. Бурмашева<sup>а, б, \*</sup>, А. В. Дьячкова<sup>а, б</sup>, Е. Ю. Просвиряков<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Во многих технических процессах важную роль играет движение используемых вязких жидкостей. Вместе с жидкостями могут переноситься различные фрикционные частицы, производится перераспределение тепла и давления. Реальные жидкости являются вихревыми. При неравновесном воздействии в них постоянно происходят конвективные процессы, причем не только тепловой, но и, например, диффузионной природы. Интенсивность данных конвективных процессов зависит от многих факторов, в том числе и от задаваемых на границах области течения условий.

В докладе рассматривается сдвиговое конвективное течение вязкой несжимаемой вертикально завихренной жидкости, индуцированное неравномерным распределением тепла. Полагается, что течение происходит между гидрофильными твердыми параллельными поверхностями, движущимися относительно друг друга с заданной неоднородно распределенной (по пространственным координатам) скоростью. Основное внимание уделено возможности возникновения точек стратификации (расслоения) поля давления и температурного поля. Построены и проанализированы характерные профили компонент указанных полей в зависимости от выбранных комбинаций краевых параметров задачи.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТНОГО АНИЗОГРИДНОГО ЭЛЕМЕНТА

А. Е. Буров, Е. В. Москвичев

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
660049, просп. Мира, 53, г. Красноярск, Российская Федерация

Композитные анизотридные элементы широко используются в несущих конструкциях современных космических аппаратов. Их основное преимущество по сравнению со сплошными аналогами определяется весовой эффективностью, которая обусловлена сочетанием высоких удельных показателей механических свойств композитов и сетчатой топологией. Несмотря на то что методы проектирования и анализа анизотридных конструкций достаточно хорошо разработаны, некоторые аспекты их механического поведения требуют дополнительных исследований. Прежде всего это относится к моделированию возможных предельных состояний и прогнозированию несущей способности при различных видах нагружения.

В настоящей работе выполнено численное моделирование деформирования и разрушения композитного анизотридного элемента, спицы рефлектора космических антенн зонтичного типа, при кручении, чистом изгибе и осевом сжатии. Анализ выполнен на основе алгоритма прогрессирующего разрушения, который связывает зарождение и развитие повреждений с деградацией механических свойств композита. Выполненные исследования показали эффективность анализа прогрессирующего разрушения в прогнозировании прочности и живучести анизотридных структур.

# ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ВТОРИЧНОГО ЦЕМЕНТИТА В ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

С. В. Буров, Ю. В. Худорожкова

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Избыточный цементит в заэвтектоидной стали является значимой фазой с позиции обеспечения механических свойств. Определяющим для уровня свойств является морфология избыточного цементита. Настоящая работа посвящена EBSD-анализу избыточного цементита в заэвтектоидной углеродистой стали, имеющей одновременно избыточный цементит в игольчатой и сетчатой форме. На основании данных EBSD-анализа выявлено, что в пределах границы между двумя зернами бывшего аустенита цементит поликристаллический и состоит из нескольких «плоских» зерен. Это свидетельствует о множественном зародышеобразовании цементита в области границ аустенитных зерен. Ориентация зерен цементита в сетке зачастую совпадает с ориентацией игл цементита внутри бывшего аустенитного зерна. Из литературных данных известно, что образование игольчатой морфологии избыточного цементита связывает взаимную ориентацию цементита и аустенита, из которого он выделяется, ориентационными соотношениями. На основании этого логично предположить, что зародыш цементита сетчатой морфологии при охлаждении заэвтектоидной стали образуется по ориентационному соотношению к одному из аустенитных зерен.

# ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. А. Варьян<sup>а, б, \*</sup>, Н. Н. Колесникова<sup>а</sup>, А. А. Попов<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, 620049, ул. Косыгина, 4, 119334, г. Москва, Российская Федерация

<sup>б</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, индекс, 117997, Стремянный пер., 36, г. Москва, Российская Федерация

Большое значение имеет разработка биоразлагаемых полимеров, которые могут легко разлагаться обычными типами микроорганизмов. Перспективной стратегией для достижения этой цели является включение в синтетическую полимерную матрицу натуральных добавок, которые обеспечивают питательную среду для привлечения микроорганизмов к поверхности полимера и тем самым инициируют процесс его биodeградации. В работе представлены результаты по использованию натурального каучука в качестве добавки к полиэтилену низкой плотности с целью создания полимерного компаунда для быстрого биоразложения в почве. Для изучения процесса биоразложения образцы помещали в лабораторную почву и оценивали степень разложения по степени потери веса с течением времени. Физические и химические свойства образцов контролировались несколькими методами, включая испытание на растяжение, оптическую микроскопию, дифференциальную сканирующую калориметрию и другие. Было показано, что присутствие натурального каучука значительно увеличивает скорость разложения композитов на основе полиэтилена. Также на основе комплексного исследования физико-химических свойств было показано, что все исследованные образцы полимерных композитов на основе полиэтилена с добавками натурального каучука обладают удовлетворительными механическими свойствами. Таким образом, можно сделать вывод, что использование натурального каучука в качестве добавки является эффективным методом производства биоразлагаемых материалов на основе полиэтилена.

# **МАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМУ СОСТОЯНИЮ ТРУБОПРОВОДА**

О. Н. Василенко<sup>а</sup>, В. Н. Костин<sup>а</sup>, К. Е. Мызнов<sup>а\*</sup>, Д. В. Скворцов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,

620108, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», г. Екатеринбург, Российская Федерация

Оценка напряженно-деформированного состояния объектов газотранспортной инфраструктуры является важной и довольно давно изучаемой проблемой. Существуют и практически используются различные методы оценки напряженно-деформированного состояния протяженных объектов, такие как тензометрические, акустические, магнитостатические и магнитодинамические методы. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки.

В данной работе были проведены исследования по выявлению зависимостей магнитных параметров на различных участках действующего трубопровода от напряженно-деформированного состояния исследуемых объектов. Измерения проводились с помощью магнитного мультитестера ММТ-3 (Дефектоскопия. – 2020. – V. 7. – P. 21–27). В результате анализа полученных данных было обнаружено, что участки трубопровода, характеризующиеся повышенным значением коэффициента нагружения, отличаются от ненагруженных участков пониженными значениями коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции.

# ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ $TiB_2$ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

## КЕРАМИКИ $AlMgB_{14}$

Я. Ю. Верхошанский, Д. А. Ткачев, И. А. Жуков

Томский государственный университет, 634050, пр. Ленина, д. 36, г. Томск, Российская Федерация

В работе описаны результаты исследований композиционного материала  $AlMgB_{14}-TiB_2$  с различным содержанием  $TiB_2$ . Образцы были получены методом искрового плазменного спекания. Целью исследования являлось изучение влияния добавки  $TiB_2$  на механические свойства  $AlMgB_{14}$ . Исследование механических свойств производилось путем определения предела прочности методом Бразильского теста. По результатам испытаний определена прочность при разрыве керамик  $AlMgB_{14}-TiB_2$  с варьируемым содержанием  $TiB_2$  при температурах 24 и 250.

Согласно результатам испытаний выявлено, что введение  $TiB_2$  способствует существенному повышению прочности керамики  $AlMgB_{14}-TiB_2$ . При увеличении доли  $TiB_2$  до 70 масс. %, предел прочности керамики на растяжение возрастает в 3 раза по сравнению с исходной керамикой  $AlMgB_{14}$ . Также было установлено, что увеличение температуры испытаний до 250 приводит к повышению прочностных характеристик до 59 % относительно результатов, полученных при испытаниях при комнатной температуре. По результатам растровой электронной микроскопии было определено, что все образцы системы  $AlMgB_{14}-TiB_2$  характеризуются композитной структурой, представленной включениями  $AlMgB_{14}$  в матрице  $TiB_2$ .

# **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ СУЛЬФИДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

И. Н. Веселов<sup>а</sup>, А. Н. Мальцева<sup>б</sup>, Е. К. Скобелина<sup>а</sup>, О. В. Варнак<sup>а</sup>

<sup>а</sup> АО «РусНИТИ», 454139, ул. Новороссийская, 30, г. Челябинск, Российская Федерация

<sup>б</sup> ООО «ТМК НТЦ», 121205, ул. Большой бульвар, 5, г. Москва, Российская Федерация

В работе рассмотрено влияние структурных факторов на стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением (СРН) низколегированной хромомолибденовой трубной стали.

Основная сложность при разработке сталей для производства труб, используемых на сероводородсодержащих месторождениях, состоит в обеспечении как высокой прочности, так и стойкости к СРН, поскольку достижение последней в высокопрочном состоянии является сложной научно-технической задачей. Одним из условий, позволяющих обеспечивать стойкость трубной продукции к СРН, является формирование в процессе деформации и термической обработки (закалки с высоким отпуском) однородной мелкозернистой микроструктуры при минимальной структурной неоднородности.

В работе использован разработанный АО «РусНИТИ» метод оценки микроструктурной (карбидной) полосчатости для контроля однородности микроструктуры трубных сталей, подвергаемых закалке с высоким отпуском.

Результаты исследований методом оптической микроскопии образцов, обладающих разным уровнем стойкости к СРН, позволяют судить, что микроструктурная полосчатость является важным, но не определяющим структурным фактором, обеспечивающим стойкость трубной продукции к СРН. При достижении удовлетворительного уровня микроструктурной полосчатости материала труб, следует учитывать также такие параметры, как чистота по неметаллическим включениям, мелкозернистость и однородность микроструктуры, тип, размер и равномерность распределения карбидных частиц.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО РОСТА ТРЕЩИН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В. Э. Вильдеман, А. И. Мугатаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Рассматривается возможность моделирования процессов деформирования и разрушения тел с трещинами с позиций механики закритического деформирования. Отмечена аналогия между подходами механики распространения трещин и основанной на использовании полных диаграмм деформирования феноменологической механики разрушения. Существует ряд моделей, предполагающих наличие зоны с ослабленными связями в области концентратора. Авторы утверждают, что существует корреляция между характером распределения напряжений вблизи вершины трещины и полной диаграммой деформирования материала.

Приводятся результаты численного моделирования межслойного разрушения композитного образца с использованием когезионных элементов. Продемонстрирована реализация полной диаграммы деформирования у вершины трещины. Показано, что развитие зоны закритического деформирования у вершины трещины сопровождается ростом внешней нагрузки; с момента роста трещины внешняя нагрузка уменьшается при кинематическом нагружении. Выявлена связь между модулем спада материала и максимальными значениями внешней нагрузки, а также величиной раскрытия и длиной пророщенной трещины. Отмечено влияние жесткости нагружающей системы на момент срыва с диаграммы нагружения. Сделан вывод о целесообразности рассмотрения задач моделирования процессов деформирования и разрушения конструкций с трещинами с позиций механики закритического деформирования.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00765) в ПНИПУ.*

# **МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМООБРАБОТАННОГО ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ**

**И. В. Виндокуров<sup>\*</sup>, М. А. Ташкинов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Быстрая разработка и внедрение новых передовых технологий производства привели к успешной замене металлических конструкций на их пластиковые аналоги для ряда приложений. По сравнению с другими известными технологиями, аддитивное производство (АП) обеспечивает большую гибкость для локального проектирования структуры изделий на основе разработанных цифровых моделей. Параметры процесса АП могут существенно повлиять на механическое поведение изготовленных деталей. Следовательно, важно точно определить механические свойства материалов после печати, такие как модуль упругости, предел прочности при растяжении и другие. Для точного численного моделирования структур и деталей АП необходимо учитывать не только особенности материала, но и влияние параметров печати на его свойства. Основной целью данной работы является исследование влияния угловой ориентации нити накала на механические характеристики при растяжении и разрушении термообработанных образцов полиэфирэфиркетона (ПЕЕК), полученных методом FFF/FDM. Представлены сравнительные результаты механических свойств образцов до и после термической обработки.

# МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Д. И. Вичужанин\*, С. В. Смирнов

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Пределная пластичность материалов в большинстве случаев определяется величиной степени деформации до разрушения. Данная величина зависит от вида напряженного состояния, а также от уровня напряжений (растягивающих или сжимающих), преобладающих в процессе деформации. В значительном количестве работ она описывается как функция коэффициента напряженного состояния  $K$  (соотношение первого и второго инвариантов тензора напряжений) и коэффициента Лоде–Надаи  $\mu$  (или угла Лоде). Данная функция входит в ряд моделей поврежденности, которые позволяют оценить деформационную способность материалов.

Наиболее распространенным способом оценки предельной пластичности в условиях плоской деформации является испытание на кручение цилиндрического образца. Однако данный вид испытаний осуществляется при постоянном  $K = 0$  (в условиях плоской деформации коэффициент  $\mu$  также равен нулю) и не позволяет исследовать предельную пластичность материала в широком диапазоне значений  $K$ .

В данной работе предложены относительно простые образцы, методы их испытаний и обработки экспериментальных данных, которые позволяют исследовать предельную пластичность материалов в условиях плоского деформированного состояния в достаточно широком диапазоне изменения значений коэффициента напряженного состояния  $-1 < K < 1$ .

# СПЕКЛ-ДИАГНОСТИКА НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИВОЙ И НЕЖИВОЙ МАТЕРИИ

А. П. Владимиров

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

На основе модели тонкого деформируемого прозрачного объекта, освещенного через случайно – фазовый экран, а также модели отражающего шероховатого деформируемого объекта, освещенного лазерным излучением, решены задачи о динамике спеклов в плоскости изображения объектов. В предположении, что разность оптических путей  $\Delta u$  двух волн равна сумме  $M$  случайных независимых величин  $\Delta u_m$ , получены формулы, связывающие параметры, характеризующие флуктуации  $\Delta u_m$  и флуктуации интенсивности рассеянного излучения  $I$  в плоскости наблюдения. Полученные формулы использованы для изучения необратимых процессов, протекающих с разной скоростью 1) на стадии зарождения трещины при много-циклового усталости материалов, 2) в живых клетках, а также 3) в турбулентном потоке воздуха. Разработана методика выделения из зависимости  $I(t)$  сигналов  $I_m(t)$ , соответствующих процессам  $\Delta u_m(t)$ , а также процедура определения дисперсии  $\sigma_m^2$  и времени корреляции  $\tau_m$  величин  $\Delta u_m$ . Приведены зависимости  $\sigma_m(\tau_m)$ , зарегистрированные 1) на стадии зарождения усталостной трещины в стали 09Г2С, 2) для группы культивированных клеток и для разных частей отдельной клетки, 3) на стадии формирования и стационарного течения турбулентного потока. На основе полученных данных рассмотрены перспективы создания оптических и неоптических методов неразрушающего контроля нового поколения.

# УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОДНОВИТКОВОГО СОЛЕНОИДА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

К. В. Волошин, В. В. Титков\*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251 ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены процессы разрушения монолитного одновиткового соленоида при многократной генерации импульсов сильного магнитного поля с амплитудой 15–40 Т, длительностью 10–100 мкс.

Исследование закономерностей разрушения индукторов сильного импульсного магнитного поля представляет интерес при создании электрофизических и технологических магнитных систем многократного использования. Наряду с вызываемыми пластические деформации индуктора электромагнитными силами, резкий поверхностный эффект приводит к появлению интенсивных температурных напряжений в поверхностном слое проводника.

Процессы циклических деформаций индуктора исследованы с помощью математической модели на основе нестационарных уравнений электромагнитного поля, теплопередачи и механики упругопластической сплошной среды. Показано, что в общем случае воздействия сильного импульсного магнитного поля на стенку проводника существуют два возможных режима разрушения при циклическом процессе генерации импульсов сильного магнитного поля: накопление остаточной деформации и малоцикловая усталость в поверхностном слое проводника. При этом первый из них ограничивает ресурс индуктора на уровне сотен импульсов. При колебательных импульсах магнитного поля с относительно малым затуханием при амплитудах индукции ниже 20 Т ресурс оценивается величиной  $10^3$ – $10^4$  импульсов.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН**

Р. И. Воробьев<sup>а</sup>, И. В. Москалев<sup>б</sup>, И. Ш. Ахатов<sup>а</sup>, И. В. Сергеичев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Сколковский институт науки и технологий, Большой бульвар д. 30, стр. 1, Москва 121205, Россия

<sup>б</sup> ООО «Тесис», ул. Юннатов, дом 18, оф. 705, Москва, 27083, Россия

Прогнозирование проницаемости полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеет важное значение в экспериментальной практике и производстве. Утвержденные численные методы определения проницаемости ПКМ позволяют прогнозировать неравномерность потока и другие потенциальные дефекты во время изготовления. ПКМ на основе углеволокна имеют значительно меньший эффективный диаметр волокна, а также более низкое поглощение рентгеновских лучей, чем широко исследованные ПКМ на основе стекловолокна, что в конечном итоге делает процесс анализа материалов с углеволокном для изучения структурных свойств чрезвычайно сложным. В данной работе с использованием ПКМ на основе Toray T700 и эпоксидной смолы были извлечены образцы для КТ-визуализации и сегментации отдельного набора 2D-срезов, поперечных направлению волокна. После реконструкции модели было выполнено численное моделирование проницаемости вдоль и поперек волокон с помощью комбинированного метода конечных объемов. Компоненты тензора проницаемости были рассчитаны с помощью решения соответствующих краевых задач в рамках трехмерного закона Дарси. В результате была предложена методика эффективной оценки компонент тензора проницаемости ПКМ.

# ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАЗРУШЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕЗОУРОВНЕ

Д. Д. Гатиятуллина<sup>а, б, \*</sup>, Р. Р. Балохонов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Томский государственный университет, 634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

В настоящей работе исследуется влияние остаточных термических напряжений на деформацию и разрушение металлокерамического композиционного покрытия на мезоскопическом масштабном уровне. Криволинейные границы раздела в композиционных материалах являются концентраторами напряжений, вблизи которых зарождаются микротрещины. Для учета криволинейной формы керамических частиц в численных расчетах было рассмотрено экспериментальное изображение композиционного покрытия. Динамические краевые задачи решаются методом конечных элементов в программном пакете ABAQUS/Explicit. Остаточные напряжения возникают в металлокерамических композитах и покрытиях при охлаждении после спекания за счет разницы коэффициентов термического расширения. Выявлены области растягивающих локальных напряжений в металлической матрице. Проведены расчеты растяжения и сжатия структур с различной объемной долей керамических частиц. Установлено, что при растяжении композита остаточные сжимающие напряжения в частицах, возникающие после охлаждения, играют положительную роль, поскольку замедляют появление первых трещин.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 18-19-00273, <https://rscf.ru/project/18-19-00273/>).*

# ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

Р. М. Герасимов, Ф. С. Попов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Работа посвящена формулировке математической модели для описания эффекта прерывистой пластичности (Портевен-Ле Шателье (ЭПЛШ)) в Al-Mg сплавах. ЭПЛШ в экспериментах обычно наблюдается на диаграммах одноосного растяжения: диаграмма имеет пилообразную форму при кинематическом нагружении и ступенчатую форму при силовом нагружении. Основной причиной возникновения прерывистой пластичности является взаимодействие атомов примесей с дислокациями. Наиболее эффективными для изучения ЭПЛШ в последние десятилетия признаются многоуровневые модели, основанные на физических теориях пластичности. Модели физически теорий пластичности могут охватывать все необходимые пространственные масштабы, начиная с атомарного. В предлагаемой работе для построения модели используется метод атомарной динамики, который является мощным инструментом для рассмотрения физических механизмов, происходящих на уровне атомарных масштабов, позволяющим получить как качественные, так и количественные результаты, применимые при построении ОС в континуальных или дискретно-континуальных моделях. С использованием разработанной модели получены результаты по описанию «захвата» примесных атомов краевыми дислокациями; качественные и количественные оценки по взаимодействию краевых дислокаций и примесных атомов с точки зрения силовых и энергетических полей в сплавах Al-Mg.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (базовая часть государственного задания, проект № FSNM-2020-0027).*



# **ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ УДАРНЫМ НАГРУЗКАМ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, АРМИРОВАННОГО ВОЛОКНАМИ И ПОРОШКОМ КАРБИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

**А. А. Гольшев**

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, Российская Федерация

В работе проведены пионерские работы по получению металлокерамического композитного материала методом аддитивных технологий с использованием волокна SiC и частиц керамики SiC в качестве армирующих элементов и сплава Ti64. При аддитивном выращивании методом SLM и DMD использовался волоконный лазера IPG, максимальной мощностью 3 кВт. Проведены уникальные исследования стадийности поврежденности (кратерообразование) и перехода к разрушению формируемого материала при высокоскоростном соударении создаваемого с помощью электродинамического ускорителя масс. Использование керамики SiC приводит к образованию вторичных фаз в отличие от волокон SiC в металломатричном композите. Полученный результат объясняется дополнительным защитным слоем с высоким содержанием углерода, для уменьшения фазовой сегрегации. Показано, что применения керамического волокна, металлическую матрицу глубина кратера уменьшилась на 22 % и составляет 1137 мкм по сравнению с частицами, где глубина кратера составляет 1437 мкм. Покрытие с керамическими волокнами в отличие от керамических частиц, обеспечивает более эффективное рассеяние кинетической энергии индентора по всему объему образца, а не только вблизи точки воздействия ударника.

*Работа выполнена при поддержке РФФ 21-79-10213.*

# **ЗАСТОЙНЫЕ ТОЧКИ НЕОДНОРОДНОГО РЕШЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩЕГО КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОКЕАНА**

А. В. Горшков, Е. Ю. Просвиряков

ИМАШ УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г Екатеринбург, 620049, Россия

В работе получено неоднородное аналитическое решение, описывающее слоистое крупномасштабное конвективное течение Экмана вязкой несжимаемой жидкости в экваториальной зоне. Исследуется множество застойных точек этого решения. На границах потока жидкости задана температура. На свободной границе заданы касательные напряжения, моделирующие воздействие ветра. На твердой поверхности заданы условия скольжения жидкости Навье.

Решение построено в виде функций, линейных по горизонтальным координатам с коэффициентами, зависящими от вертикальной координаты. Коэффициенты линейных функций получены в виде полиномов.

Получено условие совместности переопределенной системы уравнений, описывающей указанное течение. Условие совместности накладывает ограничения на граничные условия. Показано, что множество застойных точек лежит на прямой.

# ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА В ПРИПОЛЮСНОЙ ОБЛАСТИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА БЕТА-ПЛОСКОСТИ

А. В. Горшков, Е. Ю. Просвиряков

ИМАШ УрО РАН, ул. Комсомольская, 34, г Екатеринбург, 620049, Россия

В работе построено аналитическое решение уравнений Навье-Стокса, описывающих изотермическое течение вязкой несжимаемой жидкости по поверхности Земного шара в приполюсном районе. При описании течения используется гипотеза  $\beta$  – плоскости.

Решение построено в виде функций, линейных по горизонтальным координатам с коэффициентами, зависящими от вертикальной координаты. Для определения коэффициентов функций построено линейное дифференциальное уравнение пятого порядка. Так как общих формул для определения корней алгебраического уравнения пятого порядка не существует, то построено асимптотическое разложение характеристических чисел дифференциального уравнения по малому параметру, равному отношению толщины слоя жидкости к радиусу Земли. Полученное решение является обобщением решения Экмана, построенного с использованием гипотезы  $f$  – плоскости. Получено приближение угла Экмана с учетом эффекта  $\beta$  – плоскости.

# ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ: АЛГОРИТМ И ПРИМЕНЕНИЕ

Д. С. Грибов, Ф. С. Попов, Е. А. Чечулина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ),  
614990, просп. Комсомольский 29, г. Пермь, Российская Федерация

Неустойчивое пластическое деформирование в разбавленных твердых растворах обычно связывают с эффектом Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) – появлением повторяющихся скачков напряжений при деформировании с постоянной скоростью, обусловленных формированием областей (полос) интенсивных пластических деформаций. Наиболее предпочтительными для анализа прерывистой текучести являются методы и подходы, основанные на математическом моделировании.

В работе для описания эффекта ПЛШ предлагается учитывать два механизма: 1) «сбор» атомов примесей движущимися дислокациями, 2) диффузия атомов примесей к временно остановленным на препятствиях дислокациям. В процессе движения с различными средними скоростями дислокации взаимодействуют с примесными атомами по различным сценариям: может происходить «сбор» и «сброс» атомов примеси, стекание атомов примеси к заторможенным дислокациям на различных препятствиях по второму механизму. Сформулированные соотношения: скорость изменения концентрации атомов примеси и вклад в критические напряжения со стороны атомов примеси, демонстрируют качественное соответствие с экспериментальными данными.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 20-79-10235).*

# **СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЩЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО СЖАТИЯ НА МЕЖСЛОЕВЫЕ СДВИГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТКАНЕВЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

К. А. Гусейнов\*, О. А. Кудрявцев, С. Б. Сапожников

Южно-Уральский Государственный университет,  
454080, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, Российская Федерация

При оценке прочности толстостенных конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ) необходим корректный выбор критерия прочности для полной реализации прочностного потенциала материала. В то же время, множество существующих критериев прочности согласуются с различными экспериментальными данными с разной степенью достоверности. Сложность проведения двухосных испытаний и интерпретации полученных результатов затрудняют надежную оценку сдвиговой прочности материала при комбинированном нагружении, что, в свою очередь, заставляет использовать повышенные коэффициенты запаса и снижает весовую эффективность конструкции.

В данной работе было выполнено сравнение экспериментальных методов определения межслоевых сдвиговых характеристик тканевых ПКМ в условиях трансверсального сжатия с использованием стандартной испытательной машины. Сочетание межслоевых сдвиговых и трансверсальных сжимающих напряжений варьировали двумя способами: путем изменения угла вырезки кубических образцов и путем нагружения в оснастке образцов с V-образным надрезом под разными углами. Полученные экспериментальные значения межслойной прочности в условиях трансверсального сжатия были сопоставлены с теорией Дэниела. Результаты испытаний образцов с V-образным надрезом продемонстрировали хорошее согласие с кривой разрушения, в отличие от экспериментальных значений межслойной прочности, полученных на кубических образцах с разной схемой вырезки.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ  
ПРОЧНОСТИ СИСТЕМНО-ЛЕГИРОВАННЫХ  
МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

Д. А. Двойников, С. В. Гладковский, А. Г. Залазинский,  
В. Г. Титов, В. П. Швейкин

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН,  
620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Показана эффективность применения методов искусственного интеллекта для многокритериальной оптимизации химического состава с целью достижения наилучшего комплекса механических свойств и характеристик трещиностойкости системно-легируемых мартенситно-стаеющих сталей (ЭП678, ЭП679, ЧС92) на Fe-Cr-Ni-Mo-основе. Анализ нелинейной зависимости механических характеристик сталей данного класса от химического состава выполнен методом нейросетевого моделирования, которое позволило определить влияние малых добавок легирующих элементов (Mo, Ti, Al, Cu, C, Ni, Cr и V) на предел текучести, временное сопротивление, ударную вязкость и статическую трещиностойкость. Задача оптимизации химического состава сталей с использованием обучающей выборки искусственной нейронной сети на основе экспериментальных данных сводится к определению химического состава легирующих элементов стали, при котором её механические характеристики максимально приближены к координате с компромиссными значениями  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ , KCU, K<sub>1C</sub>.

# **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, АРМИРОВАННЫХ НЕПРЕРЫВНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ**

Д. А. Долгих\*, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, Российская Федерация

Аддитивное производство является одним из наиболее перспективных решений в задачах, связанных с изготовлением структур со сложной геометрией. Улучшение механических свойства аддитивно изготовленных изделий возможно за счет добавления армирующих элементов. Использование непрерывных волокон в сочетании с полимерной матрицей является перспективным методом получения новых 3D-печатных композитных материалов с превосходными физико-механическими свойствами. Важным аспектом в архитектуре таких композитов является расположение армирующих волокон в термопластичной матрице. В связи с этим проблема сочетания матрицы и армирующих волокон, а также выбор оптимальной топологии структуры имеют решающее значение.

Целью данной работы является исследование некоторых образцов структур, состоящих из различных типов полимерной матрицы с внедренными препрегами из углеродных волокон. Расчет эффективных параметров препрега из углеродного волокна выполнен с использованием метода гомогенизации среднего поля. Численный анализ проводился с помощью метода конечных элементов. Исследовано влияние топологии распределения волокон на механические характеристики и распределение полей напряжений в образцах композита. Проведено исследование оптимального расположения армирующих элементов для некоторых частных случаев исходной геометрии изделий и распределения нагрузки.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С РАЗЛИЧНОЙ ОБЪЕМНОЙ ДОЛЕЙ ЧАСТИЦ

Е. П. Евтушенко\*, Р. Р. Балохонов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Оптимизация структуры и состава композиционных материалов на основе металлических матриц и высокопрочной керамики является актуальной задачей современного структурного дизайна и разработки перспективных материалов нового поколения. Разработана методика генерации структур композитов с нерегулярной формой упрочняющих частиц. Созданы двухфазные трехмерные структуры с различной объемной долей карбида бора в алюминиевой матрице. Для описания механической реакции материалов частиц и матрицы используются модели изотропной упругости, пластичности и разрушения. Краевые задачи решаются численно в динамической постановке с помощью программного пакета Abaqus/Explicit. Проведены численные эксперименты по охлаждению структур композитов с различной объемной долей частиц от температуры рекристаллизации до комнатной температуры и последующему растяжению, либо сжатию. Исследовано влияние объемной доли керамики и свойств металлической матрицы (чистый алюминий, сплавы Al6061, Al6061T4 и Al6061T6) на формирование остаточных напряжений, локализацию пластической деформации, а также зарождение и распространение трещин в частицах и матрице.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00273).*



# **АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Н. В. Еленская\*, М. А. Ташкинов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, Российская Федерация

Технологии аддитивного производства (3D-печать) открывают широкие возможности для создания и производства структур со сложной геометрией и оптимальными свойствами. Потребность в эффективных, легких и одновременно прочных конструкциях может быть удовлетворена с использованием периодических и непериодических решетчатых структур. Конструкционные системы такого плана обладают большим потенциалом для применения в широком диапазоне задач – от современных инженерных устройств до биомедицинских приложений, например в области ортопедии, где решетчатые пористые скаффолды нередко применяются в качестве подходящих заменителей поврежденной костной ткани.

Данная работа направлена на исследование механического поведения градиентных решетчатых структур, с геометрией на основе трехмерных трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП). Рассмотрены несколько однородных и градиентных решетчатых моделей с различными параметрами градиента и геометрией на основе поверхности Шоена G (гиرويد). Проведена валидация численных моделей с помощью данных, полученных экспериментально с использованием метода корреляции цифровых изображений и видеосистемы Vic-3D Micro-DIC. Представлены результаты численного моделирования деформационного поведения исследуемых структур при одноосном сжатии. Изучено влияние параметров структуры и свойств градиента на механическое поведение.

# **УСТАЛОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ЛЕЖАЩЕЙ НА ЖЕСТКОМ ЛОЖЕМЕНТЕ**

И. Г. Емельянов, Д. А. Огорелков\*

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В добывающих отраслях нефтегазовой промышленности широко используются многопролетные трубопроводы с опорами ложементного типа. В зоне контакта трубопровода с опорой возникают контактные напряжения, которые могут изменяться в зависимости от вида нагружения, создаваемые внутренним давлением трубопровода, весовой и ветровой нагрузкой. Задача оценки ресурса таких конструкций является актуальной технико-экономической задачей, способной не только предотвратить техногенную и экологическую катастрофы, но и выполнить экономию материала. В работе представлен метод расчета на усталость стальной цилиндрической оболочки, соответствующей параметрам реальной конструкции трубопровода, опирающейся на жесткий либо упругий ложемент. Расчет на усталость выполнен в зоне контактных напряжений, определенных решением контактной задачи для оболочки и основания ложементного типа. При расчете на усталость оболочки использовалась линейная гипотеза суммирования повреждений и предложенная ранее модель циклической деградации материала, которая экспериментально доказана для ряда сталей.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В АЛЬФА-ТИТАНЕ

Е. С. Емельянова<sup>а, б, \*</sup>, М. А. Писарев<sup>а, б</sup>, В. А. Романова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

Численно и экспериментально исследуется зависимость мезомасштабного деформационного рельефа от локальных деформаций в технически чистом титане. На основе данных EBSD анализа методом пошагового заполнения были сгенерированы трехмерные поликристаллические модели со структурой и текстурой, характерных для листового титана и различных зон поперечного сечения титанового прутка. Определяющие соотношения физической теории пластичности с учетом упруго-пластической анизотропии и особенностей дислокационного скольжения в гексагональных кристаллах были применены для описания отклика зерен.

Расчеты одноосного растяжения поликристаллической модели показали качественное и количественное согласие картин деформационного рельефа с экспериментальными данными. Отклонение пиков и впадин от среднего уровня, а также характерный период частотных составляющих профилограмм при одинаковых степенях деформации варьировались в одинаковых пределах в эксперименте и расчете. Качественное и количественное согласие было получено для экспериментальных и численных зависимостей интенсивности деформационного рельефа от степени деформации, а также кривых нагружения, что свидетельствует о корректности построенной модели.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00600).*

# **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ, ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ТРЕЩИН**

**Р. М. Жаббаров\*, Л. В. Степанова**

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
443086, ул. Московское шоссе, 34 г. Самара, Российская Федерация

Целью работы является теоретическое, численное и экспериментальное построение многопараметрического разложения Уильямса поля напряжений вблизи вершины трещины в пластине с системой коллинеарных трещин и оценка влияния высших приближений в разложении Уильямса на описание напряженно-деформированного состояния у вершины трещины. Посредством аналитического решения задачи о деформировании пластины с системой трещин были определены коэффициенты разложения Уильямса поля напряжений. Показан важный вклад высших приближений: чем больше расстояние от кончика трещины, тем больше слагаемых в разложении Уильямса требуется удерживать. С помощью цифровой фотоупругости вычислены коэффициенты разложения Уильямса поля напряжений у вершины трещины в пластине с периодической системой трещин. Рассмотрены задачи нормального отрыва и смешанного нагружения выбранной конфигурации. Установлено, что выбор количества учитываемых в многопараметрическом разложении Уильямса слагаемых зависит от выбора расстояния от вершины трещины – чем дальше находится выбранная точка от вершины трещины, тем большее количество слагаемых требуется удерживать. В многофункциональном пакете SIMULIA Abaqus проведен численный эксперимент с целью определения напряженно-деформированного состояния вблизи трещины для подобной конфигурации. Сравнение результатов аналитического, экспериментального и численного решений подтверждает необходимость учета высших приближений для более точной оценки напряжений вблизи вершины трещины.

# ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХСЛОЙНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА С ПОКРЫТИЕМ

А. В. Землянов<sup>а, б, \*</sup>, Р. Р. Балохонов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Томский государственный университет, 634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

Формирование поверхностных упрочненных слоев, а также нанесение композиционных покрытий являются важными технологическими процессами. От структуры и состава таких слоев или покрытий будет зависеть долговечность, износостойкость и прочность обрабатываемых изделий. В данной работе численно исследуется термомеханическое поведение двухслойного композиционного металлокерамического покрытия. Основная цель работы – выявить влияние градиентной структуры, которую образуют два слоя, состоящие из керамических частиц, обладающие различными свойствами (коэффициент термического расширения, предел прочности при растяжении, модуль Юнга). Двумерные динамические краевые задачи решаются методом конечных элементов с помощью программного пакета Abaqus/Explicit. Проведены численные расчеты с учетом остаточных термических напряжений (ОТН). ОТН моделируются с помощью введения шага, на котором происходит уменьшение температуры структуры от 350 градусов до комнатной температуры, после чего прикладывается механическая нагрузка. Получены результаты расчетов для двух случаев расположения слоев: когда более прочные керамические частицы в верхнем слое покрытия, а менее прочные – в нижнем и наоборот. Проведено сравнение макроскопической прочности материала с двухслойным покрытием и материала с однослойным покрытием, которое содержит одни и те же керамические частицы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 18-19-00273, <https://rscf.ru/project/18-19-00273/>).*

# СОЗДАНИЕ БИОАКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ НА ТИТАНЕ С ДВУХУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЕЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА НАНО- И МИКРОУРОВНЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДЛЯ КОСТНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Е. Г. Земцова, Е. Орехов, В. К. Кудымов, В. М. Смирнов, Н. Ф. Морозов

Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504, Университетский пр., 26, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Для создания костных имплантатов с использованием титановых материалов остро стоит вопрос о создании биоактивных покрытий, обеспечивающих их быстрое приживание.

На скорость срастания титановых имплантатов с костной тканью существенное влияние оказывает степень модификации поверхности имплантатов основанная на изменении рельефа или химического состава поверхностного слоя, а так же комбинирование двух этих подходов.

В данной работе исследовалась возможность создания композитных покрытий обладающих двухуровневой иерархией рельефа поверхности на микро- и наноуровне с биоактивными и бактерицидными свойствами, которые перспективны для костной имплантации. Была разработана методики темплатного электрохимического синтеза композиционного покрытия с направленным регулированием структуры поверхности титана на основе диоксида титана, серебра и гидроксипатита. Исследования показали, что композитное покрытие состава  $TiO_2/Ag/Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$  с островковообразной микроструктурой и размером пор 5-20 нм обладает значительным цитологическим ответом и способностью к ускоренному остеосинтезу. Также было показано, что покрытие не приводит к ухудшению механических характеристик титановой матрицы.

Таким образом, разработанный биоматериал может быть использован для изготовления имплантатов с улучшенными биомедицинскими свойствами для стоматологии и ортопедии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 22-21-00573.*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА

В. А. Зими́на\*, И. Ю. Смолин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр-т. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Известно, что многокомпонентные композиты обеспечивают лучшие характеристики и даже новые свойства по сравнению с двухфазными композитами. В связи с этим представляет интерес изучение механических свойств и особенностей разрушения этих материалов при различных внешних воздействиях. В работе численно исследованы упругие и прочностные характеристики трехкомпонентного композита  $Al_2O_3-ZrB_2-SiC$  в условиях одноосного растяжения. Компьютерная модель мезообъема композита построена на основе экспериментальных данных (РЭМ изображение) и включает в себя матрицу  $Al_2O_3$ , поры и включения  $ZrB_2$  и  $SiC$ . Численное моделирование выполнялось в рамках механики деформируемого твердого тела с использованием соотношений изотропной упругопластической среды Друкера-Прагера. Определение эффективных механических свойств композита основано на анализе численных усредненных диаграмм нагружения.

В результате моделирования показано, что трещины зарождаются в областях с высокой концентрацией напряжений, обусловленной формой и расположением пор. Разрушение в матрице  $Al_2O_3$  происходит под действием растягивающего давления, в то время как во включениях – при накоплении неупругой деформации. Также изучено влияние доли включений  $SiC$  в диапазоне от 0 % до 34 % на эффективные упругие свойства композиционного материала. Отмечается слабая зависимость модулей упругости от увеличения объемной доли  $SiC$  в рассматриваемом диапазоне.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003.*

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНА ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ

Я. Н. Иванов<sup>а, \*</sup>, В. С. Чудинов<sup>б</sup>, И. Н. Шардаков<sup>б</sup>,  
А. Ю. Беляев<sup>б</sup>, И. А. Морозов<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
614068, ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация

<sup>б</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614013, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

В процессе ионно-плазменной обработки полимеров на их поверхности формируется карбонизированный слой, который обладает хорошей биосовместимостью. При плазменной обработке реального медицинского изделия 3D-формы имплантация ионов происходит под разными углами к поверхности. Данная работа посвящена исследованию механических и структурных характеристик карбонизированного слоя, полученного методом имплантации ионов азота высокой энергии под разными углами к поверхности полиуретана. Карбонизированный слой исследовался с помощью атомно-силовой и оптической микроскопий, а также при выполнении макромеханических испытаний одноосного растяжения модифицированных плазмой образцов материалов. По результатам исследований получены характеристики жесткости и морфологии поверхности углеродного слоя, сформированного при разных дозах, энергиях и углах потока ионов к поверхности образца.

Были определены зависимости модуля Юнга поверхностного углеродного слоя от режимов плазменной обработки в экспериментах одноосного растяжения макро образцов. Эти результаты позволили сформулировать выводы о разной жесткости поверхности углеродного слоя, сформированного при разных углах потока ионов. Были получены пороговые значения разрушающей деформации при статическом нагружении для углеродного слоя, созданного при различных режимах ионно-плазменной обработки. Оценен вклад углеродного покрытия в макромеханические свойства полимерного образца.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 20-48-596014 р\_НОЦ\_Пермский край.*



# **ОПИСАНИЕ КРИВЫХ УСТАЛОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ПЕРЕХОДА К КРИТИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЯМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ**

А. И. Мугатаров, В. Э. Вильдеман, О. А. Староверов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Рассматривается возможность аппроксимации полученных экспериментально кривых усталостной чувствительности интегральными функциями распределения вероятности. Предложено использование двухпараметрического распределения Вейбулла. Выведены уравнения, отражающие зависимость остаточной прочности (жесткости) и скорости накопления поврежденности от предварительного циклического воздействия. На их основе введены новые параметры материала, определены границы стадий накопления повреждений.

Приведена методика обработки экспериментальных данных для определения параметров кривой усталостной чувствительности. Обработаны экспериментальные данные изменения жесткости и прочности образцов стеклопластика после предварительного циклического воздействия. Рассчитаны введенные параметры. Продемонстрирована высокая описательная способность предложенной модели. Сделан вывод о целесообразности использования интегральных функций распределения вероятности для описания кривых усталостной чувствительности.

*Работа проводилась в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027) при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых МК-1545.2022.4.*

# **О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТАРЕЮЩИХ ТРУБ С ПОКРЫТИЯМИ И ВТУЛОК, ИМЕЮЩИХ СЛОЖНЫЕ ПРОФИЛИ**

К. Е. Казаков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
119526, пр-т Вернадского, 101-1, г. Москва, Российская Федерация

Для увеличения срока службы изделий, а также для обеспечения термической или электрической изоляции, часто используются покрытия, свойства которых отличаются от свойств тела, на которые они наносятся. Покрытия могут иметь довольно сложный профиль, структуру, обладать неоднородностью, пористостью и т.д. Все это влияет на величину напряжения в областях контакта с другими элементами конструкций. В работе рассматривается задача контактного взаимодействия вязкоупругой стареющей трубы с наружным упругим покрытием и системы жестких втулок в случае, когда профили контактирующих поверхностей переменны (толщина покрытия и внутренний диаметр втулок зависят от координаты вдоль оси, совпадающей с осью трубы). Для поставленной задачи приведена ее математическая модель, представляющая из себя систему смешанных интегральных уравнений относительно неизвестных контактных давлений. Аналитическое решение задачи построено на основе специального подхода, который позволяет получить такой вид решения, в котором функции, описывающие формы контактирующих поверхностей, выделены отдельными слагаемыми и множителями. Такое представление позволяет производить эффективные и точные расчеты, даже в случае, когда толщина покрытия и формы втулок описываются быстро изменяющимися функциями.

# О ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРОВ

К. Е. Казаков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
119526, пр-т Вернадского, 101-1, г. Москва, Российская Федерация

Современные технологии позволяют производить изделия, структура и свойства материалов которых изменяется от точки к точке. Наличие неоднородных свойств может обеспечить прочность и износостойкость в сочетании с небольшой массой, необходимой теплопроводностью и т.д. Это расширяет сферу применения изделия. Толстые цилиндры широко используются в промышленности. Нефтегазовые трубопроводы, сантехнические трубы, буровые трубы, сайлентблоки являются примерами использования цилиндров. Чтобы улучшить некоторые свойства такого цилиндрического тела, можно производить его из нескольких слоев, либо использовать технологии, которые позволяют получить неоднородную трубу. Данная работа посвящена построению аналитических решений краевой задачи для бесконечного осесимметричного радиально-неоднородного упругого полого цилиндра. Математической моделью такой задачи является однородное обычное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами и двумя дополнительными условиями. Для определенных комбинаций функций, описывающих упругие характеристики, возможно построение аналитического решения. В работе рассмотрены несколько таких случаев. Показан процесс построения, приведены окончательные формулы, сделаны практические выводы.

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПО ВРЕМЕНИ УЛЬТРАЗВУКА

Е. А. Казанцева<sup>а, б, \*</sup>, Е. Г. Комарова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, пр. Ленина 36, г. Томск, Российская Федерация

В работе были исследованы морфология, структура, состав и свойства кальций-фосфатных (КФ) покрытий на поверхности титана, осажденных методом микродугового оксидирования (МДО) в условиях приложенного ультразвука (УЗ) в различные периоды времени процесса. Были выбраны четыре режима нанесения покрытий: 1) контрольный режим МДО без приложенного УЗ в течение 10 мин; 2) процесс МДО без приложенного УЗ в начальные 2 мин и МДО с приложенным УЗ в последующие 8 мин процесса; 3) процесс МДО с приложенным УЗ в начальные 8 мин и МДО без УЗ в последующие 2 мин процесса; 4) процесс МДО без приложенного УЗ в первые 2 мин и в последние 2 мин, и МДО с УЗ в течение промежуточных 6 мин процесса. Показано, что толщина покрытий (50-60 мкм), элементный состав (Са 4,5-5,0 ат.%; Р 14,5-15,5 ат.%; Ti 10,5-11,5 ат.%; О 67,5-70,5 ат.%) и фазовый состав, а также размеры структурных элементов (сферы) на поверхности покрытий не зависят от приложенного УЗ в различные промежутки времени процесса МДО и близки к таковым для покрытий, полученных в контрольном режиме. Установлено, что наложение УЗ в процессе МДО позволяет управлять иерархией поровой структуры покрытий, которая в свою очередь будет влиять на механические характеристики покрытий (адгезия, когезия, модуль упругости, микротвердость и т.п.). Результаты данных исследований позволят получать КФ покрытия со структурой, имитирующей поровую структуру костной ткани.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10265.*

# ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЯ

Р. П. Карагерги<sup>а</sup>, А. В. Коновалов<sup>б</sup>, А. В. Козлов<sup>а</sup>, М. В. Евсеев<sup>а</sup>,

С. В. Барсанова<sup>а</sup>, И. А. Портных<sup>а</sup>

<sup>а</sup> АО «Институт реакторных материалов»,

а/я 29, г. Заречный, Свердловской обл., 624250, Россия

<sup>б</sup> ИМАШ УрО РАН, 34, Комсомольская, г. Екатеринбург, 620049, Россия

Диаграммы деформационного упрочнения (ДДУ) материалов носят важное прикладное значение для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС). Обычно ДДУ получают по результатам испытания образцов на растяжение, сжатие или сдвиг и представляют в виде зависимости напряжения от деформации.

В качестве оболочки твэла реактора на быстрых нейтронах БН-600 используют тонкостенную трубу малого диаметра ( $\varnothing 6,9 \times 0,4$  мм), из которой изготавливают кольцевые образцы и испытывают на растяжение в поперечном направлении для определения кратковременных механических характеристик материала оболочки. Для анализа НДС кольцевых образцов при таком виде нагружения удобно использовать ДДУ, полученную путем сжатия кольцевого образца высотой 5 мм в продольном направлении. При этом зависимость напряжения (сопротивления пластической деформации)  $\sigma_s$  от степени пластической деформации сдвига  $\lambda_p$  можно описать формулой:  $\sigma_s = \sigma_T (1 + a_1 \lambda_p)^{a_2}$ .

Известно, что после облучения нейтронами вид и параметры кривой ДДУ значительно меняются. Поэтому исследование ДДУ оболочки твэла после облучения большими дозами нейтронов является актуальной задачей.

В работе представлены результаты испытания кольцевых образцов на продольное сжатие, а также идентификация полученных ДДУ с помощью методики растяжения предварительно овализованных кольцевых образцов и анализа НДС. Целью исследования является анализ зависимости параметров ДДУ от температуры испытания и повреждающей дозы облучения.

# СВС-МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА С РАЗВИТОЙ МЕЗОПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

М. И. Кафтаранова\*, С. Г. Аникеев, Н. В. Артюхова,

В. Н. Ходоренко, О. Р. Мамазакиров

Национальный исследовательский томский государственный университет,

634045, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

В ходе исследования проанализированы структурные особенности пористого сплава на основе никелида титана (TiNi), представлены способы повышения долговечности функционирования пористого имплантата в организме за счет оптимизации размеров пор и межпоровых перегородок и увеличения удельной поверхности материала.

Установлено, что сочетание режимов уплотнения шихты, температуры начала синтеза и обработки в разработанном кислотном травителе обеспечивают преобладание открытых пор и получению шероховатой структуры поверхности стенок пор. Экспериментально установлено, что оптимальная структура пористого материала со средним размером пор 100–150 мкм получается в указанном диапазоне начальной пористости порошковой заготовки 45–50 %. Оптимальный интервал температур начала синтеза варьируется в пределах 400–450° С. Химическое травление, включающее погружение на 2–3 сек в раствор кислот HNO<sub>3</sub> и HF с последующей промывкой обеспечивает получение мезопористой структуры поверхности стенок пор за счет вытравливания субмикронных частиц на основе оксикарбонитридов Ti<sub>4</sub>Ni<sub>2</sub>(O,N,C).

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

# **ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ**

Е. Г. Комарова<sup>а, \*</sup>, Е. А. Казанцева<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, пр. Ленина 36, г. Томск, Российская Федерация

В работе было исследовано формирование многоуровневой иерархической структуры в кальций-фосфатных (КФ) покрытиях при осаждении методом микродугового оксидирования (МДО) на поверхности титана в зависимости от величины приложенного напряжения и длительности процесса. Показано, что со временем процесса МДО до 10 мин плотность тока убывает по гиперболическому закону при различных приложенных напряжениях (200, 250, 300, 350 В), а толщина покрытий увеличивается по логарифмическому закону до 50 мкм при низком напряжении 200 В и до 135 мкм при высоком напряжении 350 В. Изменение плотности тока со временем микродуговой обработки и, как следствие, температурных условий синтеза покрытий приводит к формированию в них многоуровневой структуры. Все покрытия состоят из нанокристаллического оксидного подслоя, основного аморфного КФ слоя с многочисленными порами, и поверхностного аморфного КФ слоя, содержащего сферические структурные элементы (сферы) и поры. При этом в покрытиях, сформированных при напряжении 200 В формируется квазиаморфная структура по всей толщине покрытия, а в покрытиях, нанесенных при напряжении 350 В, наблюдаются фазовые превращения из квазиаморфного состояния до аморфно-кристаллического состояния при переходе от нижнего слоя к поверхностному слою. Полученные результаты исследований позволяют управлять структурой формируемых покрытий и, как следствие, их функциональными свойствами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект № FWRW-2021-0007.*

# ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ

Н. С. Кондратьев\*, А. Н. Подседерцев, Е. С. Макаревич

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Для теоретического исследования неупругого деформирования металлов и сплавов при повышенных температурах применяется многоуровневый физический подход с внутренними переменными. В работе предложена модифицированная статистическая многоуровневая модель для исследования термомеханической обработки поликристаллов, включающая описание процесса динамической рекристаллизации. В моделях статистического типа рассматривается выборка однородных элементов материала (зерен), агрегируемых в представительный объем. Физические механизмы, обеспечивающие и сопровождающие неупругое деформирование (рекристаллизация, зернограничное упрочнение, зернограничного скольжения, и др.) существенно зависят от взаимного расположения кристаллитов и контакта между, что определяет макросвойства поликристаллов и актуальность данного исследования. Предложен способ моделирования зеренной структуры поликристалла с применением полиэдров Лагерра, последующей обработкой и передачей данных о зеренной структуре в статистическую модель. Представлены результаты моделирования высокотемпературного деформирования поликристалла меди с учетом процесса рекристаллизации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).*



# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕНОВОГО ЭЛАСТОМЕРА АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛЬТО-, СТЕКЛО- И УГЛЕ- ТКАНЬЮ

М. М. Копырин<sup>а</sup>, А. Е. Марков<sup>а</sup>, А. А. Дьяконов<sup>а, б</sup>, А. Г. Туисов<sup>а</sup>,

А. А. Охлопкова<sup>б</sup>, А. К. Кычкин<sup>в</sup>, Н. Н. Лазарева<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Федеральный Исследовательский Центр ЯНЦ СО РАН, ул. Петровского, 2, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Северо-Восточный федеральный университет, ул. Белинского, 58, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>в</sup> Институт Физико-Технических Проблем Севера СО РАН,  
ул. Октябрьская, 1, 58, г. Якутск, Российская Федерация

Актуальной задачей при изготовлении высококомодульных материалов является повышение их прочности и модуля упругости, которые влияют на эксплуатационные характеристики.

В работе приведена технология изготовления высококомодульных материалов на основе бутадиенового эластомера и армирующих слоев ткани из базальто-, стекло- и угле- волокна. По результатам исследования упруго-прочностных свойств наблюдается существенное увеличение предела прочности армированных образцов по сравнению с исходным эластомером, повышение прочности варьируется от 1,72 до 2,78 раз. Также введение армирующих слоев приводит к снижению относительного удлинения от 25 до 47 раз. Высокий предел прочности и низкое удлинение повышает сопротивление к сдвиговым деформациям. Испытание на износостойкость эластомеров, покрытых армирующими тканями, показало снижение сопротивления истиранию, которое снижается в 5,8 раз.

Изучение поверхности трения и взаимодействия субстрата с адгезивом проводилось при помощи электронной микроскопии. Исследование микроструктуры показало слабый контакт между волокнами и эластомерной матрицей, что приводит в процессе истирания об абразивную поверхность к разрушению волокон и их дальнейшему отрыву.

Сочетание в себе высокой прочности и низкой способности к удлиняющим деформациям придает армированным материалам высококомодульные свойства в комплексе с подвижностью в разные стороны.

*Работа выполнена при поддержке МОН РФ по Государственному заданию № FSRG-2020-0017 и № FWRS-2022-0001.*

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ И ОКОЛОКАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ

М. Р. Королева<sup>а</sup>, А. А. Чернова<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Удмуртский федеральный научный центр УрО РАН,  
42600, ул. Т. Барамзиной, д. 34, г. Ижевск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
42600, ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, Российская Федерация

Кавитационные эффекты, возникающие в различных технических устройствах, могут быть сопряжены с различными режимами эксплуатации гидродинамического оборудования и обусловлены различными причинами. Численное исследование кавитации недостаточно распространено в виду чего остается актуальной и практически ориентированной задачей.

В работе рассматриваются вопросы применимости различных подходов к математическому моделированию кавитационных и околокавитационных режимов в запорном гидравлической устройстве прямого действия. Показана возможность упрощенной оценки достижения режимов формирования кавитационных пузырьков и возможность исследования кавитационных режимов в рамках двухфазных моделей на основе метода VOF.

Проведенная апробация и кроссплатформенная верификация сформулированных математических моделей кавитационных и околокаватационных режимов подтвердила корректность моделей и позволила выявить причины формирования кавитационных пузырьков.

# БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В. Н. Костин<sup>а</sup>, Е. Д. Сербин<sup>а</sup>, А. П. Владимиров<sup>б</sup>, Е. А. Рогова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,

620108, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Существующие методики измерения магнитострикции основаны на создании сильных магнитных полей, применения волоконной оптики или тензометрических схем. Создание сильных магнитных полей практически всегда связано с выделением большого количества тепла, что может стать причиной температурного дрейфа при измерениях, а также предъявляет особые требования к конструкции установки.

Задачей данной работы является разработка методики бесконтактной регистрации магнитострикционной чувствительности ферромагнитных материалов методом лазерной интерферометрии.

Метод лазерной интерферометрии по своей природе является бесконтактным. Измерение магнитострикционной чувствительности  $d\lambda/dH$ , определяемой по максимальному углу наклона касательной из начала координат к возрастающей ветви полевой зависимости магнитострикции возможно проводить на начальных участках полевой зависимости магнитострикции. Также в малых полях линейная магнитострикционная чувствительность пропорциональна амплитуде гармоники сигнала магнитоакустической эмиссии (МАЭ) с частотой равной удвоенной частоте перемагничивания.

Показана возможность бесконтактного измерения магнитострикционной чувствительности объемных ферромагнетиков с помощью лазерной интерферометрии. Представлен макет установки, который позволит регистрировать магнитострикционную чувствительность объемных ферромагнетиков методом спекл-интерферометрии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГА НА КОМПЛЕКС МАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИКЕЛЯ

В. Н. Костин, Е. Д. Сербин, В. Н. Перов

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,  
620108, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Лежащие в основе магнитной структуроскопии взаимосвязи кристаллографической и магнитной структур ферромагнетиков являются сложными и неоднозначными. Поиск новых структурно чувствительных параметров является основной задачей структуроскопии ферромагнитных материалов.

Задачей данной работы является экспериментальное исследование и анализ влияния пластической деформации и последующего отжига на комплекс магнитных и акустических характеристик никеля.

В настоящей работе исследованы магнитные и акустические свойства чистого никеля, подвергнутого пластической деформацией прокаткой и последующему отжигу при температурах от 100 до 900 °С.

Показано, что коэрцитивная сила монотонно уменьшается в 25 раз с ростом температуры отжига. Установлено, что магнитострикционная чувствительность  $d\lambda/dH$  никеля возрастает более чем в 3 раза с увеличением температуры отжига. Комплекс магнитных и магнитоакустических характеристик показывает усиление необратимых процессов перемагничивания с ростом температуры отжига холоднодеформированного никеля.

Затухание ультразвука увеличивается более чем в 3 раза при увеличении температуры отжига до 900 °С. Установлено, что скорость продольных ультразвуковых колебаний в никеле резко возрастает при температуре отжига 400 °С, что свидетельствует о происходящем процессе рекристаллизации, получении более равновесной структуры и снятия внутренних напряжений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).*

# ОПИСАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН В РАМКАХ МНОГОУРОВНЕВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Н. В. Котельникова, К. А. Курмоярцева, Д. С. Грибов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
29, Комсомольский пр., Пермь, 614990, Россия

В работе предлагается методология описания деформирования и разрушения металлов, основанная на многоуровневых моделях, базирующихся на физических теориях пластичности. При помощи введенных в модели внутренних переменных описывается структура материала в процессе неупругого деформирования. В разрабатываемой модели выделено несколько структурно-масштабных уровней. На мезоуровне-I описывается деформирование зерен в терминах континуальных механических переменных, на мезоуровне-II моделируется эволюция дислокационной структуры с учетом аннигиляции и генерации дислокаций. Одним из важнейших приложений разрабатываемой модели является описание процессов разрушения. Для описания внутриверного разрушения в модель введена величина критической плотности дислокаций, достижение которой приводит к возникновению микротрещины по модели Стрo. Для описания межзеренного разрушения модель дополняется структурным уровнем, на котором описываются физические механизмы, действующие в окрестности межзеренной границы и приводящие к ее ослаблению. При помощи разработанной в рамках описанного подхода модели возможно получить полное описание процесса разрушения – от возникновения зародыша трещины до развития макротрещины. Приведены результаты моделирования деформирования образца, соответствующего чистой меди, а также предварительные результаты описания зарождения микротрещин.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № FSNM-2020-0027).*

# ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССУ РАЗРУШЕНИЯ

А. Н. Кочанов<sup>а, \*</sup>, С. А. Кочанов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН,  
111020., Крюковский тупик, д. 4, г. Москва, Российская Федерация

<sup>б</sup> Санкт-Петербургский государственный институт (технологический университет),  
190013, Московский проспект, д. 24–26 литера А, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Закономерности разрушения материалов, в том числе и горных пород, во многом определяются их структурой, которая характеризуется формой и размером зерен, наличием микродефектов, и наряду с химическим составом определяет физические свойства. Горные породы в абсолютном большинстве представляют собой природные системы, состоящие из совокупности зерен различных минералов, имеющих, как правило, различные упругие и прочностные характеристики. Выполненные исследования по ультразвуковому контролю состояния образцов горных пород с характерным размером 20–50 см свидетельствуют о том, что их локальные объемы могут характеризоваться значительным разбросом значений скорости продольных волн, который обусловлен наличием микротрещин и остаточных напряжений. Для оценки неоднородности и поврежденности локальных объемов образцов введен акустический структурный показатель горных пород как квадрат отношения фактически измеренной скорости упругих колебаний в локальном объеме образца к максимально возможной скорости для данного типа горной породы. Как показывают эксперименты в условиях высокоэнергетического динамического воздействия на образцы от этого показателя зависит степень их поврежденности, а при значениях показателя равным 1,0 развитие повреждений в экспериментах не наблюдается. Для оценки микроструктурной неоднородности и свойств минералов использовался также метод микро и наноиндентирования.

# **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА B95/10%SiC**

Д. И. Крючков\*, А. В. Нестеренко, В. П. Швейкин

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Сдерживающим фактором более широкого применения изготовленных по порошковой технологии алюмоматричных композитов (АММК) является их невысокая технологическая пластичность. Она же препятствует проведению интенсивной термопластической обработки композитов, которая, одновременно с приданием необходимой формы, способна значительно улучшить комплекс механических и эксплуатационных свойств заготовок и деталей. Проведено сравнение деформационного поведения и анализ микроструктуры образцов при разных условиях температурно-деформационной обработки композитного материала на основе алюминиевого сплава системы Al-Zn-Mg-Cu, дискретно упроченного частицами SiC. Эксперименты существенно отличались скоростью нагрева образцов и временем нахождения их под нагрузкой. Обнаружено, что в условиях «мягкого» нагружения, вне зависимости от условий нагрева, возможно обеспечение формоизменения без разрушения. Однако анализ структур выявил, что снижение скорости нагрева и соответствующее снижение скорости деформации приводит к более равномерному распределению частиц упрочняющей фазы после температурно-деформационной обработки.

# О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ И ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ

Д. Г. Ксенофонтов\*, А. В. Бызов, В. Н. Костин, О. Н. Василенко

Институт физики металлов УрО РАН,  
620108, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Численным моделированием методом конечных элементов в программе FEMM 4.2 были получены зависимости тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности объекта контроля  $H_x$  и нормальной компоненты магнитной индукции в полюсе электромагнита  $B_y$  от толщины упрочненного и неупрочненного слоев.

В результате выполненной работы было показано, что при увеличении толщины упрочненного слоя, имеющего более высокое магнитное сопротивление, наблюдается смещение пика плотности магнитного потока вглубь намагничиваемого объекта. Также было установлено, что при увеличении толщины упрочненного слоя уменьшается величина нормальной компоненты магнитного потока в полюсе электромагнита, а также растет величина тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля. Кроме того, указанные величины чувствительны к свойствам упрочненного слоя. Различие чувствительностей величин к изменению толщины и физических свойств упрочненного слоя может быть использовано для селективной оценки качества поверхностного упрочнения стальных изделий с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1). Д. Ксенофонтов и А. Бызов благодарят Институт физики металлов имени М.Н. Михеева за поддержку их работы по государственному заданию Минобрнауки России по теме «Диагностика», которая выполнялась в рамках молодежного проекта ИФМ УрО РАН № м22-21.*



# **ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА, ОСНОВАННАЯ НА ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДАХ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**А. Н. Кузьмин, А. В. Жуков, А. П. Плотников**

ООО Стратегия НК, 620014, пер. Северный, д. 5 А, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Цифровизация диагностических систем наряду с использованием искусственного интеллекта являются современным мировым трендом. В частности, анализ результатов диагностики в многомерном пространстве диагностических признаков позволяет идентифицировать опасные дефекты, которые развиваются в процессе длительной эксплуатации. Известно, что образование и рост дефектов по механизму трещинообразования имеет прямую взаимосвязь с повышенными значениями локальных полей напряжений, возникающих на участках газопроводов в результате их длительной эксплуатации. В частности, данный факт определяет высокие потенциальные возможности метода акустико-эмиссионного контроля (АЭК) с точки зрения оценки вероятности наступления предельного состояния объекта. Целью настоящей работы являлось практическое обоснование применения метода АЭК для выявления зарождения дефектов коррозионного растрескивания под напряжением на эксплуатируемых объектах магистральных газопроводов (МГ) и построение, на этой основе, технологии автоматизированного контроля таких участков.

Изложены инновационные принципы новой технологии АЭК, которые заключаются в применении систем цифровой фильтрации данных, процедуры обнаружения и выделения полезного сигнала, формирования многомерного пространства признаков наличия дефектов, а также построения системы поддержки принятия решения. На экспериментальном участке МГ подтверждено обнаружение зон зарождения опасных трещиноподобных дефектов. Предложенный способ автоматизации АЭК может быть применен к широкому кругу объектов трубопроводов различного назначения.

# **К РАСЧЕТУ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ**

**С. Ю. Лебедев\*, В. Н. Сызранцев**

Тюменский индустриальный университет, ул. Мельникайте, 72, г. Тюмень, Российская Федерация

Цель доклада – представить усовершенствованную методику расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных цилиндрических передач. Выполнен анализ существующих методик расчета вероятности безотказной работы зубчатых цилиндрических передач. Предложен алгоритм методики расчета вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач и описана работа его основных блоков. Отличительными особенностями предлагаемой методики являются: расчет вероятности безотказной работы по критерию глубинной контактной выносливости; применение инструментов непараметрической статистики; расчет контактных напряжений с учетом угла перекоса, вызванного деформации элементов передачи и корпуса. На основе предложенной методики был выполнен тестовый расчет вероятности безотказной работы поверхностно-упрочненной зубчатой передачи.

Выполненная работа является частью исследования, нацеленного на совершенствование методологии оценки надежности поверхностно-упрочненных зубчатых цилиндрических передач, основанной на применении методов численного моделирования и инструментов непараметрической статистики.

# **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Е. В. Лешков\*, С. Б. Сапожников

Южно-Уральский государственный университет (НИУ),  
454080, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, Российская Федерация

Несмотря на преимущественно хрупкий характер разрушения полимерных композитных материалов, процесс их деформирования может обладать значительной нелинейностью. Особенно ярко это проявляется при чистом сдвиге или при растяжении/сжатии гибридных композитов. В практических инженерных расчетах реальных конструкций нелинейные свойства композитов зачастую не учитываются, что приводит к снижению весовой эффективности разрабатываемых изделий, так как нелинейное деформирование позволяет значительно снизить влияние концентрации напряжений на прочность. В данной работе рассмотрена модель нелинейного деформирования композитного материала, которая была интегрирована в конечно-элементный пакет ANSYS APDL средствами модуля User Programable Feature. Нелинейный характер деформирования композитов в модели учитывается за счет механизма накопления рассеянных микрповреждений. Накопление повреждений вызывает снижение секущего модуля вплоть до полной потери несущей способности. В основе модели лежит рассмотренный ранее алгоритм, заложенный в аналитический модуль FARGR-2. Отличительной особенностью модели является стабильный процесс численного решения системы уравнений механики деформируемого твердого тела при использовании неявной схемы интегрирования по времени. В работе рассмотрены изменения, внесенные в алгоритм для корректной работы внутри пакета, реализующего метод конечных элементов. Рассмотренные тестовые случаи подтвердили адекватную и стабильную работу модели материала при расчетах в ANSYS APDL.

# ВЛИЯНИЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ

И. Ю. Литовченко<sup>а, \*</sup>, Н. А. Полехина<sup>а</sup>, С. А. Аккузин<sup>а</sup>,  
К. В. Алмаева<sup>а</sup>, В. В. Линник<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный Исследовательский Томский государственный университет,  
634050, пр. Ленина 36, г. Томск, Российская Федерация

Методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии изучены особенности микроструктуры, элементного и фазового состава поверхностных слоев, особенности пластической деформации и разрушения ферритно-мартенситных сталей ЭК-181 и ЭП-823 после длительной выдержки при 540 и 630 °С в проточном и статичном свинцовом теплоносителе с пониженной  $(4-8) \times 10^{-7}$  и базовой  $(1-4) \times 10^{-6}$  вес. % концентрацией растворенного кислорода. Показано, что в сталях формируются поверхностные оксидные пленки, представленные наноразмерными частицами  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . При пониженной концентрации кислорода (в проточных условиях) и температуре 540 °С в течении 2500 ч. на стали ЭП-823 оксидные пленки не формируют сплошные слои. При более высокой температуре (630 °С) наблюдаются эффекты внутреннего окисления с проникновением оксидных слоев по границам зерен вглубь материала. Длительная выдержка в теплоносителе не оказывает влияния на характер разрушения ферритно-мартенситных сталей.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-48-700020 р\_а и Администрации Томской области.*

# **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОГО СТАРЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Д. С. Лобанов\*, Е. М. Лунегова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Работа направлена на экспериментальное исследование и описание закономерностей механического поведения и деградации прочностных свойств волокнистого конструкционного композиционного материала при комбинированных механических и температурных воздействиях и старении в агрессивных (эксплуатационных) средах.

Получены и проанализированы данные о влиянии различных сред, таких как техническая вода, морская вода и машинное масло при различной продолжительности (15, 30, 40 сут) и температуре (22 °С, 60 °С и 90 °С) на процессы разрушения композита и реализацию различных механизмов накопления повреждений при квазистатических испытаниях на межслоевой сдвиг. В работе приводятся результаты испытаний, полученные системой регистрации сигналов акустической эмиссии. Описаны результаты исследования микроструктуры образцов, полученные с помощью стереомикроскопа до и после термовлажностного старения в агрессивных средах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-41-590005 р\_а. Экспериментальные исследования в рамках описания механического поведения конструкционно-неоднородных материалов проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).*

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗКАХ В ПРОЦЕССЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Д. С. Лобанов\*, Е. М. Струнгарь, Е. М. Лунегова, В. Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Проведены серии экспериментальных исследований закономерностей деформирования конструкционного углепластика при динамических перегрузках в процессе квазистатического нагружения. Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе проводились испытания на растяжение и определялись механические прочностные характеристики образцов для подбора параметров динамических перегрузок. На втором этапе проводились испытания с динамическими перегрузками в процессе квазистатического нагружения. На втором этапе проводились испытания образцов углепластика с динамической перегрузкой на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801 совместно с системой регистрации полей перемещений и деформаций на поверхности образца и сигналов акустической эмиссии (АЭ). Отмечается, что процесс деформирования материала является неоднородным, на поверхности образца зафиксированы зоны локализованной деформации, которые, в свою очередь отражают структуру материала.

*Экспериментальные исследования в рамках описания механического поведения конструкционно-неоднородных материалов проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).*

# **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 3D-ПЕЧАТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЛАСТИКА ABS С АРМИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Е. С. Лобов\*, А. Д. Добрыднева, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, Российская Федерация

На сегодняшний день разработка и производство новой высокотехнологичной продукции предполагает использование передовых материалов, таких как композитные материалы. Для проектирования конструкций из таких материалов используется создание цифровых моделей, обеспечивающих большую гибкость для локального контроля архитектуры материала в трехмерном пространстве. Точность моделей зависит от механических параметров, полученных экспериментально, таких как модуль упругости, предел прочности и других. Аддитивное производство (3D-печать) на основе экструзии в настоящее время используется во многих отраслях промышленности для прямого производства легких крупногабаритных компонентов из полимера, армированного волокнами из натуральных или синтетических материалов. Синтетическое волокно используется в качестве армирующего агента в различных композитах с полимерной матрицей для улучшения механических свойств, таких как жесткость, модуль упругости и прочность легких материалов.

Исследованы свойства образцов, изготовленных способом наплавления нитей (FFF/FDM печать) из филаментов ABS с армирующими элементами в виде коротких волокон с различными свойствами. Изучены механические характеристики образцов, их зависимость от параметров процесса печати. Получены результаты сравнения экспериментальных данных с эффективными характеристиками материала, вычисленными с помощью гомогенизации по методу Мори-Танака, а также численно методом конечных элементов.

# **ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ**

Е. В. Ломакин, Б. Н. Федулов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Характеристики пластичности и прочности многих материалов, содержащих различного рода неоднородности структуры, такие как микротрещины, поры, включения, армирующие элементы, особенности кристаллической структуры зависят от вида внешних воздействий. Это связано с тем, что механизмы необратимого деформирования отличаются от классической модели и включают не только механизмы скольжения дислокаций, но также развитие существующих дефектов и образование новых нарушений сплошности в структуре материалов, перемещение структурных элементов и другие внутренние процессы. При этом пластическое деформирование сопровождается необратимым изменением объема. Для исследования пластического деформирования и предельного состояния тел, обладающих такими свойствами, предложено условие пластичности в соответствующем обобщенном виде с использованием параметра вида напряженного состояния, представляющего собой отношение гидростатической компоненты напряжения к эквивалентному напряжению Мизеса. В рамках жесткопластической модели получены аналитические решения ряда краевых задач для полос с различными вырезами, действия штампов на поверхности тела и показано, что значения предельных нагрузок существенно зависят от степени чувствительности свойств тел к виду напряженного состояния. Проведено численное решение задач с учетом упругих деформаций и установлено, что учет упругих деформаций не оказывает заметного влияния на значения предельных нагрузок.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 20-11-20230).*



# **ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ**

А. В. Лыкова, А. В. Ильиных, А. С. Янкин, В. Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов свидетельствует об актуальности экспериментальных исследований малоциклового усталости в условиях сложного напряженного состояния.

Проведены эксперименты при двухосной малоциклового усталости, одна из мод (или нормальное напряжение, или касательное напряжение) которой изменяется циклическим образом, а другая мода остается постоянной по величине в течение испытания. Для проведения циклических испытаний были выбраны три разных уровня постоянных составляющих, с целью оценки их влияния на долговечность конструкционных сплавов.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии постоянных составляющих по одной из мод при двухосной малоциклового усталости на циклическую долговечность. Показано, что при определенных соотношениях постоянных и циклических составляющих долговечность снижается на порядок. Для прогнозирования ресурса при двухосной усталости предложена модификация модели Сайнса, учитывающая наличие постоянных составляющих по одной из мод.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-38-90270) и в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№FSNM-2020-0027).*

# ОПИСАНИЕ МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕХОДА В ПРЯМОЙ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ

Е. С. Макаревич, А. Н. Подседерцев, П. В. Трусков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614000, Комсомольская проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Совершенствование технологий термомеханической обработки металлов и сплавов немислимо без математического моделирования. Физико-механические характеристики металлов и эксплуатационные свойства изделий из них практически полностью определяются микро- и мезоструктурой сплавов. В силу этого наиболее востребованными являются модели, позволяющие описывать изменения структуры материала заготовки на различных масштабных уровнях в результате внешних термомеханических воздействий. Во многих подобных процессах в материале реализуются фазовые переходы, в частности, мартенситные превращения. В работе предложен подход к построению прямой физически-ориентированной конститутивной модели, позволяющий интегрировать в структуру определяющих соотношений описание мартенситного перехода. Базовым элементом модели является кристаллит (часть зерна), рассматриваемый как однородная термомеханическая система, сопряжение которой с окружающей средой осуществляется по кинематическим переменным и температуре, а материал рассматривается как локально равновесная система с диссипацией. Предложен подход к определению движущей силы фазового превращения. С использованием разработанной модели и критерия мартенситного перехода проведена серия вычислительных экспериментов для аустенитной нержавеющей стали в пакете программ конечно-элементного моделирования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть, проект № FSNM-2020-0027) и РФФИ и Пермского края (проект № 20-41-596002).*

# **ВЫСОКОПРОЧНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ОДНОРОДНЫХ И РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

А. Г. Маликов, И. Е. Витошкин, А. И. Анчаров, Е. В. Карпов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук  
630090, ул. Институтская 4/1, г. Новосибирск, Россия

В настоящее время в авиастроении идет внедрение высокопрочных алюминий-литиевых сплавов. Остро стоит вопрос замены технологии заклепочного соединения при создании сложных деталей, с применением новых высокопроизводительных, материалосберегающих технологий, обеспечивающих заданные механические характеристики. Разрабатываются новые методы соединения на основе сварки плавлением (лазерная сварка, аргонно-дуговая сварка, электроннолучевая сварка) и сварки трением с перемешиванием. Основные научные результаты исследований показали, что существует проблема, состоявшая в том, что статически механические характеристики (временное сопротивление на разрыв, предел текучести и относительное удлинение) сварных соединений в том числе и разнородных современных Al-Li термически упрочняемых сплавов авиационного назначения, оставались низкими и составляла 50–80 % от значений исходного сплава. Снижение прочности сварных соединений шва данных сплавов связано с изменением структурно-фазового состава сварного шва в результате лазерного воздействия. В работе проведено комплексные исследования процесса лазерной сварки современных алюминиевых сплавов, проведена оптимизация лазерного воздействия установлена эволюция структурно-фазового состава в результате пост обработки, исследованы механические свойства. Оптимальная пост термообработка лазерных сварных соединений позволяет восстанавливать структурно-фазовый состав сварного шва и повысить механические характеристики до уровня исходного сплава.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА И ПРОНИЦАЕМОСТИ СВС-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА

О. Мамазакиров\*, С. Г. Аникеев, Н. В. Артюхова,

М. И. Кафтаранова, В. Н. Ходоренко

Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

Работа посвящена анализу структурных особенностей пористых сплавов на основе никелида титана, полученных методом самораспространяющегося высоко-температурного синтеза (СВС). В ходе исследования определены количественные характеристики строения пористого пространства и проницаемости для разных типов СВС-образцов TiNi (мелкопористый, среднепористый, крупнопористый).

Показано, что с увеличением пористости увеличивается коэффициент проницаемости до  $K = 0,255 \pm 0,004 \times 10^{-9} \text{ м}^2$ . Взаимосвязанная структура порового пространства с высокой степенью открытой пористости обеспечивает высокие значения коэффициента проницаемости. В ходе СВС в режиме послойного горения обеспечивается непрерывное продольное распространение фронта химической реакции с выделением тепла и смачиванием порошковой шихты.

Установлено, что на поверхности стенок пор под действием выделившихся газов формируется оксикарбонитридный слой переменного состава с множественными включениями частиц вторичных фаз. Фазово-химический состав соединения TiNi имеет высокую неоднородность.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030).*

# **РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ НАТУРНОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ КОНСТРУКЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ КОНТУР ЦИРКУЛЯЦИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

**С. В. Маслов**

ФГБУН Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии Наук (ИМАШ РАН),  
101990, Малый Харитоньевский пер., 4, г. Москва, Российская Федерация

В работе рассмотрена задача создания методик и средств расчетно-экспериментального определения термонапряженного состояния натуральных конструкций, в которых имеется контур циркуляции жидкометаллического теплоносителя с переменной температурой. Актуальность задачи связана с необходимостью обеспечения и возможного продления эксплуатационного ресурса стационарных и транспортных энергоустановок нового поколения – атомных реакторов типа БН, БРЕСТ, транспортных и специальных установок. Рассматриваются задачи и достигнутые результаты в создании новых отечественных средств контроля напряженного состояния наружных и внутренних поверхностей оборудования, подверженных механическим и тепловым нагрузкам со стороны теплоносителя. Приводятся результаты создания расчетно-экспериментальных методик определения напряжений в опасных точках конструкции, недоступных для установки обычных средств контроля ее состояния, рассматриваются возможности алгоритмов решения обратных задач теплопроводности и термоупругости. Предлагаются усовершенствованные методы обеспечения достоверности результатов контроля термонапряженного состояния и алгоритмы оценки погрешностей измеренных значений деформаций и погрешности определения напряжений, полученных методом натурной тензометрии.

# **ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ ВОДД НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ, ВСТРОЕННЫМИ В ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

В. П. Матвеевко, Н. А. Кошелева, Г. С. Сероваев\*,

А. Ю. Федоров, И. Н. Шардаков

Институт механики сплошных сред УрО РАН,

614068, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

При использовании волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД), встроенных в полимерные композиционные материалы (ПКМ), имеет место ряд проблем: влияние на прочность материала встроенного волокна; получение значения деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками; обеспечение термокомпенсации при измерении деформаций; получение информации о всех компонентах тензора деформаций. Для оценки концентрации напряжений, возникающей в окрестности встроенного в материал волокна рассмотрены варианты ПКМ с волокном на основе различных моделей представления ПКМ и с учетом технологических особенностей, возникающих при встраивании оптического волокна в материал. Численная реализация рассматриваемых моделей выполнена на основе МКЭ.

Рассмотрена методика построения цифрового аналога процесса физического измерения деформаций ВОДД, встроенными в материал. На основе численных экспериментов получены оценки погрешностей значений деформаций, которые могут иметь место при вычислении деформаций на основе физических величин, снимаемых с датчиков на брэгговских решетках при использовании допущения об их одноосном напряженном состоянии. Приводятся модели и результаты численных экспериментов для варианта измерения компонент тензора деформаций решетками на основе волоконных брэгговских решеток, встроенных в ПКМ.

*Тезисы доклада подготовлены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации научной программы НЦМУ «Сверхзвук» (соглашение от 16.11.2020 г. № 075-15-2020-925).*

# **МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ**

**В. П. Матвеев, Н. А. Кошелева\*, Г. С. Сероваев**

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614068, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

Представлена методика регистрации появления и развития локальных дефектов в материале на основе экспериментальных данных о значениях деформаций, измеряемых ограниченным числом датчиков и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния. Методика применима для внешних воздействий на контролируемый объект, отличающихся друг от друга в различные моменты времени постоянным множителем. Основанием для заключения о возникновении дефекта и его зоне является изменение величин отношений значений деформации, регистрируемых двумя датчиками в момент времени измерений. Для выбора мест расположения датчиков используются результаты численного моделирования. Методика экспериментально апробирована на различных образцах из полимерного композиционного материала и образце, полученном в результате затвердевания цементной смеси при различных вариантах нагрузений, в том числе при циклических нагрузках. Для измерения деформаций используются волоконно-оптические датчики деформаций на основе брэгговских решеток, приклеенные к поверхности образцов или встроенные в полимерный композиционный материал на технологической стадии изготовления образцов. В выполненных экспериментах показана возможность регистрации дефектов на основе представляемой методики.

*Тезисы доклада подготовлены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации научной программы НЦМУ «Сверхзвук» (соглашение от 16.11.2020 г. № 075-15-2020-925).*

# ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Ю. Г. Матвиенко, И. Е. Васильев, Д. В. Чернов, И. В. Мищенко

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН),

101990, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, Москва, Россия

В работе представлено сопоставление результатов построения линейной локации источников акустической эмиссии (АЭ), зарегистрированных в процессе статического растяжения стальной полосы размером 500x50x3 мм с концентраторами в виде сквозных отверстий диаметром 5 мм, расположенных на расстоянии 40 мм от приемных преобразователей. Построение линейной локации осуществлялось согласно стандартного алгоритма ПБ 03-593-03, алгоритма  $\Delta t$ -mapping и алгоритмов машинного обучения, основанных на применении искусственных нейронных сетей. Наименьшая вероятность локации источников АЭ, не превышающая  $p = 0,061$ , была получена при использовании стандартного алгоритма. Применение алгоритма  $\Delta t$ -mapping, основанного на построении атласа значений разности времен прихода ( $\Delta t$ ) импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки, позволило увеличить вероятность до  $p = 0,131$ . Для обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) проведена серия испытаний по имитации импульсов АЭ на поверхности стальной полосы посредством генератора широкополосных сигналов. Применение обученной нейронной сети дало возможность повысить вероятность выявления источников АЭ в зонах расположения концентраторов до значения  $p = 0,72$ , что в 11,8 раз превышает значение вероятности, подсчитанное по результатам локации источников АЭ при использовании стандартного алгоритма.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00351).*



# КОНЦЕПЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ МИКРОРАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ МАЛОЦИКЛОВЫХ ТРЕЩИН

Н. А. Махутов, И. В. Макаренко\*, Л. В. Макаренко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
119334, ул. Бардина, д.4; г. Москва, Российская Федерация

Исследуется взаимосвязь характеристик микроразрушения поверхностей поверхностных полуэллиптических малоцикловых трещин с критериальными параметрами нелинейной механики разрушения на основе инвариантного  $J$  – интеграла Эшелби–Черепанова–Райса. Получены результаты фрактографических исследований поверхностей разрушения трещин с полуэллиптическим контуром на цилиндрических образцах разной толщины при циклических номинальных упругопластических нагрузках. На основе экспериментальных данных и численных расчетов напряженно-деформированного состояния по контуру поверхностных полуэллиптических малоцикловых трещин с помощью программных комплексов ANSYS и MATLAB разработана структурно-феноменологическая концепция повреждений металлических материалов на примере аустенитных нержавеющей сталей типа 08X18H10T и 12X18H10T.

Приведены расчетно-экспериментальные зависимости, определяющие взаимосвязь микро- и макропроцессов упругопластического разрушения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект – 20-19-00769.*

# **ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ В КОНСТРУИРОВАНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ**

Н. Ф. Морозов, Е. Г. Земцова, А. Ю. Арбенин, Б. Н. Семенов, В. М. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет,  
198504, Университетский пр., 26, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Основным направлением получения металлматричных композитов с многоуровневой иерархической структурой является разработка новых подходов к созданию гибридных композитов с двумя и более упрочняющими модификаторами, что позволяет улучшать целый комплекс функциональных свойств и при этом снизить общую стоимость материала.

В данной работе была показана возможность направленного регулирования состава структуры и свойства композитов, с использованием методов порошковой металлургии и поверхностного модифицирования. В результате проведенного исследования были синтезированы металлматричные композиционные материалы на основе алюминия, армированные карбидными наночастицами и углеродными нанотрубками с никелированной поверхностью. Изучен процесс формирования композиционных материалов с точки зрения микроструктуры, а также переходного слоя металл–керамика.

В результате работы было показано, что совместное использование двух армирующих фаз позволяет нивелировать их отрицательные качества в объеме металла и получить композиционный материал, обладающий высокими прочностными свойствами с сохранением пластичности.

Для синтезируемых композитов, была разработана методика определения прогнозируемого упрочнения. Разработаны, конечно-элементные модели деформирования синтезируемых металлокомпозитов. Проведено сравнение модельных и экспериментальных результатов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 20-11-20083.*

# О РОЛИ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Н. Ф. Морозов<sup>а, б</sup>, Д. А. Индейцева<sup>б, д</sup>, К. Л. Муратиков<sup>в</sup>,

Б. Н. Семенов<sup>а, б</sup>, Д. С. Вавилов<sup>а, г</sup>, А. А. Кудрявцев<sup>д</sup>

<sup>а</sup>Институт проблем машиноведения РАН,

199178, Большой пр. В.О., 61, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,

199034, Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>в</sup>Физико-Технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН,

194021, ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>г</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

197198, ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>д</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Описание динамического отклика на тепловое воздействие определенной длительности материала с дефектами или примесями требует введения дополнительных степеней свободы, которые обычно определяются диффузионными уравнениями с параметрами, зависящими от микроструктуры. В этом случае общий релаксационный процесс имеет два спектральных отклика. Первый из них определяется характерными временами динамического процесса, связанного с распространением волн в занимаемых областях сплошной среды. Кроме этого, на коллективную динамику частиц физической системы накладывается процесс, порождаемый движением дополнительных степеней свободы. Таким образом, возникает самостоятельная проблема выделения из общего сигнала информации о содержании в материале дефектов различной природы. В данной работе на примере динамической задачи термоупругости, где в качестве дефекта выступает инерционное включение, показано изменение термоакустического сигнала, вызванного его наличием. При этом реологическое соотношение для твердого тела в операторной форме записывается аналогично закону Дюамеля–Неймана, однако модуль упругости и коэффициент линейного теплового расширения теперь не являются константами, а имеют динамический характер.

# ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ САЙНСА МНОГООСНОЙ УСТАЛОСТИ В ИНВАРИАНТНОЙ ФОРМЕ

А. И. Мугатаров, А. С. Янкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Ранее авторами была разработана модификация модели Сайнса многоосной усталости. Однако данная модель может быть использована только в системе координат, связанной с осями нагружения образца. С целью обобщения на случай произвольно расположенной системы координат представлена инвариантная форма записи. Меняющийся во времени тензор напряжений разложен на постоянную и периодическую составляющие; для записи модели использованы максимальные и минимальные значения первого и второго инвариантов этих составляющих. Определены параметры модели при различных наборах установочных экспериментов. Также предложено введение дополнительного слагаемого, позволяющего учесть сдвиг фаз между модами нагружения. Модель апробирована по данным усталостных испытаний при двухосном растяжении с кручением корсетных образцов из алюминиевого сплава Д16Т. Показана высокая описательная способность предложенной модели. Проведен анализ влияния режима нагружения на угол наклона площадки начала роста усталостной трещины. Обсуждается возможность применения моделей, основанных на расчете критической площадки.

*Исследования проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).*

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ КРИТИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЙ**

М. Н. Муллахметов, А. С. Янкин, Д. С. Лобанов, В. А. Мельникова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

В ходе работы были проведены серии испытаний на растяжение плоских образцов из конструкционного стеклотекстолита электротехнического назначения СТЕФ. Помимо проведенного эксперимента было проведено также численное моделирование процессов растяжения данных образцов. Исследуемые образцы представляли из себя полоски без концентраторов напряжений и с концентратором в виде V-образных вырезов с различным радиусом скругления в вершине концентратора и глубиной выреза. Полученные результаты использовались для определения констант материала по теории критических расстояний. При этом были использованы два подхода теории критических расстояний: линейный и точечный. Для анализа результатов экспериментов были построены конечно-элементные модели с использованием программного пакета ANSYS и проведено численное моделирование, результатом которого стали полученные линеаризированные максимальные главные напряжения на центральной линии, проходящей через вершину концентратора напряжений. По результатам работы определены значения критических расстояний композита, полученные с использованием точечного и линейного методов и метода конечных элементов. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования прочностных характеристик реальных изделий со сложной геометрией, а также поврежденных элементов конструкций.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 21-79-10205, <https://rscf.ru/project/21-79-10205/>) в ПНИПУ.*

# МАГНИТОУПРУГИЕ МАЛОЦИКЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЙ 30X13 И 40X

К. Р. Муратов\*, В. Ф. Новиков, В. В. Проботюк, С. М. Кулак

Тюменский индустриальный университет,  
6250009, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, Российская Федерация

Представлены результаты магнитоупругих испытаний образцов сталей 30X13 и 40X. Цилиндрические образцы диаметром 6 мм были закалены и отпущены при температурах: 30X13 – 600° С; 40X – 200, 400, 500, 650° С. Предварительно намагниченные до насыщения образцы подвергались пятидесятицикловому растяжению заданной амплитуды. При этом синхронно регистрировали напряженность магнитного поля остаточной намагниченности, которая пропорциональна намагниченности. После серии нагружений образец намагничивался снова и подвергался аналогичному испытанию с большей амплитудой. Испытания с повышением нагрузки образцов 30X13 проводились до их разрушения, образцов 40X – до достижения нагрузки 550 МПа. Циклическое нагружение закономерно приводило к необратимому размагничиванию на первом цикле с последующим переходом в режим квазиобратимого изменения намагниченности (пьезомагнитный эффект) на последующих циклах. При этом на фоне пьезомагнитного эффекта наблюдается необратимое размагничивание, которое замедляется с ростом номера цикла. Характер такого размагничивания хорошо подчиняется степенному закону, что наблюдалось нами ранее и было названо магнитоупругой степенной релаксацией. В окрестности нагрузок близких к пределу выносливости наблюдается изменение поведения некоторых магнитоупругих параметров, таких как магнитоупругая чувствительность и коэффициенты степенной релаксации.

# АТОМИСТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ С ДЕФЕКТАМИ

К. А. Мушанкова<sup>а, \*</sup>, Л. В. Степанова<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
443086, Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

<sup>б</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
443086, Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Основной целью исследования является атомистическое определение напряженно-деформированного состояния у вершины трещины в изотропном и анизотропном линейно упругих материалах с помощью метода молекулярной динамики, реализованного в открытом коде LAMMPS (Large-scale Atomistic/Molecular Massively Parallel Simulator).

Выполнен широкий класс вычислительных экспериментов для пластины из монокристаллической меди с центральной трещиной в LAMMPS. Угловые распределения компонент тензора напряжений, полученные с помощью молекулярной динамики, сравниваются с угловыми распределениями континуальной механики хрупкого разрушения – с аналитическим решением М. Уильямса задачи о нагружении бесконечной пластинки с центральной трещиной в изотропном линейно упругом материале. Сравнение угловых распределений компонент тензора напряжений, полученных в рамках атомистического моделирования, и угловых распределений, полученных из классического решения механики сплошных сред, показало, что на наноразмерном уровне поля напряжений хорошо согласуются с их макроскопическими величинами и, следовательно, классическая механика разрушения может применяться на атомистическом уровне, а известные параметры могут быть использованы для создания связи между моделями на атомистическом и макроскопическом уровнях.

Так же в рамках исследования был создан цикл программ, направленных на исследование упругих свойств меди с гранецентрированной кубической решеткой с заданным потенциалом погруженного атома (EAM).

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В АЛЮМИНИИ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

М. В. Надежкин\*, С. А. Баранникова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

Важнейшей закономерностью процесса пластической деформации является его склонность к локализации на всех этапах, от начала до конца (до разрушения), принимая на этом пути различные закономерно меняющиеся формы. Это характерно для моно- и поликристаллов металлов и сплавов, в поликристаллах с разным размером зерна, в материалах с разными механизмами пластической деформации. Исследования локализации пластической деформации в процессе ползучести позволят расширить автоволновые представления о пластическом течении, полученные ранее при растяжении и сжатии материалов. В качестве материала для испытаний был выбран технически чистый алюминий марки А5, обладающий низкой температурой плавления и демонстрирующий способность к деформированию ползучестью при комнатных температурах.

Испытания на ползучесть плоских образцов осуществлялись при комнатной температуре в диапазоне напряжений 50–58 МПа. Установлены зависимости между длительностью установившейся ползучести и приложенного напряжения. Методом корреляции цифровых изображений проанализированы распределения локальных удлинений  $\varepsilon_{xx}$  на участках установившейся ползучести и установлена связь параметров локализации от величины напряжения ползучести. Показано, что на стадии установившейся ползучести очаги локализации пластической деформации в образцах распределяются упорядоченно.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект No. 21-19-00075).*



# ОБЗОР ПО ПУБЛИКАЦИЯМ, В КОТОРЫХ ПРИВЕДЕНЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Назаров

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова,  
119192, Мичуринский пр-т, 1, г. Москва, Российская Федерация

Рассмотрены работы 2004–2021 годов для различных металлических материалов (магниево-литиевый сплав, медь, алюминиевый сплав, титановый сплав, сталь, никелевый сплав) в температурном диапазоне 20–1100 °С. В этих работах результаты испытаний получены для изотермической ползучести при одноосном растяжении и сложном напряженном состоянии. Среди этих работ присутствуют малоизвестные результаты. В одной из таких работ впервые рассмотрена ползучесть магниево-литиевого сплава при комнатной температуре. В другой работе впервые кривые ползучести для жаропрочной стали дополнены экспериментальными диаграммами напряжение – деформация в широком диапазоне значений высокой температуры. Еще одна отличительная работа, в которой для характерных моментов времени процесса ползучести сделано сопоставление фотоснимков изменения микроструктуры и кривой ползучести до момента времени разрушения. Перечислены работы, в которых из эксперимента по сравнению с одноосным растяжением обнаружена неоднозначность во влиянии двухосного растяжения на время в момент разрушения. В обзоре перечислены сложные эквивалентные напряжения с возможностью описания относительного различия значений времени в момент разрушения при одноосном растяжении, двухосном растяжении и трехосном растяжении.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект 20-08-00387.*

# ВЫБОР ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

В. В. Назаров

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова,  
119192, Мичуринский пр-т, 1, г. Москва, Российская Федерация

Как правило, при определении механических и физических характеристик процессов установившейся ползучести и длительной прочности для исследуемого металлического материала проводят длительные испытания на одноосное растяжение при разных значениях номинального напряжения. По причине того, что количество таких экспериментов ограничено, в качестве аппроксимации используют степенную зависимость с двумя материальными параметрами. Очевидный недостаток этой аппроксимации заключается в том, что она не ограничена пределами по номинальному напряжению, где таковыми являются напряжение стартовой ползучести – максимальное номинальное напряжение, при котором скорость деформации равна нулю, предел кратковременной прочности – минимальное номинальное напряжение, при котором происходит мгновенное хрупкое разрушение. Этот недостаток устраняет дробно-степенная зависимость с четырьмя материальными параметрами, два из которых имеют физический смысл напряжения стартовой ползучести и предела кратковременной прочности. В качестве критерия выбора зависимости рассмотрены суммарные погрешности разности экспериментальных и аппроксимирующих постоянных скоростей деформаций и времен в момент разрушения, где использованы экспериментальные данные, полученные для двух титановых сплавов. Вычисления показали, что суммарные погрешности заметно не различаются.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, проект 20-08-00387.*

# ОБЗОР ПО СОБСТВЕННЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ В ОБЛАСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. Назаров

НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова,  
119192, Мичуринский пр., 1, г. Москва, Российская Федерация

Для титанового сплава ВТ1-0 при 20 °С исследован процесс изменения формы при одноосном растяжении тонких прямоугольных пластин без и с центральным круговым отверстием  $\frac{1}{2}$  от толщины образца. Показано, что центральное круговое отверстие  $\frac{1}{2}$  приводит к заметному ослаблению прямоугольной пластины, при этом в момент начала разрушения для сплошной пластины зарождается одна трещина в центре, а для пластины с центральным круговым отверстием  $\frac{1}{2}$  зарождаются две трещины в самом узком месте пластины внутри кругового отверстия  $\frac{1}{2}$ . На изотропных медных трубчатых образцах при 264 °С получены экспериментальные данные по установившейся ползучести и длительной прочности при условии одинакового вклада нормального и удвоенного касательного напряжений в максимальное касательное напряжение. На трубчатых образцах из титанового сплава ВТ1-0 при 550 °С получены экспериментальные данные по установившейся ползучести при разных отношениях нормального напряжения к касательному напряжению либо при одном и том же максимальном нормальном напряжении 100 МПа либо при одном и том же касательном напряжении 50 МПа. Показано, что можно выделить две аппроксимации экспериментальных данных, которые не представляется возможным аппроксимировать одной зависимостью. Не смотря на то, что трубчатые образцы не были доведены до момента разрушения, на кривых ползучести углы поворота достигли сверх больших значений.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 20–08–00387).*

# О НЕКОТОРЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СТАДИЙНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ

О. Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614013, ул. ак. Королева, 1, Российская Федерация

Автомодельные закономерности развития поврежденности, соответствующие различным стадиям разрушения, исследуются экспериментально и теоретически для металлов, композитов и керамик в широком диапазоне интенсивностей нагружения. Установленные признаки автомодельности отражают критическую динамику многомасштабного развития дефектов в форме коллективных мод дефектов различной природы и их роль в релаксационных свойствах, кинетике локализации поврежденности, распространения трещин. С использованием данных скоростной регистрации распространения динамических трещин в ПММА, акустической эмиссии и цифровой регистрации изображений (DIC) в металлах и композитах показано соответствие сценариев разрушения в соответствии с двумя типами автомодельных решений: автомодельного распределения напряжений в вершине трещины (решение Ирвина) и локализованных структур «обострения», определяющих локализацию поврежденности и формирование очагов разрушения (дочерних трещин).

Автомодельность процессов локализации поврежденности при динамическом распространении трещин, взаимодействие трещин (концентраторов) с областями локализации поврежденности проявляется на фазовых портретах динамических переменных (напряжений, по данным поляризационных изображений; флуктуаций полей деформаций по данным DIC; энергии акустических сигналов) в виде областей притяжения (аттракторов), соответствующих установленным типам автомодельных решений. Развиваемые представления используются для обоснования двухпараметрических критериев разрушения

*Исследования проведены в соответствии с проектом РНФ № 21-79-30041.*

**ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ  
ДО НАНОМАСШТАБНОГО УРОВНЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРА  
РАЗРУШЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ Cr-Mn-N СТАЛИ  
ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

Н. А. Наркевич\*, Ю. Ф. Гоморова, Е. Е. Дерюгин, И. В. Власов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Исследована структура и характер разрушения аустенитной нержавеющей Cr-Mn-N стали, содержащей 0,53 азота, после интенсивной пластической деформации поверхностного слоя ковкой с ультразвуковой частотой. Получены данные о деформационном старении в наноструктурированном поверхностном слое. Исследованы механические свойства, деформационное поведение и характер разрушения стали после испытаний на растяжение при температуре  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Приповерхностный слой с диспергированной до наномасштабного уровня структурой в исследованной стали после растяжения при  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  разрушается вязко. Вне этого слоя сталь разрушается хрупко – излом имеет характерное слоистое строение. Сделан вывод о подавлении  $\gamma \rightarrow \epsilon$  мартенситного превращения в сильно диспергированной структуре, что обуславливает изменение характера разрушения с хрупкого транскристаллитного на вязкий.

# МАГНИТОУПРУГИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В. В. Нассонов, О. В. Балина

Тюменский индустриальный университет,  
625000, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, Российская Федерация

Распределение напряжений в сварных конструкциях, как правило, неоднородно. При усталостных испытаниях сварных металлоконструкций важным аспектом является выявление наиболее нагруженных участков с учетом конструктивных особенностей и режимов сварки.

В качестве альтернативы тензорезисторам и тепловизорам, в работе, для определения напряженного состояния и микропластической деформации, применен магнитоупругий эффект в постоянном магнитном поле. Использован приставной электромагнит с намагничивающей и измерительной обмотками. При циклическом нагружении за счет магнитоупругого эффекта в измерительной обмотке возникает периодический сигнал сложной формы. При усталостных испытаниях с возрастающей амплитудой напряжений проведен гармонический анализ сигнала с использованием фильтров с псевдопрямоугольными окнами пропускания. Выявлены наиболее информативные гармоники, кратные частоте нагружения. Установлено, что возрастание напряжений характеризуется изменением амплитуды и фазы гармоник относительно циклических нагрузок.

Полученные зависимости позволяют определять участки, в которых напряжения достигли области предела выносливости.

# **ВЫБОР МЕТОДОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТАНЦИЙ ПРОЕКТНОГО ИСТОЧНИКА «СКИФ»**

А. К. Насырова, К. Д. Егошин, О. М. Кутькин

Новосибирский государственный технический университет,  
630073, пр-т К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Российская Федерация

В настоящее время в России реализуется несколько уникальных проектов класса Megascience в виде научно-исследовательских комплексов, предназначенных для проведения высокотехнологичных исследований в интересах различных отраслей науки и техники. Одним из них является строящийся в Новосибирске источник синхротронного излучения СКИФ (Сибирский кольцевой источник фотонов), ориентированный на решение актуальных задач в области физики, химии, материаловедения и других наук. Новосибирский государственный технический университет координирует разработку исследовательских станций в области материаловедения. На станциях этой направленности с использованием различных схем исследования, в том числе *in situ*, планируется изучение структуры и фазового состава конструкционных материалов, подвергнутых ряду технологических переделов. В связи с этим, важное значение имеет вопрос о выборе методов исследований, которые будут доступны пользователям. Для ответа на него был проведен анализ используемых в настоящее время методов изучения материалов, основанных на синхротронном излучении. С учетом интересов потенциальных пользователей СКИФ в числе наиболее востребованных методов были включены рентгеновская дифракция, рентгеновская компьютерная томография и ламинография. Для решения ряда задач предполагается использовать подходы, основанные на левитации анализируемых объектов, которые позволят на высоком уровне исследовать процессы плавления, кристаллизации и стеклообразования.

# ПОЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ШЕРОХОВАТОСТИ НА СТАДИИ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ СТАЛИ 09Г2С

К. В. Наумов<sup>б\*</sup>, А. П. Владимиров<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Уральский Федеральный Университет, 620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В настоящее время изучение различных аспектов многоцикловой усталости металлов является актуальной задачей, как с научной, так и с практической точки зрения. Ранее исследованием, проведенным в ИМАШ УрО РАН, было показано, что в момент зарождения трещины локальное предельное значение растягивающей деформации в металле имеет значение порядка  $10^{-1}$ . Целью настоящего исследования являлись проверка воспроизводимости данного значения, а также анализ полей пластических деформаций в зоне зарождения трещины и вдали от нее. Объектом исследования был образец из стали 09Г2С с двумя симметричными выточками радиусом 2,5 мм. Образец циклически деформировали с частотой порядка 100 Гц, коэффициент асимметрии цикла равнялся 0,1, двойную амплитуду цикла через 50–100 тыс циклов увеличивали на 0,1 кН. Две компоненты вектора относительного перемещения точек поверхности на базе порядка 10 мкм определяли методом усредненных спекловых изображений. Время усреднения равнялось 50 циклам. Приведены эпюры пластических деформаций вблизи трещины и вдали от нее. Показано, что в зоне зарождения трещины максимальное значение растягивающих деформаций имеет величину порядка  $10^{-1}$ . Показано также, что вблизи трещины имеются как области пластического растяжения, так и участки пластического сжатия.



# **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В. С. Шахиджанов, О.А. Нехорошева, О.С. Зиновьева, В.А. Романова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, пр. Академический, 2/4,  
г. Томск, Российская Федерация

Методом корреляции цифровых изображений была исследована эволюция деформационного рельефа в образцах алюминия одновременно с контактной профилометрией методом stop-and-study. Одна из поверхностей образца была подготовлена для снятия профиллограмм, противоположная поверхность была подготовлена для исследования методом корреляции цифровых изображений. Для этого на нее наносился контраст по всей области рабочей части. На этапах растяжения поверхность образца, обработанная контрастом, снималась с помощью цифровой оптической системы Vic3D. При заданных степенях деформации нагружение останавливалось и участки на противоположной поверхности образца подвергались контактной профилометрии вдоль оси растяжения. На основе анализа полученных результатов была установлена корреляция между пластической деформацией в направлении растяжения и интенсивностью деформационного рельефа на мезоуровне. Существование зависимости между степенью локальных пластических деформаций и интенсивностью деформационного рельефа было использовано для аттестации деформированного состояния материала.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда  
(проект № 20-19-00600).*

# **ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 09Г2С**

С. А. Никулин, С. О. Рогачев\*, В. А. Белов, Н. В. Шплис

НИТУ «МИСиС», 119049, Ленинский пр-т, 4, г. Москва, Российская Федерация

Изучено влияние длительного термического воздействия на деградацию высокотемпературных механических свойств металла шва сварного соединения из стали 09Г2С в интервале температур от 750 до 1200 °С. Исходный горячекатаный лист толщиной 60 мм подвергали закалке и отпуску. Сварное соединение было получено методом автоматической аргодуговой сварки плавящимся электродом в соответствии с ПНАЭ Г-7-009-89.

Испытания на растяжение цилиндрических образцов с размерами рабочей части  $\varnothing 4 \times 20$  мм в интервале температур от 750 до 1050 °С проводили на машине Zwick/Roell, а при температурах 1100 и 1200 °С – на комплексе Gleeble 3800. Часть образцов предварительно выдерживали при каждой температуре испытания в течение 3,7 ч и охлаждали на воздухе.

Показано, что предварительная выдержка образцов при 750 °С приводит к снижению прочности на 40 % (по сравнению с образцами без выдержки), а в интервале температур 800–1200 °С оказывает слабое влияние на изменение прочности. В то же время предварительная выдержка образцов в интервале температур 750–900 °С приводит к снижению относительного удлинения в 1,5–2 раза, а в интервале температур 950–1200 °С не оказывает статистически значимого влияния на величину относительного удлинения.

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА УДАРНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

И. Н. Одинцев, Т. П. Плугатарь\*

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН,  
101990, Малый Харитоньевский пер. 4, г. Москва, Российская Федерация

Известен способ экспериментального определения остаточных напряжений во внешних слоях материала путем анализа упругопластических откликов на внедрение в поверхность тела жесткого индентора. Благодаря неразрушающему характеру пробного воздействия, он, очевидно, обладает предпочтением по сравнению с методом сверления отверстий-индикаторов. При этом в техническом аспекте наиболее эффективным здесь является применение динамического (ударного) индентирования.

В настоящей работе рассмотрены различные аспекты получения необходимых исходных экспериментальных данных для реализации рассматриваемого метода. Регистрация деформационного отклика в окрестности точки индентирования осуществляется с помощью высокоточной электронной спекл-интерферометрии. Выполненные тестовые эксперименты уже на качественном уровне убедительно свидетельствуют об эффективности предлагаемого подхода. В плане его последующего практического применения к исследованию реальных элементов конструкций может использоваться разработанный сотрудниками ИМАШ РАН малогабаритный автономный спекл-интерферометр.

Предполагается, что на следующем этапе работы будет создана специализированная компьютерная программа, реализующая решение обратной задачи механики деформируемого твердого тела для интерпретации первичных данных в терминах компонент напряжений. Алгоритм ее итерационного решения рассматривается в работе.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОХАСТИЧНОСТИ ЭНЕРГОПОГЛОЩЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ВБЛИЗИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА

Н. А. Оливенко\*, О. А. Кудрявцев

Южно-Уральский государственный университет (НИУ),  
454080, пр. Ленина, 76, г. Челябинск, Российская Федерация

Использование слоистых полимерных композитных материалов (ПКМ) в конструкциях, которые могут подвергаться высокоскоростному удару, требует понимания особенностей их механического поведения при скоростях ударника, близких к баллистическому пределу. Вблизи баллистического предела существует область неоднозначных результатов (ОНР), когда при одной и той же начальной скорости ударника возможен как пробой, так и непробой композитной преграды. При анализе защитных свойств композитной преграды чаще всего ограничиваются оценкой величины баллистического предела  $V_{50}$ . Под  $V_{50}$  понимают скорость ударника, при которой вероятность сквозного пробития составляет 50 %. На сегодняшний день в доступной литературе практически отсутствуют работы, посвященные исследованию стохастичности энергопоглощения ПКМ, остается неосвещенным вопрос о связи ширины ОНР с разбросом прочностных свойств материала, толщиной преграды и другими факторами. В работе представлены результаты экспериментального исследования ширины ОНР для образцов стеклопластика толщиной 4, 6 и 8 мм. Получены оценки соответствующих баллистических пределов, построены баллистические кривые и кривые вероятности пробития при скоростях вблизи  $V_{50}$ . Установлено, что с ростом толщины композита увеличивается разброс запреградной скорости при сквозном пробое. Полученные данные о ширине ОНР в дальнейшем могут быть использованы для верификации расчетных моделей высокоскоростного ударного нагружения композита с учетом разброса свойств материала.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОГО ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА В КОНТЕКСТЕ МАКРОУСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А. А. Остапчук

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН,  
119334, Ленинский проспект, 38, корп.1, г. Москва, Российская Федерация

Фрикционная неустойчивость является преобладающим механизмом коровых землетрясений и проявляется в виде проскальзыванием берегов тектонического разлома. Скольжение может охватить как локальную небольшую область, так и распространиться на десятки километров вызывая многочисленные экономические потери. Динамическое проскальзывание инициируется, например, при достижении эффективными напряжениями локального предела прочности или ростом порового давления. В то же время интенсивность динамического проскальзывания определяется распределением фрикционных свойств вдоль интерфейса разлома.

В настоящей работе представлена методика определения фрикционных свойств локальных участков интерфейса разлома на основе анализа данных слабой сейсмичности (пассивного мониторинга). В основе методики лежит DPS алгоритм топологической фильтрации многомерных массивов данных, который нацелен на выделение в конечном множестве Евклидова пространства плотных областей заданного уровня плотности. В условиях, когда имеется априорная информация о структурных особенностях исследуемой системы, DPS позволяет с высокой точностью выявлять фрикционно-неустойчивые области. Именно в окрестностях выделенных областей зарождается динамическое проскальзывание, а размеры областей определяют интенсивность динамического проскальзывания.

Алгоритм DPS фильтрации является универсальным и может быть применен с целью структурного анализа как природных, так и техногенных систем. Исходной информацией для анализа техногенных систем будут данные пассивного акустоэмиссионного мониторинга.

# **ОТКЛИК КОНСТРУКЦИИ НА СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЯХ**

Д. А. Ошмарин\*, Н. А. Юрлова, Н. В. Севодина

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614068, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

В связи с возрастающим применением пьезоэлектрических актуаторов в задачах управления динамическим поведением конструкций особое место занимают исследования, посвященные определению законов управления, обеспечивающих их работу по демпфированию колебаний объектов. Для этого необходимо понимание того, какой механический отклик возникнет в конструкции на то или иное внешнее механическое или электрическое воздействие, либо на их комбинацию. Данному исследованию посвящена настоящая работа.

Исследование проведено численно на основе решения задачи о вынужденных установившихся колебаниях кусочно-однородных электро-вязкоупругих тел. Под механическим откликом понимается амплитуда перемещений заданной точки конструкции. Электрический сигнал подается на пьезоэлемент, прикрепленный к поверхности конструкции. Вязкоупругие свойства материалов учитываются посредством комплексных динамических модулей.

Рассмотрено совместное действие на консольно-защемленную пластину фиксированного механического воздействия (перемещения консольной заделки или приложение сосредоточенной силы к свободному концу пластины) и изменяющегося электрического сигнала, подаваемого на пьезоэлемент.

Полученные результаты показали принципиальную возможность управления величиной механического отклика конструкции при совместном действии электрического и механического внешних воздействий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 19-41-590007 p\_a).*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

В. Ф. Павлов, В. С. Вакулюк, В. П. Сазанов, В. К. Шадрин, О. Ю. Семенова

Самарский университет, 443086, ул. Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

Для прогнозирования влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей машин используются два критерия: остаточные напряжения на поверхности опасного сечения детали и среднеинтегральные остаточные напряжения. На основании многочисленных и многолетних экспериментально-теоретических исследований, проведенных на кафедре сопротивления материалов и в научно-исследовательской лаборатории № 31 Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева разработан метод прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных различными способами деталей с концентраторами напряжений в виде резьбы, надрезов различной формы, втулки, напрессованной на вал, галтельных переходов, шлицев.

При прогнозировании предела выносливости использован критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, рассчитанный по толщине опасного сечения детали, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости. Установлено, что глубина нераспространяющейся трещины усталости определяется только размерами опасного сечения детали и не зависит от материала детали, способа упрочняющей обработки, типа концентратора, вида деформации (изгиб, растяжение-сжатие, кручение). Использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений при прогнозировании предела выносливости поверхностно упрочненных деталей с концентраторами напряжений во всех исследованных случаях дает приемлемые для практики результаты, в отличие от критерия остаточных напряжений на поверхности опасного сечения детали.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА DIC ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ ВОЛОКОННО-АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ УСТАЛОСТИ

С. В. Панин<sup>а, б \*</sup>, А. А. Богданов<sup>а, б</sup>, П. С. Любутин<sup>а</sup>, А. В. Еремин<sup>а, б</sup>,  
Д. Г. Буслович<sup>а</sup>, А. В. Бяков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, просп. Ленина, 30, г. Томск, Российская Федерация

На базе сервогидравлической испытательной машины и оптической системы измерения деформации по принципу DIC реализован лабораторный комплекс для изучения процессов усталости полимеров и полимерных композитов по параметрам петель механического гистерезиса. Регистрация нагрузочных данных основана на аппаратных показаниях силоизмерителя машины Biss (Bangalore, India). Оценка деформации проводилась оптическим методом в пределах рабочей зоны образца. С целью снижения влияния шумов и помех реализована программная аппроксимация нагрузочно-деформационных данных. Показано, что рассчитанные по данным оптического метода значения величины деформации эффективно аппроксимируются глобальной B-сплайн функцией. Для оценки деградации прочностных свойств в ходе циклических испытаний использованы следующие параметры петель механического гистерезиса: динамический и секущий модули, а также площадь петли гистерезиса. В работе исследованы свойства композитов при малоцикловой усталости (до  $10^4$  циклов), армированных 10 % масс коротких углеродных волокон двух типов: карбонизированные (CCF) и графитизированные (GCF). Получено, что композит, армированный CCF волокнами, имеет на порядок большую долговечность, чем с GCF волокнами. Это отразилось на параметрах петель, главным образом на секущем модуле, снижение которого к моменту разрушения составило 400 МПа для CCF и 200 МПа GCF. Таким образом метод DIC и параметры петель могут быть информативными параметрами оценки деградации свойств при усталости.



# СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПЭЭК И УВ-ТКАНИ

С. В. Панин<sup>а, б, \*</sup>, А. В. Бяков<sup>а</sup>, В. О. Алексенко<sup>а</sup>, С. А. Бочкарева<sup>а</sup>,  
Д. Г. Буслович<sup>а</sup>, Тян Дэфан<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, просп. Ленина, 30, г. Томск, Российская Федерация

В последнее время в научно-технической литературе активно обсуждаются аспекты формирования слоистых композитов на основе термопластов с использованием оборудования для УЗ-сварки. Актуальность данного подхода обусловлена возможностью формирования протяженных изделий путем последовательного УЗ-ассистированного воздействия на соединяемые слои (детали). При этом показано, что эффективным подходом к УЗ-консолидации слоев термопластов является применение промежуточных (расходуемых) пленок (так называемых Energy Director – ED). В процессе УЗ-воздействия происходит их плавление и формируется плотный слой, соединяющий стыкуемые пластины, как правило, одноименных материалов.

Помимо соединения пластин одноименных термопластов, применение УЗ-колебаний может быть способом формирования слоистых композитов, содержащих слои армирующих тканей. Однако использование препрега (армирующей ткани в связующем) может позволить формировать слоистые композиты и с помощью УЗ-технологий. Данный вопрос в настоящее время достаточно мало изучен в литературе.

Целью работы является исследование возможности получения высокопрочных неразъемных соединений слоев термопластических материалов (в данном случае высокопрочного полиэфирэфиркетона – ПЭЭК) и ткани из углеродных волокон с использованием станка для ультразвуковой сварки полимеров.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00741, <https://rscf.ru/project/21-19-00741/>».*

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ**

**А. М. Паньков, А. В. Ильиных, А. В. Лыкова, Т. В. Третьякова**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

При изготовлении деталей из аддитивных материалов предъявляется множество требований к качеству получаемых изделий, в том числе обеспечение изотропии упругих механических свойств. Для оценки анизотропии обычно используют результаты испытаний на растяжение образцов, выращенных под различными углами к направлению выращивания.

В работе приведены результаты испытаний на растяжение и кручение образцов из конструкционных сплавов, выращенных СЛС-методом под различными углами к направлению изготовления. Показано, что в испытаниях на кручение анизотропия упругих свойств проявляется сильнее, чем в испытаниях на растяжение (отличие в значениях упругих свойств составляет десятки процентов).

По мнению авторов, для оценки анизотропии упругих свойств материалов, полученных с применением аддитивных технологий, помимо испытаний на растяжение следует проводить испытания при других видах деформаций, например, кручение или сдвиг.

*Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-48-596007) и Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№FSNM-2020-0027).*

# **ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ПОКРЫТИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ИХ АДДИТИВНОМ ФОРМИРОВАНИИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Д. А. Паршин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
119526, пр-т Вернадского, 101 корп. 1, г. Москва, Российская Федерация

Рассматриваются процессы аддитивного формирования равномерных по толщине и свойствам слоев покрытий произвольной толщины на поверхностях цилиндрических изделий. Изучается влияние механических факторов, приводящих к развитию полей напряжений и деформации в получаемых покрытиях уже во время их формирования. Учет этих технологических напряжений и деформаций актуален при анализе прочности, предсказании коробления и отслоения покрытий как непосредственно в процессе их нанесения, так и при дальнейшей эксплуатации готового изделия. Работа посвящена моделированию технологических возможностей целенаправленного влияния на технологическое напряженно-деформированное состояние покрытия в процессе его аддитивного получения. Постановка и решение соответствующих задач технологического управления осуществляется в рамках неклассической математической модели непрерывно наращиваемого деформируемого твердого тела, развиваемой в настоящее время отечественной научной школой, созданной профессором А.В. Манжировым. В работе исследуются ситуации, в которых отсутствует возможность перераспределения напряжений в теле за счет реологических механизмов деформирования. В таких ситуациях эффекты, связанные с развитием напряжений в аддитивно получаемых деформируемых твердых телах (как показано в выполненных ранее исследованиях) проявляются наиболее характерно. В результате решения поставленных задач построен ряд зависимостей, на основе анализа которых делается ряд практически значимых заключений.

**ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫМ  
СОСТОЯНИЕМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СООРУЖАЕМЫХ ИЗ МАТЕРИАЛОВ  
С РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

Д. А. Паршин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
119526, пр-т Вернадского, 101 корп. 1, г. Москва, Российская Федерация

Крупногабаритные конструкции испытывают действие сил тяжести на протяжении всего процесса сооружения. Следовательно, учет этих сил только в финальной конфигурации не может в общем случае дать корректных представлений о напряженно-деформированном состоянии (НДС) конструкции: каждый добавляемый к конструкции новый материальный элемент оказывает на нее дополнительное воздействие своим весом, вызывая ее дополнительное деформирование, и суммарный эффект от последовательного включения в состав конструкции всех ее элементов не тождественен эффекту от одномоментного приложения сил тяжести к ним уже в составе сплошного твердого тела. В работе строится неклассическая математическая модель механики, основанная на фундаментальных принципах деформирования растущего континуума, для описания процесса послойного сооружения сводчатых конструкций из материалов, проявляющих реологические свойства старения и ползучести, в условиях непрерывного действия сил тяжести. Результаты выполненного моделирования демонстрируют возможности технологического управления НДС конструкции за счет надлежащего варьирования скорости ее сооружения, например, возможность подбора такой программы сооружения, при которой удастся в конечном итоге ощутимо снизить первоначально возникающие достаточно высокие напряжения в конструкции (вследствие ее малой прочности на начальной стадии сооружения) и при этом в течение всего процесса сооружения не превысить определенный допустимый уровень действующих в конструкции напряжений.

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВКЛЮЧЕНИЙ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА ЗАКРЫТОЯЧЕЙСТЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР**

Ю. В. Пирогова\*, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

В работе исследуется влияние формы пустот в пористых 3D-печатных пористых структурах с закрытыми ячейками на их упругие свойства и механическое поведение с использованием результатов морфологического анализа микроструктуры, численного моделирования и экспериментальных исследований. Построены геометрические модели неоднородных структур с непересекающимися включениями. В качестве формы включения были выбраны тетраэдр, октаэдр, куб, икосаэдр и сфера. Рассмотрены случаи как случайного, так и периодического распределения включений. Упругое поведение и свойства исследуемых представительных объемов были смоделированы с использованием конечно-элементного анализа. Выполнена оценка различных морфологических параметров структур на основе анализа многоточечных статистических характеристик. Установлены закономерности, связывающие характеристики внутренней структуры с механическим поведением и свойствами среды.

Образцы исследуемых структур были изготовлены с использованием аддитивных технологий FDM/FFF. Были проведены испытания образцов на сжатие с регистрацией полей деформаций на поверхности с использованием метода корреляции цифровых изображений. Выполнен сравнительный анализ соответствия экспериментальных результатов и численных расчетов.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО $\alpha$ -ТИТАНА

М. Писарев<sup>а, б, \*</sup>, Е. С. Емельянова<sup>а, б</sup>, В. А. Романова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

В работе численно исследуется деформационное поведение поликристаллического  $\alpha$ -титана. Поведение зерен описывается в рамках физической теории пластичности кристаллов. В связи с тем, что в данной теории поликристалл представляет собой совокупность монокристаллов, для верификации параметров модели были проведены тестовые расчеты на 12 монокристаллах титана с различной ориентацией оси нагружения.

Часть работы посвящена оценке вкладов пирамидальных систем скольжения в деформационное поведение поликристаллов. Для этого были проведены расчеты с учетом и без учета пирамидального скольжения. Показано, что в расчетах без учета пирамидальных систем скольжения наблюдается существенно повышенный уровень локальных напряжений, нехарактерный для пластически деформируемых металлов.

Размеры представительного объема оценивались на 4 модельных поликристаллах разных размеров. Модели больших размеров были получены путем трансляции исходной поликристаллической модели в двух перпендикулярных направлениях. Анализ расчетов показал, что до 10% деформации пластическая деформация развивается одинаково. При дальнейшем нагружении в исходном поликристалле наблюдается нехарактерное для данных степеней деформации образование шейки, связанное с размером модели. Таким образом, чтобы выбрать размеры представительного объема, необходимо руководствоваться наибольшей степенью деформации, которая будет приложена к модели.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00600).*

# **ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ КОРПУСНОЙ СТАЛИ 20ГН ПРИ УПРУГОМ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ**

А. М. Поволоцкая\*, А. Н. Мушников

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Работа направлена на изучение особенностей поведения магнитных характеристик, в том числе продольной магнитострикции, образцов из корпусной стали 20ГН, предварительно пластически деформированных растяжением на различные степени (вплоть до 17,5 %), в условиях последующего упругого одноосного растяжения вдоль того же направления с целью выявления характера наведенной таким силовым воздействием магнитной анизотропии.

Показано, что такие магнитные характеристики как коэрцитивная сила, остаточная индукция, максимальная магнитная проницаемость, максимальная дифференциальная магнитная проницаемость с ростом приложенных напряжений изменяются немонотонно, с образованием экстремумов. Величина приложенных напряжений, соответствующая этим экстремумам, определяется уровнем сформированных предварительным пластическим нагружением остаточных напряжений сжатия.

Исследования магнитострикции образцов из стали 20ГН, подвергнутых предварительному пластическому растяжению на различные степени, показали, что последующее упругое деформирование на определенном этапе приводит к смене знака магнитострикции и, соответственно, смене типа магнитной текстуры. При этом диапазоны растягивающих напряжений, в которых магнитострикция становится отрицательной, совпадают с диапазонами напряжений, в которых формируются экстремумы на зависимостях магнитных параметров от растягивающей нагрузки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-48-660035\_p\_a.*

# **РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫДАВЛИВАНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

П. А. Поляков, А. П. Поляков

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Процесс выдавливания, является одним из основных технологических процессов порошковой металлургии. Рассмотрена методика расчета параметров процесса выдавливания прутков из порошковых композиций на основе железа с малыми легирующими добавками, позволяющая прогнозировать плотность прутков в зависимости от начальной пористости заготовки, вытяжки, угла конусности матрицы, определять давление выдавливания. При разработке технологических параметров процесса прессования порошковых заготовок важно обеспечить возможность их последующей термомеханической обработки в неспеченном состоянии, что позволяет существенно снизить затраты при производстве. В частности, выдавливание в холодном состоянии расширяет возможности порошковой металлургии.

Полученные данные предполагается использовать для технологических расчетов процессов производства деталей машиностроительного назначения из порошков.



# **ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ НА ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ**

В. А. Полянский\*, А. К. Беляев, Ю. А. Яковлев

ИПМаш РАН, 199178, г. Санкт-Петербург, Большой проспект В.О., д. 61, Российская Федерация

В работах Эдуарда Степановича открыта связь магнитных характеристик стальных образцов с длительностью экспонирования в коррозионной среде и с феноменом малоциклового усталости. Наблюдается важное для использования при технической диагностике, скачкообразное изменение функциональных зависимостей.

Наши исследования представляют собой «вторую половину» феномена. Мы измеряли акустические характеристики и распределение концентрации водорода при малоциклового усталости и после экспонирования в коррозионной среде.

Изменение распределения концентрации водорода в металлах и изменение акустических характеристик связано с накоплением поврежденности в образцах, при этом, наблюдается скин-эффект распределения концентрации водорода. Водород является источником и, одновременно, - индикатором накопления поврежденности в поверхностном слое, которое приводит к акустической анизотропии металла. С другой стороны, он вызывает перераспределение внутренних механических напряжений, приводящее к изменению магнитных характеристик и характера их зависимости от напряжений и деформаций.

Этот комплексный феномен имеет принципиальное значение для технической диагностики и для механики разрушения.

*Исследования выполнены при поддержке РНФ, проект № 18-19-00160.*

# **ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА ПАРАМЕТРЫ И СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД**

Д. А. Попов, Д. Д. Попова, Н. А. Самойленко

АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

Современный газотурбинный двигатель должен отвечать высоким требованиям по топливной экономичности, определяемой эффективностью входящих в состав двигателя узлов. Наибольшее влияние на КПД турбины оказывает наличие радиального зазора в рабочих венцах и генерируемые им потери, составляющие около 25–30 % от суммарных потерь. Для авиационного двигателя изменение радиального зазора на 0,25 % в относительной величине соответствует изменению КПД турбины примерно на 1 %. Следовательно, моделирование течения в радиальном зазоре и его влияние на эффективность рабочего процесса турбины является достаточно важным аспектом в повышении экономичности ГТД.

На основании осесимметричных тепловых расчетов с последующим определением НДС найдены радиальные перемещения ротора и статора турбины. При суммировании результатов стационарного трехмерного расчета теплового состояния и НДС лопатки с перемещениями ротора и статора определена действительная форма радиального зазора, значение которого по входной кромке больше в 2,4 раза, чем по выходной.

По результатам трехмерного газодинамического анализа определено, что учет действительной формы радиального зазора в модели рабочей лопатки приводит к увеличению КПД ступени турбины на 0,40 %, снижению потерь кинетической энергии более, чем на 5 % и увеличению крутящего момента на 0,28 %. Полученные эффекты достигнуты за счет уменьшенной величины действительного зазора в зоне максимального градиента давления между корытом и спинкой лопатки, что приводит к уплотнению зазора и уменьшению расхода рабочего тела через него на 20 %.

# **НАХОЖДЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В ЗАДАЧАХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ**

**Е. Ю. Просвиряков**

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН,  
620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Интегрирование уравнений гидродинамики, описывающих течение вязких (ньютоновских) несжимаемых жидкостей, является одной из центральных научных проблем мирового уровня. Основная трудность, возникающая при интегрировании уравнений, заключается в квадратичной нелинейности уравнений Навье-Стокса. Каждое точное решение уравнений Навье-Стокса является востребованным в теоретической и прикладной гидродинамике. Достаточно упомянуть точное решение Куэтта-Тейлора, которое служит основой объяснения функционирования вискозиметров; точное решение Пуазейля помогает интерпретировать профили скоростей в трубопроводах, кровеносных сосудах и других каналах; колебания в жидкости изучаются благодаря решению задачи Стокса; описание вращающейся жидкости происходит посредством точного решения Экмана. Отметим, что упомянутые классические решения являются основными течениями для исследования влияния различных возмущений при решении задач линейной и нелинейной теории гидродинамической устойчивости.

Несмотря на колоссальную трудность и отсутствие регулярных алгоритмов для нахождения точных решений уравнений Навье-Стокса, построение классов точных решений является актуальной задачей. В последнее десятилетие появилась возможность в точной постановке описывать течения вязкой несжимаемой жидкости с неоднородным полем скоростей. В докладе рассматриваются классы точных решений для неоднородных модификаций классических течений с приложениями для фундаментальных и прикладных исследований.

# МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРОЧНОСТЬ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ КОМПОЗИТА Cu-Ti-C-V

Н. Б. Пугачева\*, Ю. В. Николин, Т. М. Быкова

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН,  
620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Композиционные материалы и покрытия, получаемые методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, положительно зарекомендовали себя с точки зрения обеспечения повышенной твердости и износостойкости. Выбор химического состава матрицы композита определяет склонность к развитию трещин при внешних механических нагрузках. Интерес представляет использование меди и ее сплавов в качестве матрицы для деталей и элементов конструкций электротехнического и теплообменного назначения.

Исследованный композит Cu-Ti-C-V состоит из матрицы в виде твердого раствора на основе меди и упрочняющих фаз TiC и TiB<sub>2</sub>, частицы которых неравномерно распределены по объему композита и имеют размеры от 0,1 до 3 мкм. Зафиксированы единичные частицы карбида кремния V<sub>4</sub>C, непрореагировавшие при синтезе. Упрочняющие фазы обеспечили высокую интегральную твердость композита на уровне 60–62 HRC. Плотность композита составила 6,8 г/см<sup>3</sup>. Неравномерное распределение структурных составляющих привело к отличиям микромеханических свойств разных объемов композита. Наиболее пластичной структурной составляющей является механическая смесь ‘Cu+TiC’, наименее пластичной – ‘Cu+V<sub>4</sub>C’. Благодаря преобладанию в объеме композита составляющей ‘Cu+TiC’ образцы разрушаются по вязкому механизму. Прочность исследованного композита при испытаниях на поперечный изгиб составила  $R_{bm30} = 820$  МПа.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22–29–00188.*

# **ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ AISI 321 НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Е. А. Путилова\*, Л. С. Горулева, С. М. Задворкин

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Фрикционная обработка коррозионностойких метастабильных сталей позволяет добиться улучшения прочностных свойств и эксплуатационных характеристик подобных материалов. В основном этот результат достигается благодаря формированию градиентной мелкодисперсной структуры в поверхностном слое. При этом изменение фазового состава и структуры приводит также к изменению магнитного состояния материала. В статье приведены результаты влияния варьирования нормальной нагрузки на индентор при поверхностной фрикционной обработке скользящим индентором в защитной атмосфере аргона на изменение фазового состава и уровня магнитных характеристик стали AISI 321. Установлены зависимости количества образовавшейся ферромагнитной фазы и твердости от нормальной нагрузки на индентор. Показано, что удельная намагниченность монотонно изменяется в зависимости от нормальной нагрузки на индентор, что позволяет использовать ее в качестве информативного параметра для диагностики образования мартенсита деформации в процессе фрикционной поверхностной обработки коррозионностойкой метастабильной стали AISI 321.

# **ВЛИЯНИЕ ПРИЛОЖЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Е. А. Путилова\*, К. Д. Крючева

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Разработка неразрушающих методов оценки напряженно-деформированного состояния конструкций на стадии их изготовления и эксплуатации является актуальной задачей неразрушающего контроля. Для решения поставленной задачи требуется изучение поведения магнитных характеристик в условиях действующих нагрузок, с целью моделирования различного напряженно-деформированного состояния, которое может возникать в реальных условиях эксплуатации. Зная закономерности поведения магнитных характеристик, установив информативные параметры и диапазон их применимости можно в дальнейшем использовать эти знания при разработке конкретных методик и приборов для осуществления контроля на реальных объектах.

В данной работе представлены результаты по исследованию влияния упруго-пластической деформации одноосным растяжением на изменение магнитных свойств конструкционных низколегированных сталей, используемых в основном для конструкций, работающих под давлением. Проведено сравнение влияния структурного состояния материала на уровень магнитных параметров. Для исследованных сталей установлены диапазоны напряжений одноосного растяжения, при которых коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная магнитная проницаемость изменяются монотонно. Это позволяет использовать эти характеристики в качестве информативных параметров для оценки степени деформации одноосным растяжением в изделиях из исследованных материалов.

# **АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ УДАРНИКОВ ИЗ СТАЛИ И ТЯЖЕЛЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ**

**П. А. Радченко, А. В. Радченко\*, С. П. Батуев**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Исследовано разрушение высокопрочных стальных ударников и ударников из вольфрамоникелевых сплавов при косом и нормальном взаимодействии с различными металлическими преградами в диапазоне скоростей 200–1000 м/с. Изучено влияние формы головной части ударника, вращения, угла атаки на процесс взаимодействия и разрушение преграды и ударника. Моделирование проводится в трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием высокопроизводительного авторского алгоритма и программного комплекса EFES 2.0, позволяющего моделировать фрагментацию взаимодействующих тел с образованием новых контактных и свободных поверхностей, эрозионное разрушение материалов. В вычислительном комплексе реализовано полное распараллеливание вычислительного процесса, что позволило существенно увеличить его производительность. Адекватность математической модели и численного алгоритма подтверждается хорошим согласием экспериментальных и численных результатов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-21-20091).*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ УДАРЕ

А. В. Радченко\*, П. А. Радченко, С. П. Батуев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Численно исследовано разрушение ортотропных композитов при низко- и высокоскоростном взаимодействии с компактными и удлиненными ударниками. Моделирование проводится методом конечных элементов в трехмерной постановке в рамках феноменологического подхода механики сплошной среды с использованием авторского программного комплекса EFES. Для описания разрушения анизотропного материала используются деформационные и силовые критерии прочности. Исследовано влияние ориентации упругих и прочностных свойств ортотропного композита, угла атаки на его разрушение и поведение ударников в процессе взаимодействия. Показано, что наличие угла атаки при взаимодействии длинных ударников может приводить к потере устойчивости ударника и оказывает существенное влияние на развитие разрушения в преграде. При рассмотренных условиях взаимодействия наличие угла нугации приводит к увеличению объема разрушенного материала в преграде. Ориентация упругих и прочностных свойств материала преграды влияет на процесс проникания ударника – возможно создание условий для рикошета ударника. Направленно изменяя ориентацию свойств анизотропного материала, можно повысить стойкость преграды к ударным нагрузкам без увеличения массогабаритных характеристик.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-21-00407).*



# ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ОБРАЗЦА МЕЖДУ БОЙКАМИ В УСЛОВИЯХ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

С. О. Рогачев<sup>а, \*</sup>, В. М. Хаткевич<sup>б</sup>, Р. В. Сундеев<sup>в</sup>, М. В. Горшенков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> НИТУ «МИСиС», 119049, пр-т Ленинский, 4, г. Москва, Российская Федерация

<sup>б</sup> ООО «ТМК НТЦ», 121205, б-р Большой, 5, г. Москва, Российская Федерация

<sup>в</sup> РТУ МИРЭА, 119454, пр-т Вернадского, 78, г. Москва, Российская Федерация

Кручение под высоким давлением (КВД) – метод большой пластической деформации, реализуемый путем одновременного сжатия тонкого образца между двумя бойками и его кручения благодаря повороту нижнего бойка. В результате за счет сил поверхностного трения между образцом и бойком достигаются большие степени сдвиговой деформации образца. Для точного расчета сдвиговых деформаций необходимо *in-situ* наблюдение процесса КВД-деформации образца.

В качестве модельных образцов использовали две заготовки – из легкодеформируемого и труднодеформируемого материалов. Заготовка представляла собой диск диаметром 9 мм и толщиной 0,7 мм со вставкой шириной 1,5 мм, уложенной вдоль радиуса. В качестве легкодеформируемой заготовки использовали чистую Cu со вставкой из Nb, а в качестве труднодеформируемой – сплав MnAl со вставкой из Cu. КВД проводили с числом оборотов от 0,5 до 10.

Показано, что 1 оборот КВД медного образца приводит к полному повороту Nb-вставки на 360°. Напротив, даже 3 оборота КВД образца из сплава MnAl приводят к повороту Cu-вставки на угол всего около 15°, как результат проскальзывания образца между бойками.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ КОВКИ**

А. А. Роговой, Н. К. Салихова

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614018, ул. Академика Королева, дом 1, г. Пермь, Российская Федерация

В работе численно исследовалось структурообразование никелевого сплава Waspaloy в результате горячей обработки давлением – свободной осадки заготовки. В ходе такого термомеханического воздействия инициируется процесс динамической рекристаллизации – появление малодефектных зародышей новых зерен и их последующий рост. Для описания эволюции зеренной структуры использовался феноменологический подход, реализованный в программном комплексе DEFORM–2D/3D. В частности, выбрана модифицированная модель Джонсона–Мела–Аврами–Колмогорова (Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov, JMAK), уравнения которой, позволяют вычислить объемную долю рекристаллизованного материала и описать трансформацию зеренной структуры металлического сплава Waspaloy. Выполнен анализ деформированного и теплового состояний крупного слитка из Waspaloy, нагретого до различных начальных температур 1100 °С или 1150 °С и подвергнутого осадке до среднего диаметра ~1060 мм со скоростью деформирования 100 мм/с. Исходя из численных расчетов, определены рациональные параметры технологического режима деформирования заготовки, позволяющие снизить усилие, затрачиваемое на осуществление процесса свободной осадки.

# МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. А. Роговой, О. С. Столбова

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614018, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

Ферромагнитные сплавы, такие как сплавы Гейслера, относятся к классу функциональных (умных) материалов благодаря их способности изменять форму и размер под действием внешнего магнитного поля. В низкотемпературном (мартенситном) состоянии в этих сплавах образуются сдвоенные согласованные между собой структуры (двойники), которые могут раздвойниковываться при приложении напряжения и (или) внешнего магнитного поля, что вызывает значительную деформацию до 6–10 %.

В данной работе построена мезоструктурная модель поведения сплава Гейслера в магнитном поле, описывающая такие процессы, как движение стенок магнитных доменов, вращение векторов намагниченности и раздвойникование мартенситных вариантов. Сначала численно методом конечных элементов в рамках теории микромагнетизма, когда динамика процесса намагничивания описывается уравнением Ландау–Лифшица–Гильберта, решается чисто магнитная задача для сдвойникованной мартенситной структуры типа «елочка». Затем рассматривается кинематика процесса двойникования, сводящегося к простому сдвигу. Приведено и конкретизировано решение уравнения двойникования (совместности) для сплава Гейслера  $Ni_2MnGa$ . Предложено условие раздвойникования для такого сплава при действии только внешнего магнитного поля. С учетом процесса переориентации мартенситных вариантов, образующих двойник, построены кривые намагничивания и определены компоненты тензора деформации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-01-00031).*

# ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИ НАГРУЖЕНИЯХ МЕТАЛЛОВ С ИЗЛОМОМ ТРАЕКТОРИИ ДЕФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

К. А. Романов, А. И. Швейкин, П. В. Трусков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, пр. Комсомольский, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Рассматривается известный из экспериментов эффект изменения интенсивности напряжений после излома траектории деформирования. В литературе объяснение повышения интенсивности напряжений после нырка связывается с затруднением движения дислокаций, активных при нагружении после излома траектории деформирования, за счет дислокационной структуры, образованной до излома. В макрофеноменологических и многоуровневых моделях это учитывается через анизотропию поверхности текучести на макроуровне и мезоуровне соответственно.

Для исследования поведения ГЦК-поликристаллов с высокой энергией дефекта упаковки использована двухуровневая конститутивная статистическая модель, идентифицированная для алюминиевого сплава. Выявлено, что и при применении изотропного закона упрочнения эффект изменения интенсивности напряжений после излома также обнаруживается. Это указывает на еще один важный фактор для его проявления – статистические характеристики движения изображающих точек в пространстве напряжений вблизи поверхности текучести зерен; их исследованию уделяется особое внимание. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).*

# АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ И НАЛИЧИИ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ

А. А. Семенов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
190005, 2-я Красноармейская ул., 4, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

При изучении динамических процессов в тонких оболочках необходимо использовать наиболее точные модели их деформирования. Кроме того, сейчас большой интерес представляют конструкции из композиционных материалов, поведение оболочек из таких материалов и, тем более, подкрепленных ребрами жесткости, как в задачах статики, так и в задачах динамики, изучено недостаточно.

Автором разработана наиболее точная математическая модель для исследования прочности и устойчивости оболочечных конструкций, основанная на модели типа Тимошенко (Миндлина–Рейснера), комплексно учитывающая ортотропию материала, геометрическую нелинейность, нагрузку от собственного веса, поперечные сдвиги, инерцию вращения. Модель записана в виде функционала полной энергии деформации оболочки.

Для учета ребер жесткости автором предложен вариант метода конструктивной анизотропии для ортотропных конструкций, который заключается в сведении оболочки дискретно-переменной толщины к оболочке постоянной толщины, равновеликой по жесткости. Такой подход позволяет учитывать такие существенные факторы, как сдвиговая и крутильная жесткость ребер. Результаты расчетов показали хорошую сходимость со значениями, получаемыми при уточненном дискретном вводе ребер жесткости. Для некоторых конструкций значения стали близки при сетке ребер  $8 \times 8$ , а для некоторых уже при сетке  $4 \times 4$ .

*Работа выполнена в рамках гранта на выполнение НИР научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2022 году.*

# ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

М. А. Соковиков<sup>а, \*</sup>, М. Ю. Симонов<sup>б</sup>, В. В. Чудинов<sup>а</sup>,  
В. А. Оборин<sup>а</sup>, С. В. Уваров<sup>а</sup>, О. Б. Наймарк<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,

614013, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

<sup>б</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Эксперименты по динамическому нагружению образцов проводились на стержне Гопкинсона–Кольского и при пробивании преград. Температурные поля в процессе деформирования исследовались «*in-situ*» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

Микроструктурный анализ, проведенный с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации.

Данные экспериментальных исследований и численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30041).*

# **ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

О. А. Староверов\*, В. Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

В работе обсуждаются вопросы реализации закритической стадии деформирования в полимерных композиционных материалах в условиях предварительных циклических, низкоскоростных ударных, а также дополнительных вибрационных воздействий. Разработаны методики испытаний композиционных материалов в условиях комплексных внешних воздействий с совместным использованием испытательных и диагностических систем инфракрасного термосканирования, анализа акустического отклика, а также видеосистемы регистрации полей перемещений и деформаций. Получены новые экспериментальные данные, отражающие влияние предварительных и дополнительных механических воздействий на прочностные, деформационные, усталостные и эксплуатационные характеристики слоисто-волоконистых полимерных композитов. Выявлены закономерности воздействия дополнительных вибраций на реализацию деформационных ресурсов стеклопластиковых стержневых и углепластиковых трубчатых композитных элементов в процессах квазистатического растяжения. Предложена интерпретация опытных данных в виде диаграммы усталостной и ударной чувствительности. При анализе процессов накопления повреждений и разрушения показана хорошая корреляция между экспериментальными данными, результатами микроструктурного исследования и данными неразрушающего контроля.

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00765) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.*

# К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАЗУПРОЧНЯЮЩИМИСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ

В. В. Стружанов, А. Е. Чайкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Комсомольская 34, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация

Градиентная механическая система при квазистатическом нагружении описывается потенциальной функцией (лагранжианом), связывающей параметры состояния (обобщенные координаты системы) и управления (внешние силы). Причем параметры состояния должны принимать такие значения, при которых система находится в состоянии равновесия.

Разрушение системы есть явление того же порядка, что и явление невозможности равновесия. Поэтому под предельными значениями параметров управления следует понимать такие их величины, при реализации которых нарушается устойчивость системы.

Устойчивость системы нарушается при вырождении матрицы Гессе потенциальной функции. Предполагается численная процедура вычисления параметров состояния и управления, в которых матрица Гессе вырождена. Используя вырожденные точки матрицы Гессе, определяются предельные значения нагрузок.

Приведен пример расчета предельных нагрузок балочных элементов при чистом изгибе.



# **КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ УСТАЛОСТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ХАРАКТЕРА**

Е. М. Струнгарь\*, О. А. Староверов, Е. М. Лунегова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, д. 29, Пермский край, г. Пермь, Российская Федерация

В работе представлены результаты исследования механического поведения слоисто-волокнутого углепластика при комплексном низкоскоростном ударном и последующем циклическом изгибе. Реализован комплексный подход при изучении закономерностей процессов накопления повреждений с использованием современного испытательного и диагностического оборудования. Установлена зависимость остаточной усталостной долговечности исследуемого композита от интенсивности предварительного ударного изгиба. Показаны поля распределения температур в рабочей зоне образцов в ходе испытаний. Приведены данные о процессах накопления повреждений, полученные при регистрации сигналов акустической эмиссии. Выявлена связь в изменении регистрируемых сигналов акустического отклика и данных инфракрасного термосканирования, подкрепленными результатами экспериментального исследования. Использование дополнительной аппаратуры инфракрасного термосканирования и регистрации сигналов акустической эмиссии дают полноту картины накопления повреждений и разрушения композиционных материалов при хорошей корреляции с экспериментальными данными.

*Экспериментальные исследования в рамках оценки процессов усталостного накопления повреждений проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027). Исследование выполнено в ПНИПУ при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых МК-1545.2022.4.*

# ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В НЕРАВНОВЕСНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ

И. И. Суханов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск Российская Федерация

В рамках континуальной теории дефектов проанализированы особенности наноструктурных состояний с высокой кривизной кристаллической решетки в ниобии. Аттестация таких состояний, реализуемая через оценки континуальных плотностей дефектов, была проведена на основе результатов темнопольного анализа разориентировок дискретного и непрерывного типа. Это позволило построить пространственные распределения полей напряжений и энергий указанных состояний на наномасштабном структурном уровне. Установлено, что распределение энергии характеризуется высоко-локализованными экстремумами, в которых максимальная энергия, приходящаяся на атом, кратно (более чем в 2 раза) превышает энергию активации процессов самодиффузии. Предложен энергетический критерий высокоэнергетического состояния, заключающийся в том, что нормированная на атом энергия таких состояний соизмерима или превышает энергию активации различных процессов структурно-фазовой трансформации. В перспективе использование этого критерия позволит проанализировать возможность активации различных механизмов пластической деформации, и как следствие, оценить спектры промежуточных метастабильных состояний на наноуровне для широкого класса металлических материалов в условиях различных деформационных воздействий.

**МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ: ВЛИЯНИЕ  
НАПОЛНИТЕЛЯ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ  
ПУАССОНА АУКСЕТИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

А. С. Тарасова\*, М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, Российская Федерация

Большинство природных материалов и структур характеризуются положительным коэффициентом Пуассона. С появлением механических метаматериалов отрицательный коэффициент может быть достигнут с помощью рационально спроектированной архитектуры геометрии ячейки. Аддитивное производство (АП) позволяет изготавливать периодические структуры со сложной геометрией и необходимыми свойствами, состоящие из регулярных повторяющихся элементов. Геометрия ауксетика допускает поперечное расширение (сжатие) при продольном растяжении (сжатии). Уникальные механизмы деформации обеспечивают ауксетическим структурам превосходные механические свойства, демонстрируя широкие перспективы применения в легких конструкциях, устройствах защиты от ударов, биомедицинских устройствах, датчиках и др. Одна из наиболее распространенных ауксетических сот – вогнутая гексагональная элементарная ячейка. Ее ауксетическое поведение сохраняется не зависимо от ориентации ячейки (вертикальной или горизонтальной).

Данная работа посвящена исследованию механического поведения полых решетчатой структуры ауксетика и этой же структуры, наполненной полимером, с различной ориентацией ячейки. Численное моделирование выполнено с использованием метода конечных элементов. Решетчатые структуры были созданы из пластика с применением FDM печати. Проведены механические испытания образцов структур при растяжении. Данные о распределении деформаций на поверхности образцов получены с использованием системы корреляции цифровых изображений Vic-3D Micro-DIC.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА

Т. Д. Тимкина<sup>а, \*</sup>, Я. Н. Иванов<sup>а</sup>, В. С. Чудинов<sup>а, б</sup>, И. Н. Шардаков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,

614068, ул. Букирева, 15, г. Пермь, Российская Федерация

<sup>б</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН,

614013, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

Ионно-плазменная обработка полимерных материалов позволяет существенно изменить их поверхностные характеристики, такие как смачиваемость, биосовместимость, адгезионные и другие свойства. Для практического применения модифицированных плазмой материалов необходимо знать механические характеристики измененного поверхностного слоя.

В данной работе рассматриваются механические свойства карбонизированного слоя, сформированного в результате имплантации ионов высокой энергии в поверхность полиэтилена высокого давления. С помощью экспериментов на одноосное растяжение по оригинальной методике была получена зависимость модуля Юнга карбонизированного слоя от интенсивности ионно-плазменной обработки. С помощью растягивающего устройства, встроенного в цифровую систему оптической микроскопии, была определена разрушающая карбонизированный слой деформация при разных флюенсах ионно-плазменной обработки. Характер полученной зависимости упругого модуля поверхностного слоя от флюенса обработки согласуется с результатами спектрофотометрии полиэтилена после плазменной обработки. Эксперимент по определению предельной деформации показал, что при высоких значениях флюенса карбонизированный слой приобретает свойства, соответствующие хрупким материалам, а при низких дозах ионов проявляются свойства материала полимерной подложки.

*Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С-26/875 и гранта РФФИ №20-48-596014 р\_НОЦ\_Пермский край.*

# МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

## ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ $\text{AlMgB}_{14}$

Д. А. Ткачев, И. А. Жуков, В. И. Сачков, И. А. Бельчиков

Томский государственный университет, 634050, пр. Ленина, д. 36, г. Томск, Российская Федерация

В работе представлены результаты исследований керамических покрытий на основе соединения  $\text{AlMgB}_{14}$ , обладающих пониженным коэффициентом трения, до 0,1, и высокими значениями твердости, более 30 ГПа. Мишень для распыления состояла из предварительно синтезированного в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза порошка  $\text{AlMgB}_{14}$ . Как показали результаты рентгеноструктурного анализа, все рефлексы дифракционной картины соответствовали фазе целевого соединения  $\text{AlMgB}_{14}$ .

Покрытия наносили ионно-плазменным методом высокочастотного напыления на подложки из твердого сплава марки ВК-8 и стали. С целью подбора наиболее оптимального технологического режима, напыление осуществляли с варьируемым значением подаваемого на подложку напряжения смещения. Была исследована микроструктура, кристаллическая структура и морфология поверхности полученных покрытий. Показано, что разработанный режим напыления позволяет формировать покрытия со скоростью 1 мкм в час. По результатам исследования механических характеристик выявлено, что полученные покрытия обладают твердостью до 32 ГПа, низким коэффициентом трения, равным 0,13 и высокой адгезионной прочностью – критическая нагрузка отрыва от подложки для покрытия, полученного согласно наиболее оптимальному среди исследованных режимов нанесения, составляет 16 Н. Скорость износа составляет  $3,348 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Н·м, что говорит о высокой износостойкости материала.

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ В AL-MG СПЛАВЕ ПРИ СЛОЖНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Т. В. Третьякова\*, М. П. Третьяков, В. А. Мельникова, Е. А. Чечулина

ПНИПУ, 614000, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Изучение механизмов прерывистой текучести имеет важное практическое значение, так как большинство конструкционных металлов и сплавов склонны к данному явлению. В реальных технологических процессах материалы подвергаются деформированию по произвольным траекториям деформирования, в связи с этим представляет интерес анализ влияния сложных видов нагружения на проявления эффекта Портевена-Ле Шателье в образцах Al-Mg сплава.

Целью работы является экспериментальное исследование процессов зарождения и распространения деформационных полос локализованного пластического течения, определение границ неустойчивого пластического деформирования сплава AlMg6 в условиях сложного нагружения. Проведены механические испытания в условиях простого (пропорциональное одноосное растяжение и кручение) и сложного нагружений (растяжение после кручения, кручение после растяжения, растяжение после пропорционального нагружения). Изучение кинетики неоднородного пластического деформирования основано на использовании метода корреляции цифровых изображений и бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 20-79-10235).*

# **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Т. В. Третьякова\*, В. Э. Вильдеман

ПНИПУ, 614000, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Актуальным направлением в области механики деформируемого твердого тела является получение новых знаний о закономерностях неупругого деформирования конструкционных сплавов в условиях проявления эффектов прерывистого деформирования при различных видах напряженно-деформированного состояния, режимах сложного нагружения, а также в зависимости от жесткости нагружающей системы. Полученные экспериментальные данные позволят развить существующие и создать новых моделей неупругого поведения материалов, используемых при проектировании и прочностном анализе ответственных элементов конструкций и разработке технологических процессов обработки металлов.

Работа направлена на развитие современных методов экспериментальной механики и проведение комплексных экспериментальных исследований закономерностей пространственно-временной неоднородности процессов пластического течения металлов и сплавов при сложных термомеханических воздействиях с использованием испытательного оборудования, высокоточных средств измерений и систем регистрации данных с целью адекватного прогнозирования поведения материалов и конструкций в заданных эксплуатационных условиях, создания новых материалов и технологий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 20-79-10235).*

# **ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОРФИРИНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛУКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ**

П. М. Тюбаева<sup>а, б, \*</sup>, А. А. Ольхов<sup>а, б</sup>, А. А. Попов<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, 620049, ул. Косыгина, 4,  
119334, г. Москва, Российская Федерация

<sup>б</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, индекс,  
117997, Стремянный пер., 36, г. Москва, Российская Федерация

В последнее время нанокomпозиционные волокнистые материалы с высокими функциональными свойствами широко используются в различных областях, например: проводящие волокна, волоконно-оптические датчики, материалы для фотоники, генной терапии и биомедицины. Разработка современных волокнистых материалов с ценными функциональными свойствами на основе биоразлагаемых полукристаллических полимеров является актуальной научной проблемой. Целью данной работы является разработка методологии направленного проектирования биоразлагаемых волокнистых нанокomпозитов с заданными характеристиками. В работе рассмотрены методы направленной модификации полукристаллических полимеров природного происхождения (полигидроксибутирата) модифицирующими добавками на основе природных и синтетических порфириновых комплексов (тетрафенилпорфирин, металлопорфирины, гемин). Электроспиннинг является одним из наиболее продуктивных способов получения высокоразвитой хорошо ориентированной структуры с заданными свойствами. В работе было исследовано влияние добавок на полимерную волокнистую структуру и, как следствие, на свойства электросплавного материала. Сходства и различия в закономерностях структурообразования полукристаллического полимера под воздействием различных добавок позволяют сделать вывод о возможностях направленного проектирования супрамолекулярной структуры полимера.



# ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ

А. М. Утукина<sup>а, \*</sup>, И. Ю. Смолин<sup>а, б</sup>, В. А. Зимина<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Томский государственный университет, 634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

В последнее время значение пористых керамик в промышленности возросло благодаря их уникальному сочетанию свойств. Ее характеристики, такие как низкая плотность, большая удельная поверхность, высокая ударная вязкость, высокая стойкость к тепловому удару, хорошая теплоизоляционная способность и низкая диэлектрическая проницаемость открывают новые возможности для широкого спектра применений – от многочисленных промышленных процессов до бытовых изделий. Известно, что форма пор и распределение их в пространстве влияют на эффективные свойства пористого материала.

В рамках данной работы проведено численное исследование механического поведения пористых керамик при одноосном растяжении методом конечных разностей. Объектом исследования являлись модельные структуры пористой керамики с разной формой пор (круговые, эллипсоидные) и размером (униmodalная и бимodalная пористость), упорядоченным и хаотичным расположением пор. При этом объемная доля пор во всех структурах была одинаковой и составляла 16,5 %. Каркас исследуемых структур соответствовал оксиду алюминия, поры учитывались явно. В результате моделирования установлено влияние формы и расположения пор на эффективные упругие и прочностные характеристики пористой корундовой керамики. Показано, что для пористых структур с эллипсоидными включениями эффективные упругие модули и прочность оказались выше, чем у структур с круговыми включениями.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АРМИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А. А. Ушканов\*, А. А. Охлопкова, А. П. Аммосова

Северо-Восточный федеральный университет,  
677000, ул. Белинского, 58, г. Якутск, Российская Федерация

В современном столетии экологически безопасные волокна оказались в центре внимания материаловедов со всего мира как конкурентоспособное по характеристикам и по стоимости. В работе приведены результаты исследований по разработке полимерных композитов технического назначения на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и базальтовых или углеродных волокон. Для более прозрачной картины было принято решение отказаться от добавления дополнительных компонентов для каждого вида волокна. Установлено, что при введении волокон различной природы в полимерную матрицу прочностные свойства композитов при сжатии и растяжении увеличиваются до 19 % и 36 % соответственно, по сравнению с ненаполненным полимером. По мере роста концентрации волокон наблюдается увеличение износостойкости композитов до 41 раза по сравнению с чистым ПТФЭ. Для более детального выяснения влияния наполнителей исследованы микрофотографии поверхностей трения композитов, где отчетливо обнаружены выступающие волокна из изношенных поверхностей, которые, как предполагаем, защищают полимер от истирания. Другими словами, волокна, расположенные на фрикционной поверхности, образуют своего рода защитную структуру, предотвращающую деформации сдвига и предохраняющую от разрушения.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСЛОЕК МЕЖДУ МАТЕРИАЛАМИ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

А. Ю. Федоров\*, В. П. Матвеев

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
614018, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, Российская Федерация

Сильная концентрация напряжений на краях поверхности раздела двух разных материалов является серьезной проблемой при проектировании составных конструкций. Ранее было установлено, что минимальный уровень концентрации напряжений в окрестности особых точек имеет место при значениях геометрических параметров (углы между касательными в особой точке к внешней поверхности и к поверхности контакта) и упругих постоянных материалов, которые в совокупности определяют границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности напряжений. Это свойство применено в качестве основы для методики поиска значений упругих постоянных материала прослойки и ее геометрии в окрестности края поверхности контакта, обеспечивающих минимальный уровень концентрации напряжений. В данной работе на модельных задачах продемонстрированы возможности предлагаемой методики при выборе механических характеристик упругой прослойки и ее геометрических параметров, обеспечивающих при ее расположении между двумя одинаковыми или различными материалами отсутствие ярко выраженной концентрации напряжений на поверхностях контакта различных материалов.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и Пермского края (проект № 20-41-596007).*

# ЛОКАЛЬНОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ

А. А. Федоров, И. А. Разумовский, Ю. Г. Матвиенко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
101000, М. Харитоньевский пер., Москва, Российская Федерация

На основе численного моделирования выполнен анализ влияния локального индентирования зоны вершины сквозной трещины в тонкостенных элементах конструкций на скорость ее циклического роста. При этом рассматривается пространственное напряженно-деформированное состояние в зоне трещины.

Для расчетов используется специально разработанный макрос в ПК ANSYS, позволяющий на 1-ом этапе расчета определять поля остаточных напряжений (ОН), возникающих при индентировании окрестности вершины трещины исследуемого объекта; на 2-ом – выполнять расчеты процесса усталостного роста трещины с использованием уравнения Пэриса. Приводятся результаты расчетов, показывающие возможность существенного уменьшения скорости роста трещины как при двухстороннем индентировании 2-мя сферическими инденторами, так и при одностороннем индентировании тонкостенного элемента, опертого на массивную плиту. Также рассмотрено влияние двухосности нагружения на скорость роста трещины.

*Работа выполнена при поддержке гранта 18-19-00351.*

# ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Б. Н. Федулов<sup>а, \*</sup>, А. Н. Федоренко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Мех-мат ф-т, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991, Российская Федерация

<sup>б</sup> Сколковский институт науки и технологий,

Большой бульвар д. 30, стр. 1, Москва 121205, Российская Федерация

В последнее время в промышленности стали набирать популярность технологии с послойной выкладкой армированных слоев композитного материала. Такого рода автоматизированные выкладочные машины практически неограничены в выборе ориентации используемого материала, что означает большой выбор для конструкторских решений. Развитие таких систем производства ставит вопрос по выбору соответствующих способов проектирования.

В данной работе представлен алгоритм оптимизации конструкций из композитных материалов выполненных на основе аддитивных технологий. Основу алгоритма составляет метод градиентного спуска, где в качестве параметров оптимизации рассматривается как плотность материала, так и его ориентация. Особенность предложенного подхода связана с реализацией его в качестве встраиваемой системы в конечно элементную программу при максимальном сохранении ее возможностей. Имеется ввиду возможности учитывать различного рода нелинейности, такие как контактное взаимодействие физическая и геометрическая нелинейности. Рассмотрен ряд решенных задач в плоской и полной трехмерной постановке. Анализируются возможности будущего применения таких технологий и способов проектирования.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 20-11-20230).*

# МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ МЕТАЛЛООПТИКИ

С. А. Филин<sup>а, \*</sup>, В. Е. Рогалин<sup>б</sup>, И. А. Каплунов<sup>в</sup>

<sup>а</sup> Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, Москва, Стремянный пер., 36, Россия

<sup>б</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, Россия

<sup>в</sup> Тверской государственный университет, 170100, Тверь, ул. Желябова, 33, Россия

Обобщены результаты исследования возможности сохранения в стабильном состоянии очищенными галогензамещенными растворителями достигнутых ими физико-химических свойств и возможности стабилизации физико-химических свойств этих растворителей при многократном использовании. Новизна заключается в обосновании возможности выбора максимально эффективной для удаления загрязнения и стабильной при многократном использовании азеотропной смеси на основе ее подбора с максимально близкими к загрязнению параметром растворимости и полярной селективностью.

Реализованы: процесс физико-химической очистки оптических элементов из металлов в замкнутом технологическом цикле на автоматизированной установке; способ многократного восстановления оптических элементов, эксплуатирующихся при высокоэнергетическом воздействии в среде газового разряда, без использования механической реставрации, включая методы стабилизации моющей композиции и экспресс-контроля химической чистоты оптической поверхности элементов на всех стадиях физико-химического процесса очистки.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ CU-AL-SI-MN БРОНЗЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛАП

А. В. Филиппов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Структура материалов, напечатанных с применением аддитивных технологий, зачастую является несовершенной за счет ее неоднородности и формирования различных дефектов. Для устранения этих недостатков применяются методы термомеханического воздействия, которые могут привести как к некоторой модификации, так и к полной перестройке структурно-фазового состояния материала. Интенсивная пластическая деформация (ИПД) является способом, существенно модифицирующим структуру пластичных металлов и сплавов, в том числе бронз. Сплав системы Cu-Al-Si-Mn, напечатанный методом электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП), имеет достаточно крупнозернистую и неоднородную структуру. В связи с этим возникает необходимость подбора условий ее модификации. Целью работы является исследование влияния интенсивной пластической деформации на структуру Cu-Al-Si-Mn бронзы, изготовленной методом ЭЛАП.

На основе экспериментальных исследований было установлено, что многоосевая ковка позволяет лишь частично устранить крупнозернистую структуру. Дополнительная прокатка позволяет сформировать однородную ультрамелкозернистую структуру со средним размером зерна порядка 100 нм. Результаты экспериментальных исследований доказывают возможность эффективной модификации структуры Cu-Al-Si-Mn бронзы, изготовленной методом ЭЛАП, с применением методики ИПД.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00084, <https://rscf.ru/project/21-79-00084/>.*

# ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЯХ СИСТЕМЫ CRN/ZRN

А. В. Филиппов\*, А. В. Воронцов, Н. Н. Шамарин, О. С. Новицкая

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Качество многослойных покрытий зависит от различных параметров: толщины слоев, сцепления с подложкой, величины остаточных напряжений и т.д. Однако варьирование толщины слоев и материала подслоя существенно сказывается на величине остаточных напряжений в покрытии, которые во многом определяют эксплуатационные характеристики изделия: ресурс, критическую температуру работоспособности, коррозионную и износостойкость, и т.п. В свою очередь определение остаточных напряжений в многослойных покрытиях является сложной задачей. Их можно вычислить путем проведения разрушающих методов исследований, но в таком случае возможно только применение опытных образцов. Альтернативой этому является использование неразрушающих методов. Одним из современных и высокоэффективных подходов к определению внутренних напряжений является использование источников синхротронного излучения.

В ходе экспериментальных исследований проводились работы по определению напряжений первого рода в многослойных покрытиях системы CrN/ZrN. Для этого с использованием источника синхротронного излучения ВЭПП-3 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) исследовались образцы с многослойными покрытиями у которых была сформирована разная толщина отдельных слоев. В результате установлено, что увеличение толщины слоев способствует снижению остаточных напряжений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования (проект № 075-15-2021-1348) в рамках мероприятия № 1.1.16.*



# **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НА ОСНОВЕ ТИТАНА ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ**

**А. А. Филиппов\***, А. А. Гольшев, А. Г. Маликов, В. М. Фомин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, ул. Институтская 4/1, г. Новосибирск, Российская Федерация

Использование метода селективного лазерного плавления позволяет создавать металлокерамические покрытия, обладающие высокими механическими свойствами. В то же время, прогнозирование механических свойств таких покрытий позволяет уменьшить количество проводимых экспериментов и прогнозировать механические свойства при варьировании концентраций армирующих фаз. В настоящей работе представлен разработанный метод прогнозирования упругих параметров Ламе гетерогенного материала в зависимости от концентрации фаз. В качестве исследуемых материалов были металлокерамические покрытия ВТ-6-TiB, полученные методом селективного лазерного плавления. Механические характеристики определялись методом инструментального индентирования. Приведенный модуль упругости рассчитывался по кривой разгрузки по методу Оливера-Фарра. Получена экспериментальная зависимость упругих свойств и твердости в диапазоне концентраций борида титана от 0 до 15 % масс. Теоретическая модель дает качественное совпадение двух параметров Ламе в исследуемом диапазоне. Различие в прогнозируемых значениях с экспериментальными обусловлено протекающими химическими реакциями внутри наплавляемого покрытия.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-19-00733*

# **ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 09Г2С**

Ю. В. Худорожкова\*, С. М. Задворкин, С. В. Буров

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Оценка текущего состояния и определение остаточного ресурса материала является актуальной проблемой и носит как фундаментальный, так и прикладной характер. Процесс разрушения материала в общем случае является многоуровневым. В настоящее время для изучения процессов деформирования разрушения материала применяют различные физические методы исследования. Несмотря на широкое применение физических методов неразрушающего контроля, для изучения усталостной прочности конструкционных материалов, исследователи сталкиваются с трудностями при создании устройств и методик, позволяющих без остановки процесса нагружения обнаруживать области возникновения признаков необратимых процессов в материале и изучать их развитие в реальном времени.

Одной из основных целей исследования была отработка методики изучения магнитного состояния испытуемого материала в процессе статического или циклического нагружения. Образцы из конструкционной низкоуглеродистой стали 09Г2С подвергали статическому и усталостному нагружению. Однозначность полученных зависимостей, свидетельствует о возможности использования исследуемых магнитных параметров для контроля накопленной деформации при нагружении объекта.

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОЦЕДУРЫ UMAT КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО КОМПЛЕКСА SIMULIA ABAQUS**

Д. В. Чаплий\*, Л. В. Степанова, О. Н. Белова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева,  
443086, ул. Московское шоссе, 34, г. Самара, Российская Федерация

В настоящей работе представлен пример применения подпрограммы UMAT многофункционального программного комплекса SIMULIA Abaqus для моделирования процессов накопления повреждений в деформируемом твердом теле с дефектами. Данная подпрограмма служит для описания новых пользовательских материалов, отсутствующих в списке стандартных материалов пакета SIMULIA Abaqus. В программном комплексе SIMULIA Abaqus проведен ряд численных расчетов с целью отыскания поля напряжений и поврежденности у вершины трещины в условиях установившейся ползучести. Для моделирования ползучести и процессов накопления повреждений с помощью пользовательской подпрограммы UMAT выбран степенной закон Бейли–Норттона и кинетическое уравнение Качанова–Работнова и его обобщения. Определены распределения напряжений и поврежденности в окрестности вершины трещины в условиях нормального отрыва и смешанного нагружения. Определены зоны активного накопления повреждений у вершины трещины для различных значений параметров степенного кинетического уравнения и степенных определяющих уравнений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках гранта № 21-11-00346*

**ПОВРЕЖДЕНИЕ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТИ:  
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ  
НА ПОВЕДЕНИЕ ПРИ РАЗРУШЕНИИ**

А. С. Шалимов\*, М. А. Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский пр., 29, г. Пермь, Российская Федерация

Механическое поведение кости играет ключевую роль в определении ее прочности, надежности и долговечности, поскольку в любом материале, включая органические, при различных условиях могут возникать такие дефекты, как микротрещины. Открытоячеистая структура трабекулярных костей с твердофазной сетью связок (лигаментов), несущих нагрузку, представляют собой сложную задачу для анализа с точки зрения разрушения и возникновения трещин.

В данной работе представительные объемы трабекулярной кости рассматриваются как случайный пористый материал. Поведение костей при разрушении изучается на основе конечно-элементного моделирования с использованием моделей деградации механических свойств, вызванных различными критериями разрушения, а также с применением подходов механики линейно упругого разрушения в связке с расширенным методом конечных элементов (XFEM). Изучено влияние микроструктурной морфологии на напряженно-деформированное состояние и процессы разрушения в представительном объеме трабекулярной кости при различных комбинациях приложенных механических нагрузок.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДОМЕНОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ

М. Д. Шарков<sup>а, \*</sup>, М. Е. Бойко<sup>а</sup>, В. А. Боровиков<sup>б</sup>, А. М. Бойко<sup>а</sup>,

М. Н. Григорьев<sup>в</sup>, В. И. Николаев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021, ул. Политехническая, 26, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

195251, ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>в</sup> Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова,

190005, 1-я Красноармейская ул., 1, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведено исследование высокомодульных кристаллов в горных породах, подвергнутых процедуре взрывной отбойки, на модельных образцах, представленных пластинами синтетического кварца  $15 \times 15 \times 0,35$  мм с ориентацией (0001), выращенными методом Чохральского. В роли модели вмещающей породы использовался блок бетона марки М-100, внутрь которого были помещены три набора пластин, расположенных на расстояниях около 150, 300 и 500 мм от центра взрыва соответственно. Пластины были маркированы краской, выбранной в соответствии с расстоянием от конкретной заливаемой группы пластин до центра взрыва.

Отобранные после взрыва образцы-фрагменты кварцевых пластин были исследованы методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) на лабораторном приборе ДРОН-УМ-1 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) в просвечивающем режиме при  $\text{Cu } K_{\alpha 1}$ -излучении (длина волны 1,5406 Å).

Анализ данных МУРР показал, что размеры доменов в образцах составляют около 200 нм при исходном расстоянии от образца до центра взрыва 150 мм, 210 нм при исходном расстоянии 300 мм до центра взрыва, 220 нм для расстояния 500 мм от центра взрыва. Также оказалось, что каждый из образцов может содержать линейчатые компоненты или одномерные дефекты. Наконец, в образцах обнаружена периодичность с характерными латеральными линейными размерами от 80–90 нм до 600 нм, увеличивающимися с ростом исходного расстояния от образца до центра взрыва. Сформулировано предположение, что в образцах могут присутствовать двух- или трехмерные сверхрешетки.

# ЭВОЛЮЦИЯ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛЮМИНИИ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ

В. С. Шахиджанов<sup>а</sup>, О. А. Нехорошева<sup>а, б</sup>, В. А. Романова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

<sup>б</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что полированная поверхность сплавов и поликристаллических металлов становится шероховатой в процессе пластической деформации. Возникновение данного явления нежелательно, так как приводит к косметическим дефектам и ухудшает характеристики материала. С другой стороны, деформационный рельеф можно использовать для оценки накопленной пластической деформации. Поэтому, для выработки методов подавления рельефа и разработки методов диагностики деформированного состояния на основе анализа рельефа необходимо понимать механизмы данного явления.

В работе экспериментально и численно исследовано развитие деформационного рельефа в технически чистом алюминии АД-0 при одноосном растяжении. Выявлено, что с самого начала пластической деформации в структуре рельефа присутствует несколько характерных масштабов рельефных складок, которые эволюционируют в процессе растяжения. Для оценки рельефных образований был определен безразмерный параметр интенсивности деформационного рельефа, представляющий собой отношение длины профиля поверхности к базовой длине. Особое внимание уделено влиянию текстуры на характеристики шероховатости поверхности.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00600).*

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКЛИКА МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

А. И. Швейкин, П. В. Трусов, К. А. Романов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, пр. Комсомольский, 29, г. Пермь, Российская Федерация

Важным аспектом анализа сложных математических моделей является исследование устойчивости к возмущениям различных параметров (характеристик материала, воздействий и т.д.). Ранее авторами была предложена методика численной оценки устойчивости многоуровневых конститутивных моделей, основанная на интегральной оценке отклонения отклика при возмущенном наборе параметров (характеристик начального состояния структуры и остаточных напряжений, параметров оператора) и воздействий от отклика, полученного при невозмущенном наборе.

Разработанная методика применена к исследованию устойчивости многоуровневых конститутивных моделей для поликристаллических меди, алюминиевого сплава 1420 и титана. В ходе проведения численных экспериментов для различных видов нагружений выявлено, что модели являются устойчивыми к рассмотренным возмущениям. Предложено рациональное объяснение получения во всех случаях устойчивых решений на основе анализа математической структуры моделей. Осуществлено ранжирование способов возмущения параметров по степени чувствительности отклика к ним.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2021-0012).*

## УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ DUAL COMPOSITE (ZrB<sub>2</sub>-SiC)/(TaB<sub>2</sub>-SiC)

В. В. Шмаков<sup>а, б, \*</sup>, А. С. Буяков<sup>а, б</sup>, М. Р. Сухова<sup>а</sup>, С. П. Буякова<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский томский политехнический университет,  
634050, пр. Ленина, 30, г. Томск, Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Керамические композиты на основе боридов, карбидов металлов представляют интерес в качестве материалов функционального и специального назначения. Введение в керамическую матрицу включений зачастую направлено на увеличение ударной вязкости. В настоящее время известны несколько способов увеличения ударной вязкости керамики, обеспечиваемые созданием механизмами диссипации энергии трещин («мостикование» волокон, бифуркация трещин на относительно слабых внутренних границах гетеромодульных керамик и др.). Однако известные подходы к увеличению ударной вязкости керамик не решают полностью задачу имманентной хрупкости керамик и не обеспечивают в должной мере высокой надежности изделий из керамики. В работе получены и исследованы двойные композиты (DC (dual composite)) ZrB<sub>2</sub>-SiC-TaB<sub>2</sub>. Матрица представляла собой композит ZrB<sub>2</sub>-SiC с преобладанием диборида циркония, а в качестве включений выступали гранулы композита TaB<sub>2</sub>-SiC. Образцы DC получены спеканием под давлением 30 МПа при температуре 1750 °С. Для сравнения получены образцы с гомогенным распределением частиц карбидов и боридов. Показано, что организация двойной композиционной структуры способствует увеличению ударной вязкости керамики по сравнению с композитами ZrB<sub>2</sub>-SiC и TaB<sub>2</sub>-SiC. Так наибольшее значение  $K_{1c}=8,2 \pm 0,2$  МПа√м обнаружена для двойного композита с соотношением матрицы и включения 50 % объемн. (ZrB<sub>2</sub>-SiC) /50 % объемн. (TaB<sub>2</sub>-SiC). Для композитов ZrB<sub>2</sub>-SiC и TaB<sub>2</sub>-SiC величина  $K_{1c}$  не превышала 3,5 МПа√м.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.*



# **OPERANDO НАБЛЮДЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В СТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

К. И. Эмурлаев\*, И. А. Батаев

Новосибирский государственный технический университет,  
630073, пр-т К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Российская Федерация

Трение и изнашивание представляют особый интерес как с научной, так и с практической точек зрения. Это связано с огромными энергетическими затратами на преодоление сил трения, а также регулярным выходом из строя изделий в результате износа. Единственным способом избежать износа является устранение прямого контакта между трущейся парой. Обычно, с этой целью в узлы трения вводят смазывающий материал, но есть и другие решения, например, пневматические, магнитные или гидродинамические подшипники. Следует отметить, что такие подшипники имеют ограниченную область применения и весьма затратны. Что касается использования смазывающих веществ, то они не всегда полностью устраняют проблему изнашивания, поскольку в ходе эксплуатации могут возникнуть участки, работающие в условиях граничного или даже сухого трения. По этой причине понимание процессов структурных преобразований, происходящих непосредственно в ходе трения, является чрезвычайно важным, в особенности, если учесть, что сухое трение является неизбежным и даже желательным явлением в ряде изделий, например, в системах торможения.

На кафедре «Материаловедения в машиностроении» Новосибирского государственного технического университета развивается *operando* способ контроля эволюции структуры материалов, протекающих в условиях фрикционного воздействия с использованием дифракции синхротронного излучения. В рамках доклада будут представлены результаты *operando* наблюдений структурных изменений некоторых сталей.

**ПРЯМАЯ ДВУХУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ  
МОДЕЛЬ: О ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОМ ОБЪЕМЕ  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА**

А. Ю. Янц, П. В. Трусов, А. А. Токарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский пр-т 29а, г. Пермь, Российская Федерация

Данная работа нацелена на уточнение значения представительного объема путем постановки и решения прямой краевой задачи деформирования образца. Для определения отклика материала использовалась упруговязкопластическая модель, учитывающая эволюционирующую структуру на различных масштабных уровнях. Сперва проводилась генерация зеренной структуры образца, которая происходила путем разбиения образца на зерна с помощью пакета *pereg*, а затем полученная геометрия разбивалась на конечные элементы при помощи пакета *gmsh*. Ориентации зерен выбирались по случайному равномерному закону для каждой реализации процесса нагружения. Для определения характеристик представительного объема (числа зерен) были использованы образцы в форме параллелепипеда с различными соотношениями длин ребер. Для каждого типоразмера образца были сгенерированы образцы с различным числом зерен (от 500 до 16 000) и проведено два типа опытов. Первый опыт заключался в приложении постоянных скоростей перемещений к торцам вдоль длинной части образца (остальные поверхности свободные), что соответствовало натурному эксперименту на одноосное растяжение. Второй опыт заключался в приложении однородных деформаций к образцу путем определения кинематики на всех поверхностях (с одновременным удовлетворением несжимаемости).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (базовая часть государственного задания ПНИПУ FSNM-2020-0027).*

# ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ, СОДЕРЖАЩИХ РАВНОУДАЛЕННЫЕ УЛЬТРАМИКРОЭЛЕКТРОДЫ, ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ОЛИГОПЕПТИДОВ

А. Ю. Арбенин<sup>а</sup>, А. А. Петров<sup>а</sup>, Д. В. Назаров<sup>а</sup>, Е. Б. Серебряков<sup>а</sup>, С. О. Кириченко<sup>а</sup>,  
П. С. Власов<sup>а</sup>, Е. Г. Земцова<sup>а</sup>, В. М. Смирнов<sup>а</sup>, Е. Е. Данилова<sup>а</sup>, С. С. Ермаков<sup>а</sup>,  
А. Воробьев<sup>б</sup>, М. С. Мухин<sup>в</sup>, А. М. Можаров<sup>б</sup>.

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9, Россия

<sup>б</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Рос-  
сийской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3, лит. А, Россия

<sup>в</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
194100, г. Санкт-Петербург, Кантемировская улица, д. 3, кор. 1 лит. А

Сферическая диффузия, возникающая при поляризации электродов с характерным размером 1–10 мкм (ультрамикродов) в электролитах, способствует более высокой скорости массопереноса, чем в случае плоских сплошных электродов, что приводит к тому, что скорости обеднения приэлектродного слоя за счет электрохимической реакции и подведения продукта из глубины раствора выравниваются. Это является причиной того, что для ультрамикродов существует предельный размер сферического слоя, в котором локализован градиент концентрации (диффузионный слой). Таким образом, достигается стационарный режим массопереноса, что выражается в сигмоидальной форме вольтамперных кривых.

В ансамблях ультрамикродов при разнесении диффузионных полусфер реализуется стационарный режим диффузии, однако при уменьшении межэлектродного расстояния, приводящем к пересечению сфер диффузии, возникает смешанный режим, который не обладает в полной мере независимостью от времени. Результирующее изменение формы вольтамперографических кривых может служить аналитическим сигналом при изучении веществ.

В данной работе показана возможность фотолитографического нанесения ансамблей ультрамикродов на планарные подложки и их применение для вольтамперометрического анализа электроактивных дериватов пептидов с различной молекулярной массой.

# МЕТОД РАСЧЁТА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИЗДЕЛИЮ-ЛИДЕРУ

Е. А. Афанасьева

Самарский государственный технический университет,  
443100, ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, Российская Федерация

Известные методы, применяемые для построения прогнозов индивидуального остаточного ресурса элементов конструкций, обладают существенным недостатком – необходима полная статистическая информация. Для уникальных и дорогостоящих изделий промышленности получить требуемую информацию в необходимом объеме практически невозможно, поэтому для решения данной проблемы разработан новый численный метод прогнозирования по изделию-лидеру.

Рассматриваются два однотипных конструктивных элемента при одинаковых внешних воздействиях, при этом одно из изделий начинает функционировать на некоторое время  $\tau$  раньше. Учитывая данный факт, становится возможным прогнозирование деформационного поведения второго изделия, учитывая поведение первого (лидера). Вводится предположение, что при идентичном внешнем воздействии кривые обобщённого перемещения для пары изделий будут близки к подобным. Получено соотношение, связывающее обобщенное перемещение изделия-лидера и исследуемого изделия, найдены МНК-оценки неизвестного коэффициента подобия и дисперсии ошибок, получено соотношение для построения прогноза. Иллюстрация метода выполнена на примере ползучести резьбового соединения и стержневых элементов, износа буксы шасси самолёта.

## КРИТЕРИИ ПЕРЕХОДА К СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

С. А. Баранникова, М. В. Надежкин\*, П. В. Исхакова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

В настоящее время известно, что в большинстве металлических материалов при больших степенях деформации происходит переход от однородной деформации к локализации деформации на различных масштабных уровнях. При этом в материале возникают области интенсивного пластического течения, которые на микроуровне представляют собой полосы локализации пластической деформации. В ряде работ предложен ряд механизмов формирования полос локализации деформации на микромасштабном уровне, однако во многих случаях эти механизмы неспособны удовлетворительно описать наблюдаемые закономерности на макро-масштабном уровне. Поэтому актуальным представляется анализ закономерностей пластической деформации и переходу к разрушению, реализующимися на различных масштабных уровнях при пониженных температурах сплавов. В настоящей работе исследованы закономерности деформационных и акустических характеристик, и перехода к разрушению в широком температурном интервале на основе анализа стадийности диаграмм растяжения и скорости распространения ультразвука в процессе эволюции полос локализации пластической деформации на примере Fe-Cr-Ni сплавов. Полученные в ходе исследования результаты способствуют развитию теоретических представлений о природе низкотемпературных особенностей пластической деформации и разрушения Fe-Cr-Ni сплавов, обусловленных их структурными неоднородностями.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-29-01608.*

# ИЗУЧЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

В. Э. Вильдеман\*, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

614990, Комсомольский проспект, 29, Пермь, Российская Федерация

Работа направлена на опытное и численное изучение процессов локализации пластических деформаций в виде шейки в рабочей части образца в условиях закритического поведения при растяжении. Получены экспериментальные данные в виде диаграмм деформирования с развитыми участками разупрочнения и данные о распределении продольных деформаций в рабочей части образца. Испытания проведены на сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 с использованием оптической системы регистрации и анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D Correlated Solutions. Проведено изучение способов интерпретации опытных данных при растяжении в условиях возникновения неоднородности пластического деформирования в виде шейки на основе регистрации изменения геометрической формы образца и распределения деформаций. Получены результаты численного моделирования закритического поведения и разрушения элементов конструкций на основе моделей разупрочнения и проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных (диаграмм нагружения, полей деформаций).

*Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00765.*

# **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАСТИ СКЛЕЙКИ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ КМ**

Д. Д. Власов, Т. П. Плугатарь, Н. А. Татусь

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН,  
101000, М. Харитоньевский пер. 4, г. Москва, Российская Федерация

Несмотря на то, что в случае применения композитов материал и конструкция создаются одновременно, мест соединений избежать не удастся. Один из самых распространенных способов соединения композитных деталей – с помощью клеев. Клеи нередко применяются и при создании гибридных соединений совместно с прошивкой, клепкой, болтами и т.д.

Строго говоря, сами полимерные композиты представляют собой наполнитель, склеенный эпоксидной смолой (клеем), поэтому применение клеев для соединения готовых деталей выглядит вполне естественно. Однако здесь возникают определенные трудности. Поверхности склейки должны быть очень тщательно обработаны и подготовлены; в процессе склейки должны соблюдаться все тонкости процесса – температура, время и усилие склеивания. Более того, на концах соединения появляется концентрация напряжений, которая значительно снижает прочность, и, как следствие, эффективность клеевого соединения.

Для увеличения прочности клеевых соединений применяют клеи различных типов: мягкие и жесткие. Чем более жесткий клей (чем выше его модуль упругости) тем более прочное соединение, что и было экспериментально показано.

Не самый эффективный, но очень распространенный и простой тип клеевого соединения – внахлест, именно такие соединения и были рассмотрены в работе. Проведены эксперименты, показывают большее влияние на прочность геометрии зоны склеивания при неизменной площади контакта деталей.

**МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ В ОБЛАСТИ  
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ПРОЯВЛЕНИЕ  
СВЕРХУПРУГОСТИ В МЕТАСТАБИЛЬНОМ  
ТИТАНОВОМ СПЛАВА ВТ23**

С. В. Гладковский, В. Е. Веселова, Д. И. Вичужанин

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Изучены особенности механического поведения двухфазного ( $\alpha+\beta$ ) титанового сплава ВТ23 при одноосном растяжении в области упругопластических деформаций. Показано, что после режима закалки, обеспечивающего дестабилизацию  $\beta$ -фазы по отношению к механическому нагружению, образование  $\alpha''$ -мартенсита напряжения при достижении триггерного напряжения способствует появлению «двойного предела текучести»: более низкого «фазового», связанного с образованием  $\alpha''$ -мартенсита при упругих напряжениях, и повышенного «дислокационного», характеризующего начало пластического течения сплава в трехфазном ( $\alpha+\beta+\alpha''$ ) состоянии. Испытания образцов сплава ВТ23 после закалки от 860 °С по схеме повторного растяжения (1-10-100 циклов) до уровня напряжений в 1,6 раз выше «фазового» предела текучести выявили образование замкнутой петли механического гистерезиса, вызванного проявлением эффекта сверхупругости за счет развития обратимого  $\beta\leftrightarrow\alpha''$  мартенситного превращения.



# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 04X17H8T**

Л. С. Горулева\*, С. М. Задворкин, А. Н. Мушников

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Поверхностная пластическая деформация (ППД) – один из методов улучшения эксплуатационных свойств изделий. Для контроля качества такой обработки весьма перспективен вихретоковый метод (в том числе для определения толщины упрочненного слоя). ППД изделий из аустенитных сталей с деформационно нестабильной структурой сопровождается образованием ферромагнитного мартенсита деформации, причем содержание его уменьшается с глубиной. Для контроля качества толщины упрочненного слоя аустенитных сталей после ППД помимо выбора частоты возбуждения, необходимо знать начальную магнитную проницаемость и удельное электрическое сопротивление, которые, в свою очередь, связаны с изменением фазового состава при деформировании. Для повышения достоверности вихретокового контроля необходимо получить калибровочные зависимости между начальной магнитной проницаемостью, удельным электрическим сопротивлением и содержанием мартенсита деформации в стали. В настоящей работе такие калибровочные зависимости получены для метастабильной аустенитной стали 04X17H8T. При этом варьирование фазового состава обеспечивалось одноосным растяжением на различные степени пластической деформации.

## КОМПОЗИТНЫЙ ОТВАЛ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖД ПУТЕЙ ОТ СНЕГА

И. А. Егоров<sup>а</sup>, В. В. Жавыркин<sup>а, б</sup>, Д. Д. Власов<sup>в</sup>, Н. А. Татусь<sup>в</sup>

<sup>а</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Центр инновационного развития СТМ»,  
620014, ул. Маршала Жукова, стр. 6, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта», 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, г. Москва, Российская Федерация

<sup>в</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
101000, М. Харитоньевский пер. 4, г. Москва, Российская Федерация

Объект исследования работы - отвал перспективной конструкции плужного снегоочистителя. Рабочий орган такой машины представляет собой отвальный плуг, состоящий из системы переставляемых крыльев и щитов отвала. При движении снегоочистителя плуг подрезает слой снега и отбрасывает его в сторону от пути. Такая машина может работать в двух режимах отбрасывания снега – однопутная (двухотвальная) и двухпутная (одноотвальная). Перед началом очистки снега центральные щиты и боковые крылья с помощью пневмоцилиндров раскладываются в рабочее положение и фиксируются с определённым углом. При двухотвальной установке угол между продольной осью машины и щитами составляет  $60^\circ$ , при одноотвальной –  $50^\circ$ .

В работе с помощью аналитических и конечно-элементных методов определено напряженно-деформированное состояние центрального щита отвала снегоочистителя, выявлены слабые места конструкции. После проведенного расчета предложены пути модернизации и рационализации конструкции отвала, в том числе предложена замена материала отвала на волокнистый композит. После чего проведен расчет модернизированной конструкции.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51023.*

# **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ**

**О. С. Лехов<sup>а</sup>, А. В. Михалев<sup>б</sup>**

<sup>а</sup>Российский государственный профессионально-педагогический университет,  
620012, ул. Машиностроителей, 11, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup>ОАО «Уральский трубный завод»,  
623107, ул. Сакко и Ванцетти, 28, Свердловская область, г. Первоуральск, Российская Федерация

Изложена новая технология получения сортовых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Показана фотография опытно-промышленной установки непрерывного литья и деформации ОАО «Уральский трубный завод». Описана конструкция медного водоохлаждаемого кристаллизатора установки. Приведены исходные данные и дана постановка задачи определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при формировании трех стальных сортовых заготовок (квадрат 70 мм) калиброванными бойками. Результаты расчета напряжений получены решением задачи упруго-пластичности методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS. Установлен характер напряженного состояния металла в очаге деформации при получении трех сортовых заготовок на установке непрерывного литья и деформации с позиции улучшения их качества. Для промышленной реализации предложена новая схема технологического процесса, включающая в свой состав установку непрерывного литья и деформации, проходную печь и мелко-сортный прокатный стан.

# **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ**

**О. С. Лехов<sup>а</sup>, А. В. Михалев<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет,  
620012, ул. Машиностроителей, 11, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> ОАО «Уральский трубный завод»,  
623107, ул. Сакко и Ванцетти, 28, Свердловская область, г. Первоуральск, Российская Федерация

Обоснована актуальность получения непрерывнолитых стальных трубных полых заготовок с позиции улучшения качества труб из углеродистых и легированных сталей. Дана оценка качества внутренней поверхности труб, прокатанных из стальных сплошных трубных заготовок.

Предложена новая технология получения стальных трубных полых заготовок на ресурсосберегающей установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Приведены результаты теоретического исследования напряженно – деформированного состояния (НДС) оправки и участков трубной заготовки при обжати ее бойками установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Описана общая модель системы кристаллизатор – бойки и приведены исходные данные для расчета. Для моделирования напряженно - деформированного состояния металла в очагах деформации и оправке описаны четыре контактные пары. Изложена методика расчета с использованием метода конечных элементов. Установлены величины и закономерности изменения перемещений металла и осевых напряжений в очагах деформации при получении стальных полых заготовок на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, бойки которой выполнены по постоянному радиусу. Дана оценка напряженного состояния металла в очагах деформации с позиции улучшения качества стальных полых заготовок при получении на установке непрерывного литья и деформации.

# **ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В. В. Малашенко<sup>а, \*</sup>, Т. И. Малашенко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, 83114, ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк

<sup>б</sup> Донецкий национальный технический университет, 83001, ул. Артема, 58, г. Донецк

В данной работе получила дальнейшее развитие ранее разработанная авторами теория динамического взаимодействия дефектов (ДВД), что позволило успешно применить её для решения новых задач динамики дислокаций в условиях высокоэнергетических внешних воздействий. В частности, учет влияния динамических эффектов в рамках данной теории позволил объяснить экспериментально наблюдающуюся немонотонную зависимость динамического предела текучести сплава от концентрации дислокаций и наличие минимума на этой зависимости. Наличие минимума является результатом конкуренции воздействия различных типов структурных дефектов как на движущиеся дислокации, так и на спектр их колебаний, а положение минимума соответствует значению дислокационной плотности, при которой происходит смена доминирующих воздействий. На основе выполненного анализа представлено ещё несколько случаев возникновения немонотонной зависимости динамического предела текучести от плотности дислокаций и сформулированы условия наблюдения такой зависимости.

# К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ СОЕДИНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Д. Р. Салихьянов<sup>а, б, \*</sup>, Н. С. Мичуров<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> ИНМТ УрФУ, 620002, ул. Мира, 28, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Основным сдерживающим фактором развития производства и применения слоистых композиционных материалов (СКМ) является проблема прогнозирования условий, при которых может быть достигнута гарантированная прочность соединения материалов. На настоящий момент освоение технологии производства новых композиционных материалов все еще неразрывно связано с большим объемом экспериментальной работы с целью поиска оптимальной подготовки поверхности и состояния заготовок, оптимального режима совместной деформации и прочих технологических факторов.

С целью решения существующих проблем, авторами инициировано создание новых подходов и стратегии компьютерного и математического моделирования процесса соединения разнородных материалов пластической деформацией на микро- и макроуровне, верификация предложенных подходов через физическое моделирование, оценка роли влияния явлений микро-механики на прочность соединения СКМ, а также возможности их учета при компьютерном и математическом моделировании.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20243 при поддержке правительства Свердловской области.*

# **СТАДИЙНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Н. Н. Соболева<sup>а, \*</sup>, Н. А. Давыдова<sup>а</sup>, А. В. Макаров<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН,

620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт физики металлов УрО РАН,

620108, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Использование поверхностного пластического деформирования в качестве финишной обработки является перспективным способом повышения прочности и износостойкости поверхности деталей. Показано, что использование в качестве финишной обработки хромоникелевых наплавленных лазером покрытий такого способа поверхностного пластического деформирования как фрикционная обработка скользящими инденторами позволяет обеспечить одновременно повышение прочностных и трибологических свойств, формирование благоприятных сжимающих напряжений, а также низкую шероховатость поверхности.

Были изучены механизмы, лежащие в основе процессов, происходящих при фрикционной обработке. Для установления процессов, происходящих при фрикционной обработке, и их стадийности проведены фрикционные обработки хромоникелевых покрытий при однократном, двукратном, трехкратном сканировании поверхности индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора DBN на воздухе при нагрузках до 500 Н. Изучены структурно-фазовое состояние покрытий, профили поверхностей после фрикционной обработки, а также профили протяженных участков, пересекающих и исходную, и фрикционно обработанную поверхности, что позволяет на микроуровне определить также изменения толщины образцов с покрытиями после фрикционной обработки и косвенно судить о степени протекания деформации в поверхностном слое.

## МАГНИТНЫХ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ

Р. А. Соколов\*, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов

Тюменский индустриальный университет,  
6250009, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, Российская Федерация

В работе обсуждается возможность использования магнитных характеристик конструкционных сталей для определения механических свойств. На примере твердости, предела прочности термообработанных образцах конструкционных сталей Ст 3, 09Г2С, 15ХСНД рассматриваются структурные изменения, вызванные термической обработкой: Закалка в воде от температуры 950 °С и отпуск в течение 1 часа с охлаждением на воздухе при температурах: 200, 350, 500, 650 °С. Рассмотрены изменения механических и магнитных свойств исследуемых сталей. Структура термообработанных образцов была изучена при помощи растрового электронного микроскопа при тысячекратном увеличении. Для выявления микроструктуры образцы травили 3 % раствором азотной кислоты. Установлено, что для рассматриваемых механических свойств конструкционных сталей и комплексным магнитным параметром наблюдается единая удовлетворительная корреляционная зависимость, которая может быть использована для определения величины механических свойств. Замечено, что выпадение некоторых значений из общей регрессионной кривой могут быть связаны с процессами уменьшения искажений в кристаллические решетки стали при определенной термической обработке. Выраженность этих процессов для рассматриваемых сталей может быть различной из-за наличия в их составе различного количества легирующих элементов.



# РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ В Al-Mg СПЛАВЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Т. В. Третьякова\*, М. П. Третьяков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Комсомольский проспект, 29, Пермь, Российская Федерация

Проведено опытное исследование влияние циклических воздействий на реализацию прерывистой текучести и пространственно-временной неоднородности пластического деформирования Al-Mg сплава. Испытания выполнены с использованием двухосевой сервогидравлической испытательной системы Instron 8850 и бесконтактной трехмерной видеосистемы регистрации и анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D Correlated Solutions, основанной на методе корреляции цифровых изображений. В результате проведения серии испытаний на одноосное растяжение сплошных цилиндрических образцов Al-Mg сплава при реализации циклических воздействий получены опытные данные о влиянии циклирования на кинетику полосообразования в условиях проявления прерывистой текучести. Отмечено снижение амплитуды срывов нагрузки на диаграммах нагружения и изменение типа прерывистой текучести с типа А на смешанный тип А+В. Распространение одиночных полос ПЛШ в испытаниях с циклическим воздействием становится не монотонным. Рассмотренные режимы и параметры циклических воздействий не оказали существенного влияния на степень реализации за критической стадии деформирования исследуемого материала.

*Экспериментальные исследования в рамках описания механического поведения конструкционно-неоднородных материалов проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).*

# **ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА СВОЙСТВА БИОПОКРЫТИЙ НА ТИТАНЕ**

**В. В. Чебодаева**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, просп. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация

Несмотря на существующие материалы для реконструкции/замещения костных дефектов существует острая потребность в разработке новых биоматериалов с высокой биосовместимостью и антимикробными свойствами. Модификация материалов является перспективным и эффективным подходом в разработке новых биоматериалов для тканевой инженерии. Технологии постобработки поверхности могут значительно улучшить взаимодействие костной ткани с материалом в биологической среде.

Микродуговое оксидирование (МАО) является технологическим методом для нанесений кальцийфосфатных покрытий на металлические имплантаты, позволяющим изменять топографию поверхности, химический состав и электрические свойства для повышения биоактивности материала. В данной работе покрытия формировались на титановом сплаве. Благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости титан и его сплавы считаются одними из наиболее перспективных материалов для применения в качестве костных имплантатов.

Многие исследования показывают, что наночастицы металлов или оксидов металлов могут быть эффективной альтернативой современным противомикробным препаратам, не вызывая изменений в микроорганизмах, приводящих к резистентности. Модификация КФ покрытий с помощью наночастиц оксида цинка придаст материалу антимикробный эффект и позволит изменить зарядовое состояние поверхности.

Таким образом целью данной работы является формирование покрытий, модифицированных наночастицами оксида цинка, и исследование их свойств.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЭТФ

В. А. Шарапова<sup>а</sup>, В. П. Швейкин<sup>б</sup>, И. С. Каманцев<sup>б</sup>, Н. А. Друкаренко<sup>б</sup>,  
В. Ю. Иванов<sup>а</sup>, О. В. Рябухин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

При изготовлении одноразовых изделий медицинского назначения все более широкое применение находят полимерные материалы. Из-за невысокой термической стойкости антибактериальная обработка готовых изделий выполняется радиационными методами, которые, в свою очередь, могут приводить к деструкции полимерного материала. С целью поиска поточного метода контроля изменений свойств материала после радиационной стерилизации в рамках настоящей работы исследовано влияние обработки ускоренными электронами энергией 8,5 МэВ и величиной дозы от 5 до 25 кГр на изменение оптических свойств объектов. Объектами исследования служили пробирки для забора крови объемом 9 и 5 мл, изготовленные из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Оценка изменения оптических свойств выполнялась в проходящем и отраженном свете. По результатам исследований в проходящем свете установлено, что относительное изменение интенсивности светового потока относительно необлученных образцов составляет от 3 до 6 %. Результаты серии испытаний в отраженном свете продемонстрировали увеличение интенсивности отраженного потока на 7–10 %. Полученные данные были сопоставлены с результатами ИК-спектроскопии, согласно которым было установлено уменьшение количества С-Н связей. Уменьшение С-Н связей, по всей видимости, связано с процессом дегидрирования материала пробирок, что в свою очередь изменяет оптические свойства исследуемого объекта – приводит к увеличению коэффициента преломления и пропорциональному увеличению коэффициента отражения.

# **МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ДЕСЯТИСЛОЙНОМ СТЕКЛОПЛАСТИКЕ ПРИ ВНЕШНЕМ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

А. С. Смирнов\*, Е. О. Смирнова, Ю. В. Худорожкова

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В современном авиакосмическом машиностроении в последние два десятилетия все большую тенденцию приобретает направление, связанное с созданием и модернизацией авиакосмической техники с использованием композиционных материалов. В частности, к таким материалам относятся полимерные композиционные материалы, которые в сравнении со сплавами обладают более высокой удельной прочностью и коррозионнотойкостью. Другой общемировой тенденцией является уменьшение продолжительности сроков процесса разработки готовых изделий и их изготовления по индивидуальным требованиям заказчика. Удешевить и ускорить процесс проектирования новых изделий и материалов позволяют методы компьютерного моделирования.

В работе на основе микромеханических испытаний построена двухуровневая вычислительная механическая модель слоисто-волокнутого десятислойного стеклопластикового композита со схемами укладки слоев  $[0/90]$ . Модель позволила спрогнозировать упругие свойства композита, а также рассчитать напряжения на микро- и макроуровне перед моментом разрушения образца в условиях растяжения. Спрогнозированные с помощью модели упругие свойства композита были сравнены со свойствами, полученными на основе натуральных экспериментов. Спрогнозированный для стеклопластика модуль упругости и коэффициент Пуассона составили 31 ГПа и 0,11, соответственно. Аналогичные упругие свойства, полученные из натуральных экспериментов равны 28 ГПа и 0,10, соответственно.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-13008.*

# **ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУР УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

В. Г. Дегтярь, С. Т. Калашников<sup>а</sup>, Б. И. Капранов<sup>в</sup>, Г. Ф. Костин<sup>а, б</sup>, Ю. А. Мокин<sup>а</sup>,  
В. А. Тюменцев<sup>б</sup>, В. И. Хлыбов<sup>а</sup>, Р. К. Швалева<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 456317, тер. Ильменский заповедник, г. Миасс, Российская Федерация

<sup>б</sup> ФГБОУ ВО «ЧелГУ», 454001, ул. Братьев Кашириных, 129, г. Челябинск, Российская Федерация

<sup>в</sup> ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 634050, пр. Ленина, 30, г. Томск, Российская Федерация

В работе представлен комплекс методов учета структурных неоднородностей деталей тепловой защиты из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) при расчетах обгарных форм высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) и соответствующих методов измерений и обработки необходимых структурных параметров УУКМ. При уносе массы на траектории движения элементы армирования и графитированная матрица уносятся неодинаково, на поверхности возникает первичная крупномасштабная шероховатость. Также, при уносе на поверхность выходят поры, раковины, другие мелкоструктурные неоднородности, формирующие вторичную мелкодисперсную шероховатость. Шероховатость влияет на теплообмен, при расчетах обгарных форм ЛА используются суммарные параметры шероховатости. На скорость уноса влияет степень графитации УУКМ, определяемая на основе рентгеноструктурных исследований.

Плотность и пористость материалов связаны линейно, для учета вторичной шероховатости проведены исследования распределений плотности методом компьютерной томографии, электронно-микроскопические исследования распределений пор, раковин, других дефектов по объему деталей тепловой защиты для ряда УУКМ. Проведены рентгеноструктурные исследования этих УУКМ. С использованием полученных результатов проведены сравнительные расчеты обгарных форм и аэродинамических характеристик цилиндрического ЛА при применении деталей тепловой защиты из этих УУКМ. При этом сделана оценка влияния перекосов структуры каркасов УУКМ на асимметрию обгарных форм.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ В АЛЮМОМАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ АМг6/10% SiC ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЕФОРМАЦИЙ

В. С. Канакин\*, А. С. Смирнов, А. В. Коновалов

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

При создании современной техники и прогнозе ее развития на будущее наблюдается тенденция повышения удельных механических свойств материалов, увеличения внешних механических и термических нагрузок на конструкцию. В результате современные отрасли, связанные с авиа- и ракетостроением, все большее внимание уделяют созданию новых материалов с высокими удельными механическими свойствами. К такого рода материалам относятся металломатричные композиты (ММК). Одним из способов управления свойствами таких материалов является организация зеренной структуры, которую можно формировать с использованием методов термомеханического воздействия. Для решения такой задачи требуется установить закономерности и построить математическую модель, описывающую влияние температуры, скорости и степени деформации на эволюцию зерен. Целью данной работы было построить нейронную сеть, описывающую эволюцию зерен в металломатричном композите АМг6/10% SiC в условиях высоких температур деформаций.

В данной работе на основе данных метода дифракции отраженных электронов построена нейронная сеть, описывающая эволюцию среднего диаметра зерна ММК АМг6/10% SiC для диапазона температур 300–500 °С, скоростей деформаций 0,1–5 1/с и степеней деформаций 0,05–1. Результаты верификации по экспериментальным данным показали, что среднее относительное отклонение прогнозных значений от экспериментальных не превышает 5 %, что является хорошей инженерной точностью.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-29-00428.*

# ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

С. В. Смирнов<sup>а, \*</sup>, Д. А. Коновалов<sup>а</sup>, И. А. Веретенникова<sup>а</sup>,

А. В. Пестов<sup>б</sup>, В. А. Осипова<sup>б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт органического синтеза УрО РАН,

620108, ул. С. Ковалевской, д. 22/20, Екатеринбург, Российская Федерация

Для исследования влияния напряженного состояния на адгезионную прочность клеевого соединения алюминий-магний-скандиевого сплава 1570 посредством эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной полиэтиленполиамином, были использованы модифицированные образцы Аркана со склеенными вставками. Испытания проводили в климатической камере испытательной машины при температурах  $-50$ ,  $+23$  и  $+70$  °С при разных значениях углов между нормалью к плоскости склеивания и направлением растяжения. При формулировке модели разрушения было использовано предположение, что движущей силой расслоения границы адгезионного соединения двух тел при силовом воздействии является величина плотности энергии деформации, произведенной в выделенном микрообъеме, включающем границу соединения. Нормальная и сдвиговая компоненты плотности энергии деформации  $W_n^*$  и  $W_s^*$  в момент разрушения клеевого соединения определялись с учетом рассчитанных эффективных свойств выделенного микрообъема. Анализ полученных результатов позволил сформулировать линейный критерий разрушения и построить диаграммы предельной плотности энергии деформации адгезионного разрушения, который учитывает соотношение характеристик упругих свойств клея и субстрата. Область, ограниченная диаграммой предельной плотности энергии деформации, определяет условия безопасного нагружения клеевого соединения по энергетическому критерию адгезионного разрушения. Диаграмма предельной плотности энергии деформации может быть использована при оценке эксплуатационной прочности и надежности клеевых соединений.

# **О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

О. А. Нефедова, Л. Ф. Спевак\*, А. Л. Казаков

ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Работа посвящена численному решению задачи о движении тепловой волны для вырождающегося нелинейного уравнения второго порядка параболического типа с источником. Нелинейность уравнения обусловлена степенной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры. Рассматривается задача для случая двух пространственных переменных при краевом условии, задающем закон движения фронта тепловой волны. Предложен алгоритм решения на основе разложения по радиальным базисным функциям и метода граничных элементов. Вычислительный алгоритм оптимизирован за счет распараллеливания вычислений. Алгоритм реализован в виде программы, написанной на языке программирования C++. Организация параллельных вычислений построена с использованием открытого стандарта OpenCL. Для оценки эффективности предложенной вычислительной технологии были решены тестовые примеры. Результаты расчетов сравнивались как с известными точными решениями, так и с данными, полученными авторами ранее в других работах. Проведена оценка точности решений и времени проведения расчетов. Проведен анализ эффективности использования различных систем радиальных базисных функций для решения задач рассматриваемого типа.



# **МАГНИТНЫЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ И КАЧЕСТВА СОВРЕМЕННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК: РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИДЕЙ АКАДЕМИКА Э. С. ГОРКУНОВА**

А. В. Макаров<sup>а, б, \*</sup>, Р. А. Саврай<sup>б</sup>, Ю. М. Колобылин<sup>б</sup>, Л. Х. Коган<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики металлов УрО РАН, 620049, ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В обзорном докладе представлена ретроспектива становления инициированного Э.С. Горкуновым нового направления, связанного с использованием высокочувствительных магнитных и электромагнитных методов для оценки и прогнозирования износостойкости сталей различных классов (углеродистых, цементированных, шарикоподшипниковых, высокохромистых углерод- и азотсодержащих) с мартенситными, мартенситно-аустенитными, мартенситно-ферритными и перлитными структурами. Создана методика вихретокового контроля качества лазерной закалки беговых дорожек опорного узла буровых долот. На примере легированного водородом титанового сплава и наплавленных лазером Cr-Ni и Cr-Ni-Co покрытий продемонстрирована возможность вихретокового контроля износостойкости и твердости неферромагнитных и слабомагнитных материалов. Важное развитие в ИМАШ УрО РАН получили работы по контролю деградации сталей и покрытий при циклических объемных и контактных нагружениях. Основанные на идеях академика Э.С. Горкунова подходы перспективно применять при создании неразрушающих физических методов контроля качества современных упрочняющих и модифицирующих обработок поверхности металлических изделий: наноструктурирующей фрикционной обработки, наноструктурирующего выглаживания, ультразвуковой ударно-фрикционной обработки, обработки трением с перемешиванием, лазерной наплавки (в том числе покрытий из высокоэнтропийных сплавов), комбинированных лазерно-термических обработок, постобработок изделий аддитивного производства и др.

# ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

С. В. Смирнов<sup>а</sup>, И. А. Веретенникова<sup>а, \*</sup>, Д. А. Коновалов<sup>а</sup>, Н. С. Мичуров<sup>а</sup>,  
А. В. Пестов<sup>б</sup>, В. А. Осипова<sup>б</sup>

<sup>а</sup> ИМАШ УрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт органического синтеза имени И.Я. Постовского УрО РАН,  
620108, ул. Софьи Ковалевской, д. 22/20, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Целью данной работы являлось исследование влияния термоциклирования на механические свойства покрытий из эпоксидной смолы ЭД-20, изготовленные с использованием различных отвердителей. В качестве метода определения механических свойств выбрано индентирование с использованием трехгранной пирамиды Берковича. Циклическое воздействие температур проводилось в соответствии с ГОСТ - 27037. В качестве характеризующих параметров выбраны твердость индентирования, приведенный модуль упругости и ползучесть при заданном времени выдержки.

В результате работы были сделаны следующие выводы:

- с увеличением количества циклов термоциклирования происходит плавное образование и расширение областей отслаивания покрытий от подложки, что показывает нарушение адгезионной связи между подложкой и покрытием при циклическом воздействии температур;
- в результате термоциклирования покрытия упрочняются, происходит увеличение твердости материала и уменьшение приведенного модуля упругости;
- наблюдается влияние отвердителя на ползучесть покрытий.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ НЕКОТОРЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ДАННЫМ РИТМОКАРДИОГРАФИИ

С. С. Белов<sup>а</sup>, В. В. Гагиев<sup>а</sup>, В. А. Миронов<sup>а, б</sup>, Т. Ф. Миронова<sup>б</sup>,  
В. В. Привалова<sup>в, \*</sup>, П. К. Цаплина<sup>б</sup>

<sup>а</sup> 5 военный клинический госпиталь войск национальной гвардии РФ,  
620036, ул. Соболева 10, г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>б</sup> Уральский государственный медицинский университет Минздрава России,  
620028, ул. Репина 3, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>в</sup> ИМАШУрО РАН, 620049, ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, Российская Федерация

В настоящем исследовании приведены результаты выявления характерных показателей variability сердечного ритма при узловом зобе и раке щитовидной железы по данным ритмокардиографии (РКГ).

Было проведено оперативное лечение узлового зоба и рака щитовидной железы в 5 военном клиническом госпитале войск национальной гвардии РФ.

Все диагнозы – узловой зоб и рак – были верифицированы на послеоперационном гистологическом исследовании.

В ходе исследований ритмокардиографии были проведены следующие диагностические тесты: фоновая проба, проба Вальсальвы, проба Ашнера, активная ортостатическая проба и нагрузочная проба. Все эти тесты были проведены на группах с диагнозами узловой зоб, рак, гипотериоз и контрольной группе пациентов без выявленной патологии щитовидной железы.

В результате проведенных тестов были проанализированы показатели РКГ и из них выявлены наиболее существенные для постановки диагноза. Рассчитан диапазон значений, характерных для каждого показателя РКГ в каждом тесте.

Для полученных показателей исследована чувствительность и специфичность каждого диагностического теста.

# ПРЕДИКТОРНЫЕ КЛИНИКО-ЛАБОРАТОРНЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАРКЕРЫ ПОРАЖЕНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ COVID-19

Г. Р. Садыева<sup>а, б</sup>, П. К. Цаплина<sup>а</sup>, В. А. Миронов<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup> ФГБОУ ВО «УГМУ» Минздрава России, 620028, ул. Репина, 3, г. Екатеринбург, Россия

<sup>б</sup> ФГКУЗ «5 ВКГВНГРФ», 620036, ул. Соболева, 10, г. Екатеринбург, Россия

Инфекция COVID-19 привела к большому количеству заболевших и летальных исходов. Поэтому важно стратифицировать риск осложнений и смертности у пациентов с COVID-19. **Цель исследования:** выявить прогностические параметры сердечно-сосудистых осложнений у больных COVID-19. **Материалы и методы.** Ретроспективное исследование «случай–контроль», включающий анализ историй болезней 318 пациентов с COVID-19. **Результаты.** По данным ЭКГ при сравнении признаков перегрузки левого и правого предсердия были получены достоверные различия между исследуемыми группами. При сравнении групп по уровню сывороточного железа также получены достоверные различия. **Обсуждение.** Полученные данные подтверждают значимость выявленных инструментальных признаков нагрузки на левое предсердие у больных с COVID-19, что может быть проявлением не изолированной правопредсердной недостаточности, а также левопредсердной недостаточности. **Выводы.** Общепринятые клинические, инструментальные и лабораторные данные у больных с COVID-19 позволяют выделить наличие и степень нарушения гемодинамической перегрузки полостей сердца.

# РЕАКЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ВЫДЕРЖКУ В УПРУГО-НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

В. П. Гуляев<sup>а,\*</sup>, П. П. Петров<sup>б</sup>, К. В. Степанова<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, ул. Белинского, 58, г. Якутск,

Российская Федерация

<sup>б</sup> Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, 67700, ул. Октябрьская, 1, г. Якутск,

Российская Федерация

В работе методом рентгеновской дифрактометрии изучено сопротивление кристаллической решетки стали 08пс, алюминия марки АД1 и меди марки М1 длительному действию (9 лет) упругих напряжений при разных уровнях статических нагрузок. Установлено, что годовой перепад температуры внешней среды от  $-50^{\circ}\text{C}$  зимой до  $+35^{\circ}\text{C}$  температур в период с 2013 года по 2022 год не вызывает существенных изменений характеристик профилей дифракционных линий исследованных материалов. Характеристики профилей дифракционных линий, полученные в зимний период наблюдений, свидетельствуют о некотором снижении инструментальных погрешностей, обусловленных конструктивными условиями эксперимента.

Обнаружено систематическое изменение сопротивления кристаллической решетки исследованных материалов действию упругих напряжений при значениях  $\sigma > 0.5 \sigma_{\text{T}}$ . Выявленная ступенчатость процесса протекания элементарных актов реакции в локальной области отражения рентгеновского излучения, экспериментально обосновывает значение минимального коэффициента запаса прочности материалов, принимаемого в расчетах конструкций на прочность.

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Alekseev D. I., 7  
Basalin A. V., 6  
Elkin A., 3  
Fedorenko A., 4, 10  
Fedulov B., 4  
Gaibel V., 3  
Grekov M. A., 5  
Konev S. D., 6  
Konstantinov A. Yu., 6  
Krivosheev S. I., 7  
Kurbanova E. D., 8  
Lomakin E., 4  
Magazinov S. G., 7  
Manzuk M. V., 7  
Matvienko Yu. G., 9  
Ostropiko E. S., 7  
Polukhin V. A., 8  
Reznikov D. O., 9  
Sergeeva T. S., 5  
Sergeichev I., 3, 4, 10  
Sergeichev I. V., 6  
Sudenkov Y., 10  
Turkova V., 11  
Абдульменова Е. В., 12  
Агабабян Ю. А., 13  
Аккузин С. А., 84  
Алексенко В. О., 121  
Алмаева К. В., 84  
Аммосова А. П., 154  
Аникеев С. Г., 70, 92  
Анчаров А. И., 91  
Арбенин А. Ю., 98, 171  
Артемов М. А., 14  
Артюхова Н. В., 70, 92  
Афанасьева Е. А., 172  
Ахатов И. Ш., 46  
Ахметханов Р. С., 15, 16  
Ахметшин Л. Р., 17  
Бабкина Ю. Н., 14  
Байметова Е. С., 18  
Балахнин А. Н., 19, 29  
Балина О. В., 20, 110  
Балохонов Р. Р., 21, 47, 56, 61  
Банников М. В., 29  
Банникова И. А., 19  
Баранникова С. А., 104, 173  
Барановский Е. С., 14  
Барсанова С. В., 69  
Батаев А. А., 22  
Батаев И. А., 22, 169  
Батуев С. П., 23, 135, 136  
Белов В. А., 114  
Белов С. С., 195  
Белова О. Н., 24, 163  
Бельчиков И. А., 149  
Беляев А. К., 129  
Беляев А. Ю., 64  
Берестова С. А., 25  
Богданов А. А., 120  
Бойко А. М., 165  
Бойко М. Е., 165  
Боровиков В. А., 165  
Бочкарев А. О., 26  
Бочкарева С. А., 121  
Брацун Д. А., 27, 28  
Брусенцева Т. А., 30  
Бурмашева Н. В., 31, 32, 33, 34  
Буров А. Е., 35  
Буров С. В., 36, 162  
Буслович Д. Г., 120, 121  
Буяков А. С., 168  
Буякова С. П., 12, 168  
Бызов А. В., 80  
Быкова Т. М., 132  
Бяков А. В., 120, 121  
Вавилов Д. С., 99  
Вакулюк В. С., 119  
Варнак О. В., 40  
Варьян И. А., 37  
Василенко О. Н., 38, 80  
Васильев И. Е., 96  
Веретенникова И. А., 191, 194  
Верхошанский Я. Ю., 39  
Веселов И. Н., 40  
Веселова В. Е., 176  
Вильдеман В. Э., 41, 65, 86, 89, 143, 151, 174  
Виндокуров И. В., 42, 147  
Витошкин И. Е., 91  
Вичужанин Д. И., 43, 176  
Владимиров А. П., 44, 75, 112  
Власов Д. Д., 175, 178  
Власов И. В., 109  
Власов П. С., 171  
Волошин К. В., 45  
Воробьев А., 171  
Воробьев Р. И., 46  
Воронцов А. В., 160  
Вшивков А. Н., 19  
Гагиев В. В., 195  
Гатиятуллина Д. Д., 47  
Герасимов Р. М., 48  
Гладковский С. В., 54, 176  
Глухов И. А., 19  
Гольшев А. А., 49, 161  
Гоморова Ю. Ф., 109  
Горулева Л. С., 133, 177  
Горшенков М. В., 137  
Горшков А. В., 50, 51  
Горячева И. Г., 13  
Грибов Д. С., 52, 77  
Григорьев М. Н., 165  
Гуляев В. П., 197

Гусейнов К. А., 53  
 Давыдова Н. А., 183  
 Данилова Е. Е., 171  
 Двойников Д. А., 54  
 Дегтярь В. Г., 189  
 Дерюгин Е. Е., 109  
 Добрыднева А. Д., 87  
 Долгих Д. А., 55  
 Друкаренко Н. А., 187  
 Дьяконов А. А., 73  
 Дьячкова А. В., 34  
 Евсеев М. В., 69  
 Евтушенко Е. П., 56  
 Егоров И. А., 178  
 Егошин К. Д., 111  
 Еленская Н. В., 57  
 Емельянов И. Г., 58  
 Емельянова Е. С., 59, 126  
 Еремин А. В., 120  
 Ермаков С. С., 171  
 Ерошенко А. Ю., 19  
 Жаббаров Р. М., 60  
 Жавыркин В. В., 178  
 Жуков А. В., 81  
 Жуков И. А., 39, 149  
 Задворкин С. М., 133, 162, 177  
 Залазинский А. Г., 54  
 Землянов А. В., 61  
 Земцова Е. Г., 62, 98, 171  
 Зимина В. А., 63, 153  
 Зиновьева О. С., 113  
 Иванов В. Ю., 187  
 Иванов Я. Н., 64, 148  
 Игнатова А. М., 29  
 Ильиных А. В., 89, 122  
 Индейцева Д. А., 99  
 Исхакова П. В., 173  
 Казаков А. Л., 192  
 Казаков К. Е., 66, 67  
 Казанцева Е. А., 68, 71  
 Калашников С. Т., 189  
 Каманцев И. С., 187  
 Канакин В. С., 190  
 Каплунов И. А., 158  
 Капранов Б. И., 189  
 Карагерги Р. П., 69  
 Карпов Е. В., 91  
 Кафтарианова М. И., 70, 92  
 Кириченко С. О., 171  
 Коган Л. Х., 193  
 Козлов А. В., 69  
 Колесникова Н. Н., 37  
 Колобылин Ю. М., 193  
 Комарова Е. Г., 68, 71  
 Кондратьев Н. С., 72  
 Коновалов А. В., 69, 190  
 Коновалов Д. А., 191, 194  
 Копырин М. М., 73  
 Королева М. Р., 74  
 Костин В. Н., 38, 75, 76, 80  
 Костин Г. Ф., 189  
 Котельникова Н. В., 77  
 Кочанов А. Н., 78  
 Кочанов С. А., 78  
 Кошелева Н. А., 94, 95  
 Красняков И. В., 28  
 Крючева К. Д., 134  
 Крючков Д. И., 79  
 Ксенофонтов Д. Г., 80  
 Кудрявцев А. А., 99  
 Кудрявцев О. А., 53, 116  
 Кудымов В. К., 62  
 Кузьмин А. Н., 81  
 Кулак С. М., 102  
 Купер К. Э., 29  
 Курмоярцева К. А., 77  
 Кутькин О. М., 111  
 Кычкин А. К., 73  
 Лазарева Н. Н., 73  
 Ларина Е. А., 33  
 Лебедев С. Ю., 82  
 Лехов О. С., 179, 180  
 Лешков Е. В., 83  
 Линник В. В., 84  
 Литовченко И. Ю., 84  
 Лобанов Д. С., 85, 86, 101  
 Лобов Е. С., 87  
 Ломакин Е. В., 88  
 Лукин С. Э., 30  
 Лунегова Е. М., 85, 86, 145  
 Лыкова А. В., 89, 122  
 Любутин П. С., 120  
 Макаревич Е. С., 72, 90  
 Макаренко И. В., 97  
 Макаренко Л. В., 97  
 Макаров А. В., 183, 193  
 Малашенко В. В., 181  
 Малашенко Т. И., 181  
 Маликов А. Г., 91, 161  
 Мальцева А. Н., 40  
 Мамазакиров О., 92  
 Мамазакиров О. Р., 70  
 Марков А. Е., 73  
 Маслов С. В., 93  
 Матвеев В. П., 94, 95, 155  
 Матвиенко Ю. Г., 96, 156  
 Махутов Н. А., 97  
 Мельникова В. А., 101, 150  
 Миронов В. А., 195, 196  
 Миронова Т. Ф., 195  
 Михалев А. В., 179, 180  
 Мичуров Н. С., 182, 194  
 Мищенко И. В., 96  
 Можаров А. М., 171  
 Мокин Ю. А., 189  
 Морозов И. А., 64

Морозов Н. Ф., 62, 98, 99  
 Москалев И. В., 46  
 Москвичев Е. В., 35  
 Мугатаров А. И., 41, 65, 100  
 Муллахметов М. Н., 101  
 Муратиков К. Л., 99  
 Муратов К. Р., 102, 184  
 Мухин М. С., 171  
 Мушанкова К. А., 103  
 Мушников А. Н., 127, 177  
 Мызнов К. Е., 38  
 Надежкин М. В., 104, 173  
 Назаров В. В., 105, 106, 107  
 Назаров Д. В., 171  
 Наймарк О. Б., 19, 29, 108, 142  
 Наркевич Н. А., 109  
 Нассонов В. В., 20, 110  
 Насырова А. К., 111  
 Наумов К. В., 112  
 Нестеренко А. В., 79  
 Нефедова О. А., 192  
 Нехорошева О. А., 113, 166  
 Никитюк А. С., 29  
 Николаев В. И., 165  
 Николин Ю. В., 132  
 Никулин С. А., 114  
 Новиков В. Ф., 102, 184  
 Новицкая О. С., 160  
 Оборин В. А., 142  
 Огорелков Д. А., 58  
 Одинцев И. Н., 115  
 Оливенко Н. А., 116  
 Ольхов А. А., 152  
 Орехов Е., 62  
 Осипова В. А., 191, 194  
 Остапчук А. А., 117  
 Охлопкова А. А., 73, 154  
 Ошмарин Д. А., 118  
 Павлов В. Ф., 119  
 Панин С. В., 121  
 Панин С. В., 120  
 Паньков А. М., 122  
 Паршин Д. А., 123, 124  
 Перов В. Н., 76  
 Пестов А. В., 191, 194  
 Петров А. А., 171  
 Петров П. П., 197  
 Пирогова Ю. В., 125  
 Писарев М., 126  
 Писарев М. А., 59  
 Плотников А. П., 81  
 Плугатарь Т. П., 115, 175  
 Поволоцкая А. М., 127  
 Подсердцев А. Н., 72, 90  
 Полехина Н. А., 84  
 Поляков А. П., 128  
 Поляков П. А., 128  
 Полянский В. А., 129  
 Попов А. А., 37, 152  
 Попов Д. А., 130  
 Попов Ф. С., 48, 52  
 Попова Д. Д., 130  
 Портных И. А., 69  
 Привалова В. В., 195  
 Проботюк В. В., 102  
 Просвиряков Е. Ю., 31, 32, 33, 34, 50, 51, 131  
 Прохоров А. Е., 19  
 Пугачева Н. Б., 132  
 Путилова Е. А., 133, 134  
 Радченко А. В., 23, 135, 136  
 Радченко П. А., 23, 135, 136  
 Разумовский И. А., 156  
 Рогалин В. Е., 158  
 Рогачев С. О., 114, 137  
 Рогова Е. А., 75  
 Роговой А. А., 138, 139  
 Романов К. А., 140, 167  
 Романова В. А., 21, 59, 113, 126, 166  
 Романовская Е. М., 25  
 Рябухин О. В., 187  
 Саврай Р. А., 193  
 Садыева Г. Р., 196  
 Сазанов В. П., 119  
 Салихова Н. К., 138  
 Салихьянов Д. Р., 182  
 Самойленко Н. А., 130  
 Сапожников С. Б., 53, 83  
 Сачков В. И., 149  
 Севодина Н. В., 118  
 Семенов А. А., 141  
 Семенов Б. Н., 98, 99  
 Семенова О. Ю., 119  
 Сербин Е. Д., 75, 76  
 Сергеичев И. В., 46  
 Серебряков Е. Б., 171  
 Серков К. В., 25  
 Сероваев Г. С., 94, 95  
 Симонов М. Ю., 142  
 Скворцов Д. В., 38  
 Скобелина Е. К., 40  
 Смирнов А. С., 188, 190  
 Смирнов В. М., 62, 98, 171  
 Смирнов С. В., 43, 191, 194  
 Смирнова Е. О., 188  
 Смолин И. Ю., 63, 153  
 Соболева Н. Н., 183  
 Соколов М. А., 142  
 Соколов Р. А., 184  
 Соломатин Д. И., 14  
 Спевак Л. Ф., 192  
 Староверов О. А., 65, 143, 145  
 Степанова К. В., 197  
 Степанова Л. В., 24, 60, 103, 163  
 Столбова О. С., 139  
 Стружанов В. В., 144  
 Струнгарь Е. М., 86, 145



Сундеев Р. В., 137  
Суханов И. И., 146  
Сухова М. Р., 168  
Сызранцев В. Н., 82  
Тарасова А. С., 147  
Татусь Н. А., 175, 178  
Ташкинов М. А., 42, 55, 57, 87, 125, 147, 164  
Тимкина Т. Д., 148  
Титков В. В., 45  
Титов В. Г., 54  
Ткачев Д. А., 39, 149  
Токарев А. А., 170  
Третьяков М. П., 150, 174, 185  
Третьякова Т. В., 122, 150, 151, 174, 185  
Трусов П. В., 90, 140, 167, 170  
Туисов А. Г., 73  
Тюбаева П. М., 152  
Тюменцев В. А., 189  
Тян Дэфан, 121  
Уваров С. В., 142  
Уваров С. В., 19  
Утукина А. М., 153  
Ушканов А. А., 154  
Федоренко А. Н., 157  
Федоров А. А., 156  
Федоров А. Ю., 94, 155  
Федулов Б. Н., 88, 157  
Филин С. А., 158  
Филиппов А. А., 161  
Филиппов А. В., 159, 160  
Фомин В. М., 161  
Хаткевич В. М., 137  
Хлыбов В. И., 189  
Ходоренко В. Н., 70, 92  
Худорожкова Ю. В., 36, 162, 188  
Цаплина П. К., 195, 196  
Чайкин А. Е., 144  
Чаплий Д. В., 163  
Чебодаева В. В., 186  
Чернов Д. В., 96  
Чернова А. А., 74  
Чечулина Е. А., 52, 150  
Чудинов В. В., 142  
Чудинов В. С., 64, 148  
Шадрин В. К., 119  
Шалимов А. С., 164  
Шамарин Н. Н., 160  
Шарапова В. А., 187  
Шардаков И. Н., 64, 94, 148  
Шаркеев Ю. П., 19  
Шарков М. Д., 165  
Шахиджанов В. С., 113, 166  
Швалева Р. К., 189  
Швейкин А. И., 140, 167  
Швейкин В. П., 54, 79, 187  
Шмаков В. В., 168  
Шплис Н. В., 114  
Эмурлаев К. И., 169  
Юрлова Н. А., 118  
Яковлев Ю. А., 129  
Янкин А. С., 89, 100, 101  
Янц А. Ю., 170

## СОДЕРЖАНИЕ

STIFFNESS DEGRADATION FATIGUE MODEL FOR POLYMER COMPOSITE MATERIALS A. Elkin, V. Gaibel, I. Sergeichev	3
APPLICATION OF THE NONLINEAR ELASTOPLASTIC MODEL WITH STRESS STATE DEPENDENCY FOR THE ANALYSIS OF THERMOPLASTIC COMPOSITE STRUCTURES. A. Fedorenko, B. Fedulov, E. Lomakin, I. Sergeichev	4
SURFACE-DISLOCATION INTERACTION AT THE NANOSCALE M. A. Grekov, T. S. Sergeeva	5
EXPERIMENTAL STUDY OF STRAIN-RATE DEPENDENCE OF UNIDIRECTIONAL FILAMENT WOUND CARBON/EPOXY COMPOSITE UNDER COMPRESSION S. D. Konev, A. Yu. Konstantinov, A. V. Basalin, I. V. Sergeichev	6
FEATURES AND LIMITATIONS OF MAGNETIC PULSE METHOD FOR STUDYING OF HIGH STRAIN RATE DEFORMATION OF METALS S. I. Krivosheev, D. I. Alekseev, M. V. Manzuk, S. G. Magazinov, E. S. Ostropiko	7
STRENGTH AND THERMAL STABILITY CHARACTERISTICS OF GRAPHENE-REINFORCED LAYERED COMPOSITES BASED ON PURE RU AND ALLOY RU-PD E. D. Kurbanova, V. A. Polukhin	8
DEVELOPMENT OF PROBABILISTIC APPROACHES TO ASSESSING THE CYCLIC STRENGTH AND DURABILITY OF PIPES AND PRESSURE VESSELS CON- TAINING SEMI-ELLIPTICAL SURFACE CRACKS Yu. G. Matvienko, D. O. Reznikov	9
TENSILE STRENGTH OF UNIDIRECTIONAL CARBON/EPOXY COMPOSITE UNDER SHOCK WAVE LOADING I. Sergeichev, A. Fedorenko, Y. Sudenkov	10
HIGHER ORDER COEFFICIENTS OF THE WILLIAMS SERIES EXPANSION OF THE NEAR MIXED MODE CRACK TIP FIELDS BY ODM BASED ON EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD: STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES V. Turkova	11
МЕХАНОХИМИЧЕСКОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНОМ ПОРОШКА Ti-Ni Е. В. Абдульменова, С. П. Бужкова	12
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО ВОЛОКНАМИ РАЗНОГО ДИАМЕТРА Ю. А. Агабабян, И. Г. Горячева	13
К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ М. А. Артемов, Ю. Н. Бабкина, Е. С. Барановский, Д. И. Соломатин	14
МЕТОД ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ Р. С. Ахметханов	15
ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИ- ОННОГО МАТЕРИАЛА ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СМЕШЕНИЯ Р. С. Ахметханов	16
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ДЕФЕКТА В ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКЕ МЕТА- МАТЕРИАЛА Л. Р. Ахметшин	17
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕН- НОЙ СЕКЦИИ ПУТЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ OPENFOAM Е. С. Байметова	18

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ, ИНИЦИИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ, НА РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ЦИРКОНИЕВЫХ МИШЕНЕЙ А. Н. Балахнин, С. В. Уваров, И. А. Банникова, А. Н. Вшивков, А. Е. Прохоров, И. А. Глухов, А. Ю. Ерошенко, Ю. П. Шаркеев, О. Б. Наймарк	19
КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ О. В. Балина, В. В. Нассонов	20
ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ И ПОКРЫТИЙ Р. Р. Балохонов, В. А. Романова	21
ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ А. А. Батаев, И. А. Батаев	22
ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛА И БЕТОНА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ С. П. Батуев, П. А. Радченко, А. В. Радченко	23
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННОГО НАГРУЖЕНИЯ ПЛАСТИНЫ С ОДНИМ БОКОВЫМ НАДРЕЗОМ И ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ О. Н. Белова, Л. В. Степанова	24
ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА ШТАМПУЕМОСТЬ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА С. А. Берестова, Е. М. Романовская, К. В. Серков	25
ИЗГИБ НАНОБАЛКИ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ А. О. Бочкарев	26
КОНЦЕНТРАЦИОННО-ЗАВИСИМАЯ ДИФфуЗИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРАХ: НЕУСТОЙЧИВОСТИ И СТРУКТУРЫ Д. А. Брацун	27
МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХЕМОМЕХАНИКИ КЛЕТОЧНОЙ ТКАНИ: РЕШЕННЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ Д. А. Брацун, И. В. Красняков	28
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОРИСТОСТИ УГЛЕРОДНЫХ ИМПЛАНТАТОВ ПО ДАННЫМ МИКРОРЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ А. М. Игнатова, А. Н. Балахнин, М. В. Банников, К. Э. Купер, А. С. Никитюк, О. Б. Наймарк	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ Т. А. Брусенцева, С. Э. Лукин	30
ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ НА СУЩЕСТВОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ ДЛЯ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ ПРОТЯЖЕННОМ СЛОЕ Н. В. Бурмашева, Е. Ю. Просвиряков	31
АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ, ОПИСЫВАЕМОГО ПОЛНОЙ КУБИКОЙ ДВУХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ, В ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ О СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ СЛОЕ Н. В. Бурмашева, Е. Ю. Просвиряков	32
ПРОБЛЕМА ВЫБОРА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ГРАНИЦЕ КОНТАКТА СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В СЛОЕ С ГИДРОФОБНОЙ И СВОБОДНОЙ ГРАНИЦАМИ Н. В. Бурмашева, Е. А. Ларина, Е. Ю. Просвиряков	33
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ КОМПОНЕНТ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧЕ О КОНВЕКТИВНЫХ СДВИГОВЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТОНКОМ СЛОЕ Н. В. Бурмашева, А. В. Дьячкова, Е. Ю. Просвиряков	34

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОМПОЗИТНОГО АНИЗОГРИДНОГО ЭЛЕМЕНТА А. Е. Буров, Е. В. Москвичев	35
ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ВТОРИЧНОГО ЦЕМЕНТИТА В ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С. В. Буров, Ю. В. Худорожкова	36
ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И. А. Варьян, Н. Н. Колесникова, А. А. Попов	37
МАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМУ СОСТОЯНИЮ ТРУБОПРОВОДА О. Н. Василенко, В. Н. Костин, К. Е. Мызнов, Д. В. Скворцов	38
ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ $TiB_2$ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ $AlMgB_{14}$ Я. Ю. Верхошанский, Д. А. Ткачев, И. А. Жуков	39
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМОМОЛИБДЕНОВОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ СУЛЬФИДНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ И. Н. Веселов, А. Н. Мальцева, Е. К. Скобелина, О. В. Варнак	40
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО РОСТА ТРЕЩИН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ С ПОЗИЦИЙ МЕХАНИКИ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В. Э. Вильдеман, А. И. Мугатаров	41
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМООБРАБОТАННОГО ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ И. В. Виндокуров, М. А. Ташкинов	42
МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ Д. И. Вичужанин, С. В. Смирнов	43
СПЕКЛ-ДИАГНОСТИКА НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ ЖИВОЙ И НЕЖИВОЙ МАТЕРИИ А. П. Владимиров	44
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОДНОВИТКОВОГО СОЛЕНОИДА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ К. В. Волошин, В. В. Титков	45
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН Р. И. Воробьев, И. В. Москалев, И. Ш. Ахатов, И. В. Сергеичев	46
ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАЗРУШЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕЗОУРОВНЕ Д. Д. Гатиятуллина, Р. Р. Балохонов	47
ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ Р. М. Герасимов, Ф. С. Попов	48
ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ УДАРНЫМ НАГРУЗКАМ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, АРМИРОВАННОГО ВОЛОКНАМИ И ПОРОШКОМ КАРБИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ АДДИТИВНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ А. А. Голышев	49
ЗАСТОЙНЫЕ ТОЧКИ НЕОДНОРОДНОГО РЕШЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩЕГО КОНВЕКТИВНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ ОКЕАНА А. В. Горшков, Е. Ю. Просвиряков	50
ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЭКМАНА В ПРИПОЛЮСНОЙ ОБЛАСТИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА БЕТА-ПЛОСКОСТИ А. В. Горшков, Е. Ю. Просвиряков	51

ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА-ЛЕ ШАТЕЛЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ: АЛГОРИТМ И ПРИМЕНЕНИЕ Д. С. Грибов, Ф. С. Попов, Е. А. Чечулина	52
СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЩЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО СЖАТИЯ НА МЕЖСЛОЕВЫЕ СДВИГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТКАНЕВЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ К. А. Гусейнов, О. А. Кудрявцев, С. Б. Сапожников	53
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СИСТЕМНО-ЛЕГИРОВАННЫХ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИХ СТАЛЕЙ Д. А. Двойников, С. В. Гладковский, А. Г. Залазинский, В. Г. Титов, В. П. Швейкин	54
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, АРМИРОВАННЫХ НЕПРЕРЫВНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ Д. А. Долгих, М. А. Ташкинов	55
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С РАЗЛИЧНОЙ ОБЪЕМНОЙ ДОЛЕЙ ЧАСТИЦ Е. П. Евтушенко, Р. Р. Балохонов	56
АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов	57
УСТАЛОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ЛЕЖАЩЕЙ НА ЖЕСТКОМ ЛОЖЕМЕНТЕ И. Г. Емельянов, Д. А. Огорелков	58
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В АЛЬФА-ТИТАНЕ Е. С. Емельянова, М. А. Писарев, В. А. Романова	59
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ, ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВБЛИЗИ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ТРЕЩИН Р. М. Жаббаров, Л. В. Степанова	60
ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХСЛОЙНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛА С ПОКРЫТИЕМ А. В. Землянов, Р. Р. Балохонов	61
СОЗДАНИЕ БИОАКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ НА ТИТАНЕ С ДВУХУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЕЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА НАНО- И МИКРОУРОВНЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО ДЛЯ КОСТНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ Е. Г. Земцова, Е. Орехов, В. К. Кудымов, В. М. Смирнов, Н. Ф. Морозов	62
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА В. А. Зимина, И. Ю. Смолин	63
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИУРЕТАНА ПРИ РАЗНЫХ УГЛАХ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Я. Н. Иванов, В. С. Чудинов, И. Н. Шардаков, А. Ю. Беляев, И. А. Морозов	64
ОПИСАНИЕ КРИВЫХ УСТАЛОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ПЕРЕХОДА К КРИТИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЯМ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ А. И. Мугатаров, В. Э. Вильдеман, О. А. Староверов	65
О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТАРЕЮЩИХ ТРУБ С ПОКРЫТИЯМИ И ВТУЛОК, ИМЕЮЩИХ СЛОЖНЫЕ ПРОФИЛИ К. Е. Казаков	66
О ТОЧНЫХ РЕШЕНИЯХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРОВ К. Е. Казаков	67

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПО ВРЕМЕНИ УЛЬТРАЗВУКА Е. А. Казанцева, Е. Г. Комарова	68
ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЯ Р. П. Карагерги, А. В. Коновалов, А. В. Козлов, М. В. Евсеев, С. В. Барсанова, И. А. Портных	69
СВС-МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА С РАЗВИТОЙ МЕЗОПРИСТРОЙ СТРУКТУРОЙ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА М. И. Кафтаранова, С. Г. Аникеев, Н. В. Артюхова, В. Н. Ходоренко, О. Р. Мамазакиров	70
ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В КАЛЬЦИЙ-ФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ Е. Г. Комарова, Е. А. Казанцева	71
ОПИСАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ Н. С. Кондратьев, А. Н. Подседерцев, Е. С. Макаревич	72
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БУТАДИЕНОВОГО ЭЛАСТОМЕРА АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛЬТО-, СТЕКЛО- И УГЛЕ- ТКАНЬЮ М. М. Копырин, А. Е. Марков, А. А. Дьяконов, А. Г. Туисов, А. А. Охлопкова, А. К. Кычкин, Н. Н. Лазарева	73
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ И ОКОЛОКАВИТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ М. Р. Королева, А. А. Чернова	74
БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В. Н. Костин, Е. Д. Сербин, А. П. Владимиров, Е. А. Рогова	75
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГА НА КОМПЛЕКС МАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИКЕЛЯ В. Н. Костин, Е. Д. Сербин, В. Н. Перов	76
ОПИСАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН В РАМКАХ МНОГОУРОВНЕВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ Н. В. Котельникова, К. А. Курмоярцева, Д. С. Грибов	77
ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОЦЕССУ РАЗРУШЕНИЯ А. Н. Кочанов, С. А. Кочанов	78
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕМПЕРАТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА B95/10%SiC Д. И. Крючков, А. В. Нестеренко, В. П. Швейкин	79
О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ И ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ Д. Г. Ксенофонтов, А. В. Бызов, В. Н. Костин, О. Н. Василенко	80
ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА, ОСНОВАННАЯ НА ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДАХ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ А. Н. Кузьмин, А. В. Жуков, А. П. Плотников	81
К РАСЧЕТУ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С. Ю. Лебедев, В. Н. Сызранцев	82
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Е. В. Лешков, С. Б. Сапожников	83

ВЛИЯНИЕ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ, ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ И. Ю. Литовченко, Н. А. Полехина, С. А. Аккузин, К. В. Алмаева, В. В. Линник	84
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОГО СТАРЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Д. С. Лобанов, Е. М. Лунегова	85
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕГРУЗКАХ В ПРОЦЕССЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ Д. С. Лобанов, Е. М. Струнгарь, Е. М. Лунегова, В. Э. Вильдеман	86
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 3Д-ПЕЧАТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПЛАСТИКА ABS С АРМИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ Е. С. Лобов, А. Д. Добрыднева, М. А. Ташкинов	87
ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ Е. В. Ломакин, Б. Н. Федулов	88
ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И КРУЧЕНИИ А. В. Лыкова, А. В. Ильиных, А. С. Янкин, В. Э. Вильдеман	89
ОПИСАНИЕ МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕХОДА В ПРЯМОЙ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КОНСТИТУТИВНОЙ МОДЕЛИ Е. С. Макаревич, А. Н. Подседерцев, П. В. Трусов	90
ВЫСОКОПРОЧНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ОДНОРОДНЫХ И РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕРМОУПРОЧНЯЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ А. Г. Маликов, И. Е. Витошкин, А. И. Анчаров, Е. В. Карпов	91
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА И ПРОНИЦАЕМОСТИ СВС-МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА О. Мамазакиров, С. Г. Аникеев, Н. В. Артюхова, М. И. Кафтаранова, В. Н. Ходоренко	92
РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ НАТУРНОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ КОНСТРУКЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ КОНТУР ЦИРКУЛЯЦИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С. В. Маслов	93
ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ ВОДН НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ, ВСТРОЕННЫМИ В ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В. П. Матвеевко, Н. А. Кошелева, Г. С. Сероваев, А. Ю. Федоров, И. Н. Шардаков	94
МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В. П. Матвеевко, Н. А. Кошелева, Г. С. Сероваев	95
ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОСТРОЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ Ю. Г. Матвиенко, И. Е. Васильев, Д. В. Чернов, И. В. Мищенко	96
КОНЦЕПЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ МИКРОРАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ МАЛОЦИКЛОВЫХ ТРЕЩИН Н. А. Махутов, И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко	97
ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ В КОНСТРУИРОВАНИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МНОГОУРОВНЕВОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ Н. Ф. Морозов, Е. Г. Земцова, А. Ю. Арбенин, Б. Н. Семенов, В. М. Смирнов	98
О РОЛИ ИНЕРЦИОННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ Н. Ф. Морозов, Д. А. Индейцева, К. Л. Муратиков, Б. Н. Семенов, Д. С. Вавилов, А. А. Кудрявцев	99

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ САЙНСА МНОГООСНОЙ УСТАЛОСТИ В ИНВАРИАНТНОЙ ФОРМЕ А. И. Мугатаров, А. С. Янкин	100
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ КРИТИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЙ М. Н. Муллахметов, А. С. Янкин, Д. С. Лобанов, В. А. Мельникова	101
МАГНИТОУПРУГИЕ МАЛОЦИКЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЙ 30Х13 И 40Х К. Р. Муратов, В. Ф. Новиков, В. В. Проботюк, С. М. Кулак	102
АТОМИСТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ С ДЕФЕКТАМИ К. А. Мушанкова, Л. В. Степанова	103
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В АЛЮМИНИИ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ М. В. Надежкин, С. А. Баранникова	104
ОБЗОР ПО ПУБЛИКАЦИЯМ, В КОТОРЫХ ПРИВЕДЕНЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В. В. Назаров	105
ВЫБОР ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ В. В. Назаров	106
ОБЗОР ПО СОБСТВЕННЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ В ОБЛАСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В. В. Назаров	107
О НЕКОТОРЫХ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ СТАДИЙНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ О. Б. Наймарк	108
ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ДО НАНОМАСШТАБНОГО УРОВНЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ Cr-Mn-N СТАЛИ ПРИ КРИОГЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ Н. А. Наркевич, Ю. Ф. Гоморова, Е. Е. Дерюгин, И. В. Власов	109
МАГНИТОУПРУГИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ В. В. Нассонов, О. В. Балина	110
ВЫБОР МЕТОДОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СТАНЦИЙ ПРОЕКТНОГО ИСТОЧНИКА «СКИФ» А. К. Насырова, К. Д. Егошин, О. М. Кутькин	111
ПОЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ШЕРОХОВАТОСТИ НА СТАДИИ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ СТАЛИ 09Г2С К. В. Наумов, А. П. Владимиров	112
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В. С. Шахиджанов, О. А. Нехорошева, О. С. Зиновьева, В. А. Романова	113
ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ СТАЛИ 09Г2С С. А. Никулин, С. О. Рогачев, В. А. Белов, Н. В. Шплис	114
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА УДАРНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И. Н. Одинцев, Т. П. Плугатарь	115
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТОХАСТИЧНОСТИ ЭНЕРГОПОГЛОЩЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ ВБЛИЗИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА Н. А. Оливенко, О. А. Кудрявцев	116



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОГО ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА В КОНТЕКСТЕ МАКРОУСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ А. А. Остапчук	117
ОТКЛИК КОНСТРУКЦИИ НА СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ВЫНУЖДЕННЫХ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЯХ Д. А. Ошмарин, Н. А. Юрлова, Н. В. Севодина	118
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В. Ф. Павлов, В. С. Вакулук, В. П. Сазанов, В. К. Шадрин, О. Ю. Семенова	119
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА DIS ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ ВОЛОКОННО- АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ УСТАЛОСТИ С. В. Панин, А. А. Богданов, П. С. Любутин, А. В. Еремин, Д. Г. Буслович, А. В. Бяков	120
СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПЭЭК И УВ-ТКАНИ С. В. Панин, А. В. Бяков, В. О. Алексенко, С. А. Бочкарева, Д. Г. Буслович, Тянь Дэфан	121
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ А. М. Паньков, А. В. Ильиных, А. В. Лыкова, Т. В. Третьякова	122
ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ПОКРЫТИЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ИХ АДДИТИВНОМ ФОРМИРОВАНИИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН Д. А. Паршин	123
ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СООРУЖАЕМЫХ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С РЕОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ Д. А. Паршин	124
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВКЛЮЧЕНИЙ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА ЗАКРЫТОЯЧЕЙСТЫХ ПОРИСТЫХ СТРУКТУР Ю. В. Пирогова, М. А. Ташкинов	125
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЕМА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО $\alpha$ -ТИТАНА М. Писарев, Е. С. Емельянова, В. А. Романова	126
ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ КОРПУСНОЙ СТАЛИ 20ГН ПРИ УПРУГОМ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ А. М. Поволоцкая, А. Н. Мушников	127
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫДАВЛИВАНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА П. А. Поляков, А. П. Поляков	128
ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ НА ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ В. А. Полянский, А. К. Беляев, Ю. А. Яковлев	129
ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА ПАРАМЕТРЫ И СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД Д. А. Попов, Д. Д. Попова, Н. А. Самойленко	130
НАХОЖДЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА В ЗАДАЧАХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ Е. Ю. Просвирыков	131
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРОЧНОСТЬ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ КОМПОЗИТА Cu-Ti-C-B Н. Б. Пугачева, Ю. В. Николин, Т. М. Быкова	132

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ AISI 321 НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК Е. А. Путилова, Л. С. Горулева, С. М. Задворкин	133
ВЛИЯНИЕ ПРИЛОЖЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ Е. А. Путилова, К. Д. Крючева	134
АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ УДАРНИКОВ ИЗ СТАЛИ И ТЯЖЕЛЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРЕГРАДАМИ П. А. Радченко, А. В. Радченко, С. П. Батуев	135
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ УДАРЕ А. В. Радченко, П. А. Радченко, С. П. Батуев	136
ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ОБРАЗЦА МЕЖДУ БОЙКАМИ В УСЛОВИЯХ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ С. О. Рогачев, В. М. Хаткевич, Р. В. Сундеев, М. В. Горшенков	137
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ КОВКИ А. А. Роговой, Н. К. Салихова	138
МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА ГЕЙСЛЕРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ А. А. Роговой, О. С. Столбова	139
ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИ НАГРУЖЕНИЯХ МЕТАЛЛОВ С ИЗЛОМОМ ТРАЕКТОРИИ ДЕФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ К. А. Романов, А. И. Швейкин, П. В. Трусов	140
АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ И НАЛИЧИИ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ А. А. Семенов	141
ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СДВИГОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ М. А. Соковиков, М. Ю. Симонов, В. В. Чудинов, В. А. Оборин, С. В. Уваров, О. Б. Наймарк	142
ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ О. А. Староверов, В. Э. Вильдеман	143
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С РАЗУПРОЧНЯЮЩИМИСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ В. В. Стружанов, А. Е. Чайкин	144
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ УСТАЛОСТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ХАРАКТЕРА Е. М. Струнгарь, О. А. Староверов, Е. М. Лунегова	145
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В НЕРАВНОВЕСНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ И. И. Суханов	146
МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ: ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЯ НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА АУКСЕТИЧЕСКИХ СТРУКТУР А. С. Тарасова, М. А. Ташкинов, И. В. Виндокуров	147
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОНИЗИРОВАННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА Т. Д. Тимкина, Я. Н. Иванов, В. С. Чудинов, И. Н. Шардаков	148
МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ $AlMgB_{14}$ Д. А. Ткачев, И. А. Жуков, В. И. Сачков, И. А. Бельчиков	149
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ В $Al-Mg$ СПЛАВЕ ПРИ СЛОЖНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ Т. В. Третьякова, М. П. Третьяков, В. А. Мельникова, Е. А. Чечулина	150

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПРОЦЕССОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ Т. В. Третьякова, В. Э. Вильдеман	151
ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОРФИРИНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛУКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ П. М. Тюбаева, А. А. Ольхов, А. А. Попов	152
ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОР НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ А. М. Утукина, И. Ю. Смолин, В. А. Зимица	153
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АРМИРУЮЩИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА А. А. Ушканов, А. А. Охлопкова, А. П. Аммосова	154
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСЛОЕК МЕЖДУ МАТЕРИАЛАМИ С МИНИМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ А. Ю. Федоров*, В. П. Матвеев	155
ЛОКАЛЬНОЕ ИНДЕНТИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ А. А. Федоров, И. А. Разумовский, Ю. Г. Матвеев	156
ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Б. Н. Федулов, А. Н. Федоренко	157
МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ МЕТАЛЛООПТИКИ С. А. Филин, В. Е. Роголин, И. А. Каплунов	158
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ CU-AL-SI-MN БРОНЗЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ МЕТОДОМ ЭЛАП А. В. Филиппов	159
ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЯХ СИСТЕМЫ CRN/ZRN А. В. Филиппов, А. В. Воронцов, Н. Н. Шамарин, О. С. Новицкая	160
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НА ОСНОВЕ ТИТАНА ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ А. А. Филиппов, А. А. Голышев, А. Г. Маликов, В. М. Фомин	161
ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 09Г2С Ю. В. Худорожкова, С. М. Задворкин, С. В. Буров	162
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОЦЕДУРЫ UMAT КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО КОМПЛЕКСА SIMULA ABAQUS Д. В. Чаплий, Л. В. Степанова, О. Н. Белова	163
ПОВРЕЖДЕНИЕ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТИ: ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ НА ПОВЕДЕНИЕ ПРИ РАЗРУШЕНИИ А. С. Шалимов, М. А. Ташкинов	164
ИССЛЕДОВАНИЕ ДОМЕНОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ВЗРЫВНОЙ ОТБОЙКИ М. Д. Шарков, М. Е. Бойко, В. А. Боровиков, А. М. Бойко, М. Н. Григорьев, В. И. Николаев	165
ЭВОЛЮЦИЯ МЕЗОСКОПИЧЕСКОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ АЛЮМИНИИ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ В. С. Шахиджанов, О. А. Нехорошева, В. А. Романова	166
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКЛИКА МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ А. И. Швейкин, П. В. Трусев, К. А. Романов	167

УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ DUAL COMPOSITE (ZrB <sub>2</sub> -SiC)/(TaB <sub>2</sub> -SiC) В. В. Шмаков, А. С. Буяков, М. Р. Сухова, С. П. Буякова	168
OPERANDO НАБЛЮДЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В СТАЛЯХ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К. И. Эмурлаев, И. А. Батаев	169
ПРЯМАЯ ДВУХУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: О ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОМ ОБЪЕМЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА А. Ю. Янц, П. В. Трусов, А. А. Токарев	170
ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНАРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ФОТОЛИТОГРАФИЧЕ- СКИМ МЕТОДОМ, СОДЕРЖАЩИХ РАВНОУДАЛЕННЫЕ УЛЬТРАМИКРОЭЛЕКТРОДЫ, ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ОЛИГОПЕПТИДОВ А. Ю. Арбенин, А. А. Петров, Д. В. Назаров, Е. Б. Серебряков, С. О. Кириченко, П. С. Власов, Е. Г. Земцова, В. М. Смирнов, Е. Е. Данилова, С. С. Ермаков, А. Воробьев, М. С. Мухин, А. М. Можаров	171
МЕТОД РАСЧЁТА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИЗДЕЛИЮ-ЛИДЕРУ Е. А. Афанасьева	172
КРИТЕРИИ ПЕРЕХОДА К СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОВ С. А. Баранникова, М. В. Надежкин, П. В. Исхакова	173
ИЗУЧЕНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ В. Э. Вильдеман, М. П. Третьяков, Т. В. Третьякова	174
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАСТИ СКЛЕЙКИ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ КМ Д. Д. Власов, Т. П. Плугатарь, Н. А. Татусь	175
МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ В ОБЛАСТИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ПРОЯВЛЕНИЕ СВЕРХУПРУГОСТИ В МЕТАСТАБИЛЬНОМ ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ VT23 С. В. Гладковский, В. Е. Веселова, Д. И. Вичужанин	176
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 04X17N8T Л. С. Горюлева, С. М. Задворкин, А. Н. Мушников	177
КОМПОЗИТНЫЙ ОТВАЛ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖД ПУТЕЙ ОТ СНЕГА И. А. Егоров, В. В. Жавыркин, Д. Д. Власов, Н. А. Татусь	178
НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ О. С. Лехов, А. В. Михалев	179
НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ О. С. Лехов, А. В. Михалев	180
ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В. В. Малашенко, Т. И. Малашенко	181
К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ СОЕДИНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Д. Р. Салихьянов, Н. С. Мичуров	182
СТАДИЙНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ Н. Н. Соболева, Н. А. Давыдова, А. В. Макаров	183
МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов	184
РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕРЫВИСТОЙ ТЕКУЧЕСТИ В Al-Mg СПЛАВЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ Т. В. Третьякова, М. П. Третьяков	185

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА СВОЙСТВА БИОПОКРЫТИЙ НА ТИТАНЕ В. В. Чебодаева	186
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЭТФ В. А. Шарапова, В. П. Швейкин, И. С. Каманцев, Н. А. Друкаренко, В. Ю. Иванов, О. В. Рябухин	187
МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ДЕСЯТИСЛОЙНОМ СТЕКЛОПЛАСТИКЕ ПРИ ВНЕШНЕМ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ А. С. Смирнов, Е. О. Смирнова, Ю. В. Худорожкова	188
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУР УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В. Г. Дегтярь, С. Т. Калашников, Б.И. Капранов, Г. Ф. Костин, Ю. А. Мокин, В. А. Тюменцев, В. И. Хлыбов, Р. К. Швалева	189
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ В АЛЮМОМАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ АМг6/10% SiC ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ДЕФОРМАЦИЙ В. С. Канакин, А. С. Смирнов, А. В. Коновалов	190
ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ С. В. Смирнов, Д. А. Коновалов, И. А. Веретенникова, А. В. Пестов, В. А. Осипова	191
О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ДВУМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ О. А. Нефедова, Л. Ф. Спевак, А. Л. Казаков	192
МАГНИТНЫЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВОВ И КАЧЕСТВА СОВРЕМЕННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ОБРАБОТОК: РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИДЕЙ АКАДЕМИКА Э. С. ГОРКУНОВА А. В. Макаров, Р. А. Саврай, Ю. М. Колобылин, Л. Х. Коган	193
ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, Д. А. Коновалов, Н. С. Мичуров, А. В. Пестов, В. А. Осипова	194
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ НЕКОТОРЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ДАННЫМ РИТМОКАРДИОГРАФИИ С. С. Белов, В. В. Гагиев, В. А. Миронов, Т. Ф. Миронова, В. В. Привалова, П. К. Цаплина	195
ПРЕДИКТОРНЫЕ КЛИНИКО-ЛАБОРАТОРНЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАРКЕРЫ ПОРАЖЕНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПРИ COVID-19 Г. Р. Садыева, П. К. Цаплина, В. А. Миронов	196
РЕАКЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ВЫДЕРЖКУ В УПРУГО-НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ В. П. Гуляев, П. П. Петров, К. В. Степанова	197
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	198
СОДЕРЖАНИЕ	202

*Научное издание*

XVI Международная конференция  
«МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ»  
сб. материалов (Екатеринбург, 16–20 мая 2022 г.)

Рекомендовано к изданию  
Ученым советом ИМАШ УрО РАН

Издается в авторской редакции  
Ответственный за выпуск *Ю.В. Худорожкова*  
Компьютерная верстка *А.В. Гариева*



Подписано в печать 14.05.2022 г. Формат 60×90 1/8.  
13,00 п. л. Объем данных 1,33 МБ.

Оригинал-макет изготовлен в  
Научно-редакционном отделе ИМАШ УрО РАН  
620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

Размещено в открытом доступе на сайте  
<https://www.imach.uran.ru/conf2022/attend/psi/>