

**Российская Академия наук**



**Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления**

**Российский фонд фундаментальных исследований**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**

**Институт машиноведения им. А.А.Благонравова**

**Российской академии наук**

**Живучесть  
и конструкционное материаловедение**

**Survivability and Structural Materials  
Science**

***ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ***

**(SSMS-2014)**

**21-23 октября 2014 года**

**Москва  
2014**

УДК 621.9  
ББК 34.5

**Редакционная коллегия:**

академик Ганиев Р.Ф., чл.-корр. РАН Махутов Н.А., д.т.н., проф. Романов А.Н., д.т.н., проф. Матвиенко Ю.Г., к.ф.-м.н. Хрущов М.М.

**Тезисы докладов 2-й Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (SSMS-2014)**

В сборник включены тезисы научных докладов, представленных на 2-й Международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (SSMS-2014), проходившей с 21 по 23 октября 2014 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.

Тематика докладов отражает научные результаты, полученные в следующих направлениях:

1. Модели и критерии разрушения материалов и живучесть конструкций на различных масштабно-структурных уровнях.
2. Вычислительная механика разрушения в проблемах живучести и конструкционного материаловедения.
3. Динамические процессы разрушения. Диагностика и мониторинг поврежденных машин и конструкций.
4. Риск-анализ в системе критериев живучести и безопасности.
5. Структура, прочностные, функциональные и технологические свойства материалов со специфическими свойствами (наноматериалы и покрытия, материалы с памятью формы, биметаллические материалы, метаматериалы и т.п.).
6. Сопротивление длительному статическому и циклическому деформированию и разрушению конструкционных материалов, работающих в экстремальных условиях (высокие температуры, вибрационные воздействия, радиационное облучение, агрессивные среды и др.).

Конференция организована при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-20440-г).

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ</b>	
А.В. Аборкин, И.М. Букарев, В.В. Рябкова <i>Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г.Столетовых, Владимир, Россия</i>	13
<b>СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ</b>	
М.И. Алымов <i>Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Россия;</i> <i>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия</i>	14
<b>ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ</b>	
В.Е.Архипов, А.А.Дубравина, А.Ф.Лондарский, Г.В.Москвитин, А.Ф.Мельшанов, М.С.Пугачев <i>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	15
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ В ИССЛЕДОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОШЛИФОВ</b>	
Р.С. Ахметханов <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	16
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ</b>	
М.Б.Бакиров, Е.М.Морозов, И.А. Белуник, Е.С. Крутько <b>ЦЕНТР МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И РЕСУРСА, ЛЮБЕРЦЫ, РОССИЯ</b>	17
<b>ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИНДЕНТИРОВАНИЮ СТЕКЛА</b>	
О.А. Батанова, Ю.Г. Матвиенко <i>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	18
<b>СТЕПЕНЬ ИОНИЗАЦИИ КВАЗИТЕПЛОВЫХ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ, РАСПЫЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КАСКАДОВ СТОЛКНОВЕНИЙ</b>	
С.Ф. Белых, А.Б. Толстогузов, А.А. Лозован <i>МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», Москва, Россия;</i> <i>Centre for Physics and Technological Research (CeFITec), Dept. de Fisica da Faculdade de Ciencias e Tecnologia (FCT) Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal</i>	19
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ И ОБРАЗЦОВ</b>	
В.П. Бирюков, И.М. Петрова, И.В. Гадолина <i>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	20

- МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ «ОСНОВА –  
МАТЕРИАЛ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ»,  
СФОРМИРОВАННОЙ В УСЛОВИЯХ  
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ** 21  
Ж.М. Бледнова, П.О. Русинов, М.А. Степаненко  
*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар,  
Россия*
- ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ОРГСТЕКЛЕ  
АКУСТО-ЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
НА МАТЕРИАЛ НИЗКИМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ** 22  
А.М. Большаков, Я.М. Андреев  
*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО  
РАН, Якутск, Россия*
- НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ  
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА** 23  
А.М. Большаков, А.В. Бурнашев  
*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Россия*
- ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ ПРОЦЕССА АНАЛИЗА РИСКА, КАК  
ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ** 24  
А.М. Большаков, М.И. Захарова  
*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Россия*
- СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗОПРОВОДОВ, РАБОТАЮЩИХ В  
УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР** 25  
А.М. Большаков, А.Р. Иванов  
*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Россия*
- ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРУНДОВОЙ  
КЕРАМИКИ ДЛЯ ЛИТЬЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СПЛАВОВ  
МАТИ – Российский государственный технологический университет им.  
К.Э. Циолковского, Москва, Россия;** 26  
*ГНЦ РФ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт  
химии и технологии элементоорганических соединений», Москва, Россия*
- ЖИВУЧЕСТЬ ТРУБЫ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА  
С ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОЙ С УЧЁТОМ  
ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ** 27  
В.М. Веселуха, А.В. Богданович  
*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно,  
Беларусь,  
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*
- МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО  
СТЕРЖНЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ СПЛАВА С ЭФФЕКТОМ  
ПАМЯТИ ФОРМЫ** 28  
С.С. Гаврюшин, С.М. Ганыш  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э.  
Баумана, Москва, Россия*

**УСКОРЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ШИРОКОМ  
ДИАПАЗОНЕ ЧИСЕЛ ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ**

И.В.Гадолина, Р.И.Зайнетдинов

*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;  
Московский государственный университет путей сообщения, Москва,  
Россия*

29

**ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Гриб В.В.

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический  
университет (МАДИ), Москва, Россия*

30

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В  
ВАРИАЦИОННОЙ ПОСТАНОВКЕ**

Е.Л. Гусев

*Институт проблем нефти и газа Сибирского Отделения РАН, Якутск,  
Россия*

31

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НОЖЕЙ ПИТАЮЩЕ-  
ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ АППАРАТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
КОМБАЙНОВ**

В.О. Замятнин, В.В. Комиссаров, П.С. Дробышевский, Н.В. Псырков,  
Л.А. Сосновский

*ОАО «Гомсельмаш», Гомель, Беларусь*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,  
Беларусь*

*ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь*

32

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Е.В. Зеньков, Л.Б. Цвик

*Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия,  
Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск,  
Россия*

33

**АКТИВНОЕ ГАШЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

М.Я. Израилович, Б.М. Эрлих

*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ R-КРИВОЙ ДЛЯ РАСЧЕТА  
ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА  
ИЛ-96-300**

А.С. Ким, В.В. Оводов

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф.  
Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;*

*ОАО «Ил», Москва, Россия*

35

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ  
СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА МАРКИ ВЧТГ И СТАЛИ**

В.В. Комиссаров, Е.С. Таранова, В.О. Замятнин, Н.В. Псырков, Л.А.  
Сосновский

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,*

36

Беларусь

ОАО «Гомсельмаш», Гомель, Беларусь

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь

**ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ  
МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ**

Ю.В.Корнев, М. В.Мурашов, Е.В.Торская, О.В.Бойко, С.В.Чиркунова

Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия,

Московский государственный технический университет им. Н. Э.  
Баумана. Москва, Россия.

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526,  
Москва, Россия

37

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ О ТОНКОЙ АТОМНОЙ  
СТРУКТУРЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ И  
ПЛЕНОК ПРИ ИХ ИЗУЧЕНИИ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ  
ДИФРАКТОМЕТРИИ**

И.С.Левин, М.М.Хрущов, В.М.Авдюхина, С.А.Шальнов

Институт машиноведения им. А.А.Благодирова РАН, Москва, Россия,

Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ  
МЕТАЛЛ – МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ (СТАЛЬ  
45 – СИЛУМИН) ПРИ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ  
УСТАЛОСТИ**

И.Н. Лис, Л.А. Сосновский, А.В. Богданович

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь,

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь;

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

**ФОРМИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПРИ  
ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОСАЖДЕНИИ ТИТАНА В  
ВАКУУМЕ**

А.А. Лозован, С.В. Прищепов, С.В. Франгулов, Р.Н. Ризаханов, С.К.

Сигалаев

МАТИ – Российский государственный технологический университет  
имени К.Э. Циолковского, Москва, Россия;

ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва,  
Россия

39

**СТРУКТУРА  $\text{CeO}_2$  ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ И  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

А.А. Лозован, С.С. Александрова, С.В. Франгулов, Р.Н. Ризаханов, С.К.

Сигалаев

МАТИ – Российский государственный технологический университет  
имени К.Э. Циолковского, Москва, Россия;

ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва,  
Россия

40

**НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ  
РЕЛЬСОВ ИЗ ЧУГУНА ВЧТГ**

В.И. Матвеев, Н.Е. Мирошников, Л.А. Сосновский

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель,  
Беларусь,

ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь

42

<b>РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМАХ ПРОЧНОСТИ</b>	43
Ю.Г. Матвиенко <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ</b>	44
Л.Е. Матохнюк, А.В. Бялонович <i>Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина</i>	
<b>ЖИВУЧЕСТЬ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ</b>	45
Н.А. Махутов <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СТАТИЧЕСКОГО И МАЛОЦИКЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ С УЧЁТОМ РАССЕЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И НАГРУЖЕНИЯ</b>	47
Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный, Д.О.Резников <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В ЗОНАХ РАЗНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ МАЛОЦИКЛОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН.</b>	49
Н.А. Махутов, И.В. Макаренко, Л.В. Макаренко <i>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СТАЛИ ЛИТЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	50
Г.В. Москвитин, С.Г. Лебединский, М.С. Пугачёв М.С. <i>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОПОРОШКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b>	51
В.В. Москвичев <i>Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра СО РАН, Красноярск, Россия</i>	
<b>СРАВНЕНИЕ УПРУГОГО И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ</b>	52
Г.П. Никишков <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>О КАЧЕСТВЕ МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ</b>	53
О.Г. Новоженова <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>НОРМИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ</b>	54
А.Н. Панов <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР</b>	55
А.Н. Панов <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	

<b>ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ, ВДАВЛИВАНИЯ И ЦАРАПАНИЯ</b>	
М.И.Петржик, М.Я.Бычкова, Е.А.Левашов	56
<i>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия</i>	
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ МАШИН ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	57
И.М. Петрова, И.В. Гадолина	
<i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ (МЦУ) И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ (МНЦУ) ДЕФОРМИРУЕМЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГТУ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР</b>	58
А.Н. Петухов	
<i>ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Россия</i>	
<b>РАЦИОНАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ЗВЕНА БАМБУКА И КОМПОЗИТНОЙ ТРУБЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ СЖАТИЮ, ИЗГИБУ И КРУЧЕНИЮ</b>	59
И.С.Плитов, А.Н.Полилов	
<i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КРИВОЛИНЕЙНОГО АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ В ЗОНЕ КРЕПЛЕНИЯ</b>	60
А.Н.Полилов, А.В.Малахов	
<i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ НА МЕТАЛЛЫ</b>	61
Е.А. Правоторова, О.Б. Скворцов	
<i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ООО «Диамех 2000», Москва, Россия</i>	
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЦЕНАРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b>	62
Д.О.Резников	
<i>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>ОБОБЩЕННАЯ КРИВАЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	63
А.Н. Романов	
<i>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА ХАРАКТЕР НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	64
А.Н. Романов, Н.И. Филимонова	
<i>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	

<b>НОМЕНКЛАТУРА И СТРУКТУРИЗАЦИЯ ДАННЫХ В БАНКАХ ЗНАНИЙ О МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ</b>	
В.А.Руденко, В.В.Грот, А.И.Гаврилов <i>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия ОАО «НТЦ Промбезопасность», Москва, Россия</i>	65
<b>АКУСТИКОЭМИССИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТРИЦЫ И ВОЛОКНА НАГРУЖАЕМОГО СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТЬЮ</b>	66
П.Б Северов, Ю.Г Матвиенко, В.И. Иванов <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТОНКОЙ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ОСЛАБЛЕННОЙ ОТВЕРСТИЕМ</b>	67
С.В. Серёгин, О.Е. Сысоев <i>Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия</i>	
<b>ВОЗМОЖНОСТЬ ВНЕСЕНИЯ КРИТЕРИЯ РЕСУРСА В НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ БАЗУ НОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИИ</b>	68
О.Б.Скворцов <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ООО «Диамех 2000», Москва, Россия</i>	
<b>НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ</b>	
Л.А. Сосновский, В.В. Комиссаров, Е.С. Таранова <i>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь</i>	69
<b>О ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ МОДЕЛИ АСФАЛЬТОБЕТОН/ШИНА ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ</b>	
Л.А. Сосновский, Е.А. Темников <i>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь</i>	70
<b>СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ С ТОКОМ</b>	71
В.В. Столяров <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия</i>	
<b>ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНАМИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ</b>	72
П.В. Тараканов, Г.В. Шашурин <i>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия</i>	

- ПРОФИЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ, КАК СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВЫХ РЕССОР** 73  
Н.А.Татусь, А.Н.Полилов  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*
- ГЕНЕРАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ КАК МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ УСКОРЕННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ** 74  
О.А.Троицкий, В.И.Стащенко, Е.А.Правоторова, О.Б.Скворцов  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ООО «Диамех 2000», Москва, Россия*
- ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЖРД** 75  
С.М. Усов, Г.Н. Устинов, И.Н. Одинцев, А.А. Апальков, А.И. Соколов  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ГНФ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия*
- РАССЕИВАНИЕ ЭНЕРГИИ В КОНЧИКЕ ТРЕЩИНЫ В КОМПОЗИТАХ ИЗ ХРУПКИХ КОМПОНЕНТОВ СО СЛАБОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА** 76  
К.А. Хвостунков, А.Б. Недбайло  
*Мех-мат МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия; Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*
- СВЯЗЬ НАНОКОМПОЗИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА И ЕГО ФАЗ С ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ** 77  
М.М. Хрущов  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*
- ЛЕГИРОВАННЫЕ АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПОВЕДЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ** 78  
М.М. Хрущов, Е.А. Марченко, М.В. Атаманов, А.А. Дубравина, И.С.Левин, Ю.А.Тарелкин  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия, ЗАО «ИНАКОТЕК», Москва, Россия; Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия*
- ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ В ЖИДКОМ АЗОТЕ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ АНТИФРИКЦИОННОГО СПЛАВА Б-83.** 79  
П.Д.Чхетиани, Ю.И. Щербаков, О.В.Бармина, Н.Н.Новикова  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*
- ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ СОЗДАНИИ АВТОБАЛАНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ** 80  
Л. Н. Шаталов  
*Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия*

<b>ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА КОМБАЙНА</b>	<b>81</b>
С.С. Щербаков, О.А. Насань <i>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь</i>	
<b>ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТИ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ПММА СТЕКЛА</b>	<b>82</b>
Н.О. Яковлев <i>ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия</i>	
<b>ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ</b>	<b>83</b>



## СИНТЕЗ НАНОКОМПЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ

А.В. Аборкин, И.М. Букарев, В.В. Рябкова

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича  
Столетовых, Владимир, Россия; [aborkin@vlsu.ru](mailto:aborkin@vlsu.ru)

*Предложен и апробирован алгоритм для определения режимных параметров процесса напыления, обеспечивающих синтез покрытий с заданными свойствами и максимально возможной скоростью роста. С помощью алгоритма определены режимы напыления покрытия AlN/CrN. Установлено хорошее соответствие прогнозируемых и реальных свойств полученного покрытия.*

*Ключевые слова: покрытия, нейронная сеть, параметрическая оптимизация, скорость роста*

В последнее время особое внимание уделяется многослойным покрытиям (толщина одного слоя порядка 5-20 нм) с периодической нанокompозитной структурой. Величина периода слоев и фазовый состав таких покрытий оказывают влияние на их эксплуатационные свойства и определяют проявление наноструктурных эффектов, заключающихся в повышении твердости, износостойкости и снижения коэффициента трения и т.п. Причем указанные свойства в зависимости от технологических режимов процесса напыления могут изменяться в 1,5 и более раза. Учитывая это, актуальной становится задача синтеза нанокompозитных покрытий с заданными свойствами на основе управления режимными параметрами процесса напыления.

Решение данной задачи возможно посредством установления взаимосвязи режимов технологического процесса напыления и свойств покрытий. Кроме того, для повышения эффективности процесса напыления, необходимо из множества возможных комбинаций режимных параметров выбрать обеспечивающие максимально возможные скорости роста покрытия.

Для этого разработан и апробирован алгоритм определения оптимальных параметров технологического режима напыления, обеспечивающих получение покрытий с заданными свойствами. Алгоритм включает в себя планирование и проведение эксперимента с варьированием режимных параметров процесса напыления; экспериментальные исследования свойств полученных покрытий (твердость, модуль упругости, интенсивность объемного износа, коэффициент трения); разработку архитектуры перцептронной нейронной сети и ее обучение с помощью результатов экспериментальных исследований; проверку адекватности полученной модели; решение задачи оптимизации для определения оптимальных параметров технологического режима напыления, обеспечивающих получение покрытий с заданными свойствами и максимально возможной скоростью роста.

Апробация данного алгоритма проведена для покрытия AlN/CrN. Данному покрытию соответствует высокий уровень механических свойств [1-3].

Синтез различных вариантов покрытия AlN/CrN выполнен методом магнетронно-ионного реактив-

ного распыления на установке UNICOAT 600 SL+. При напылении покрытий использовали два планарных прямоугольных магнетрона на постоянных магнитах с мишенями из Cr и Al на первом и втором магнетронах соответственно. В качестве реактивного газа использовали азот. Экспериментальное изучение свойств полученных покрытий проводили с помощью оборудования фирмы CSM Instruments. Установлено, что при различных значениях параметров напыления свойства покрытия изменяются в широком диапазоне. Например, твердость HV=2284...3988, износостойкость  $I_T=(2,55...6,72)\times 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/м, модуль упругости E=303...424 МПа, коэффициент трения  $\mu=0,55...0,76$ , скорость роста  $v=1,2...3,1$  мкм/час.

При построении нейросетевой модели использовали перцептрон, имеющий многослойную архитектуру, включающую входной, выходной и два скрытых слоя. Для обучения нейронной сети использовали градиентный алгоритм Rprop, разработанный М. Ридмиллером и Г. Брауном. Далее решали задачу параметрической оптимизации.

В результате определены рациональные режимы напыления покрытия AlN/CrN, соответствующие высоким износостойкости и скорости роста покрытия:  $I_{d1}=17...18$  А,  $I_{d2}=17...18$  А,  $C_R=12...15\%$ . При использовании данных параметров получено покрытие со следующими характеристиками:  $I_T=(3,04...3,08)\times 10^{-5}$  мм<sup>3</sup>/м,  $v=2,8...3,0$  мкм/час. Установлено хорошее соответствие прогнозируемых и реальных свойств покрытия. Расхождение не превысило 6%. Практическое применение такое покрытие может найти при упрочнении рабочих поверхностей режущего инструмента для удаления грата, образующегося при изготовлении сварных труб из нержавеющей сталей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-08-31569 и №14-08-97517)

1. Букарев И.М., Аборкин А.В. Исследование свойств многослойных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 5. - С. 16-19.
2. Аборкин А.В., Рябкова В.В., Сергеев А.В. Исследование трибологических свойств многослойных и многокомпонентных вакуумных ионно-плазменных покрытий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 5. - С. 12-15.
3. Букарев И.М., Аборкин А.В. Влияние режима напыления на структуру и свойства многослойных нитридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 11. - С. 33-38.

## СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

М.И. Алымов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, Черноголовка, Россия;  
[director@ism.ac.ru](mailto:director@ism.ac.ru)

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

*Порошковые материалы обладают уникальными свойствами: пористость, высокая твердость, тугоплавкость, особые трибологические, электромагнитные и другие свойства. Во многих случаях порошковые материалы более экономичны и экологичны.*

*Ключевые слова: материалы, прочность, пластичность, порошки, консолидация, структура, размер зерна, пористость.*

Представлен краткий обзор данных о методах получения, свойствах и перспективных областях применения объемных консолидированных из нанопорошков материалов. Наноматериалы используются в виде порошков, покрытий и объемных материалов. Однако некоторые свойства наноматериалов пока еще недостаточно используются. Например, высокие механические и многофункциональные свойства нанометаллов должны быть использованы в микроэлектромеханических системах, которые изготавливаются из деталей размером несколько микрон. В случае использования обычных поликристаллов, границы зерен будут пересекать деталь по поперечному сечению и снижать ее прочность и надежность.

Наблюдается возрастающий интерес к твердым сплавам на основе карбида вольфрама и кобальта. Проведенные исследования высокоскоростной консолидации нанопорошков чистого карбида вольфрама методом электроимпульсного плазменного спекания [2] показали, что полученные образцы высокоплотного наноструктурного карбида вольфрама обладают высокими значениями твердости (до 31 ГПа) и трещиностойкости ( $5,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ).

Формирование наноструктур в ударниках бронейных подкалиберных снарядов из тяжелых вольфрамовых сплавов усиливает склонность материала к локализации деформации и последующему разрушению путем отслаивания чешуек, что должно улучшать служебные свойства ударников. Из нанопорошков тяжелого вольфрамового сплава системы W-Ni-Fe-Co (размер частиц около 100 нм), синтезированных химико-металлургическим способом, методом твердофазного спекания получен компактный материал с плотностью  $\sim 17,4 \text{ г/см}^3$  и размером зерна вольфрама 2,4 - 4,6 мкм [3]. Тяжелые вольфрамовые сплавы из нанопорошков имеют более высокие механические свойства, чем стандартные сплавы: твердость по Виккерсу сплава из нанопорошков после твердофазного спекания в 2,5 раза выше, чем заводского сплава после жидкофазного спекания и в 1,4 раз выше, чем заводского сплава после дополнительной упрочняющей обработки. Предел текучести и временное сопротивление на сжатие при комнатной температуре мелкозернистых тяжелых

вольфрамовых сплавов, полученных из нанопорошков твердофазным спеканием при  $1350^\circ\text{C}$ , на  $\sim 55$  и  $\sim 35$  % больше, чем прочностные характеристики промышленных сплавов.

Керамика на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  используется в машиностроении (рабочие пластины режущих инструментов), для изготовления износостойких элементов оборудования текстильной промышленности (втулки, кольца, пластины), деталей высокотемпературных, высокооборотных износостойких гибридных и полностью керамических подшипников, элементов и узлов горячей зоны газотурбинных двигателей, двигателей внутреннего сгорания, в керамическом и ювелирном производствах, в стекольной промышленности, в оптике (опорные плиты для оптических приборов), в химической промышленности (клапаны, сопла, уплотнительные кольца, прокладки работающие в агрессивных средах).

В работе [4] качестве исходного порошка использовали порошок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в ИСМАН, представляющий собой волокнистые частицы нитрида кремния, со средним размером в длину около 2 мкм и толщиной до 200 нм. Механическая прочность при изгибе полученных компактов при температуре  $1400^\circ\text{C}$  достигала 400 МПа.

1. Алымов М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. М., Академиздат. 2007. 169 с..
2. Чувильдеев В.Н., Благовещенский Ю.В., Болдин М.С. и др. Высокоскоростное электроимпульсное плазменное спекание наноструктурного карбида вольфрама. Часть 1. Эксперимент. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. №3. с. 14 – 21..
3. К.Б. Поварова, М.И. Алымов, А.А. Дроздов. Тяжелые вольфрамовые сплавы на основе нанопорошков. Вопросы материаловедения. 2008. №2 (54). С.94-99.
4. К.А. Солнцев, Ю.Ф. Каргин, А.С. Лысенков, С.Н. Ивичева, Н.С. Ахмадулина, Н.А. Овсянников. Керамические композиты на основе нитрида кремния. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН — 75 лет. Сб. научных трудов под ред. академика К.А. Солнцева. М.: Интерконтакт Наука, 2013, 792 с.

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Архипов В.Е., Дубравина А.А., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Мельшанов А.Ф., Пугачев М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [vearkhipov@mail.ru](mailto:vearkhipov@mail.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты исследования структуры и свойств медного и никелевого покрытия, полученного методом газодинамического нанесения покрытий. Исследуемый метод позволяет получать покрытие меди с твердостью 1700 МПа, состоящее из частиц меди и оксида алюминия, массовая доля которого не превышает 1,3%, а также покрытие никеля с твердостью до 2700 МПа, состоящее исключительно из никеля в кристаллическом состоянии.

**Ключевые слова:** покрытие меди, покрытие цинка, твердость покрытия, размер частиц, температура напыления.

В настоящей работе представлены результаты исследования структуры и свойств покрытий, нанесённых на поверхность образцов из стали с использованием металлов отличающихся физико-механическими характеристиками.

При газодинамическом напылении используют воздух под давлением до 6 атм и температурой нагрева до 600°C. При этом энергии потока частиц недостаточно для формирования на поверхности покрытия с высокими механическими характеристиками (адгезией, когезией). Поэтому для повышения механических характеристик покрытия напыление проводят с использованием смеси пластичных (Ni, Cu, Al, Zn) и твёрдых, хрупких частиц (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Твёрдые частицы соударяются с пластичными частицами, в результате чего деформируют их и уплотняют покрытие [1].

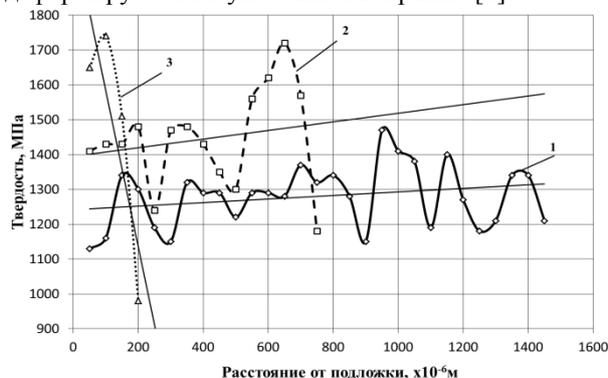


Рис. 1 Распределение твердости по глубине слоя меди, нанесённого при пяти циклах воздействия с температурой: 1-540°C, 2-360°C, 3-180°C.

Метод газодинамического напыления является перспективным для технологий повышения живучести машин и снижения техногенных рисков объектов гражданского и оборонного назначения. Поэтому, исследование процесса модифицирования поверхности стали под воздействием смеси твёрдых и пластичных частиц высокой энергии является актуальной задачей.

Напыление никеля и меди на образцы из стали 20 осуществлялось с использованием газодинамической установки модели «ДИМЕТ – 404». В качестве порошка для напыления покрытия применялась механическая смесь частичек никеля и меди с корундом в соотношении 1:1.

Повышение времени напыления (количества циклов) сопровождается повышением твердости во всём диапазоне температур (рис. 1).

Поверхность соприкосновения нанесённого покрытия и подложки не содержит дефектов (пор, трещин и т.д.), что должно обеспечить высокую адгезию.

Минимальное по времени воздействие на поверхность стали смесью порошков никеля и корунда при температуре 180°C приводит к формированию покрытия с твердостью порядка 2700 МПа (рис. 2).

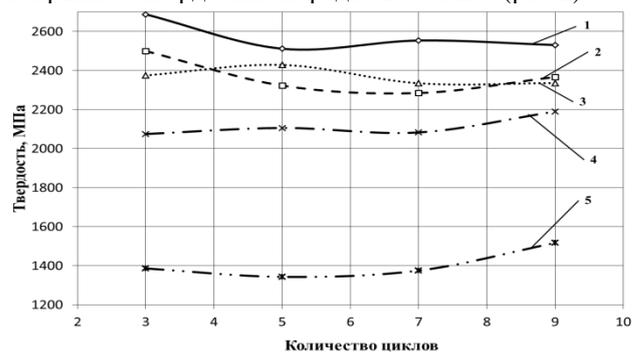


Рис. 2 Изменение твердости покрытия никеля в зависимости от времени и температуры напыления: 1 – 180°C; 2 – 360°C; 3 – 540°C; 4 – 540°C с последующей термической обработкой в печи при температуре 530°C и выдержке 2 часа; 5 – 540°C с последующей термической обработкой в печи при температуре 830°C и выдержке 4 часа.

Размер фрагментов структуры покрытия никеля составляет порядка 105 нм. Можно утверждать, что основным механизмом повышения твердости наносимого покрытия является измельчение зерна никеля под воздействием твёрдых и хрупких частиц корунда.

**Выводы.** Механизм формирования свойств покрытий при напылении смесью твёрдых и пластичных частиц зависит от величины предела текучести металла. При его значении выше 50 МПа (медь) процесс связан с деформацией частиц пластичного металла, а при более низком значении (никель) с дроблением исходной структуры на фрагменты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант №14-08-00634 А)

1. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшанов А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Свойства медных покрытий, нанесённых газодинамическим напылением. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 9. С.17-23.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ В ИССЛЕДОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОШЛИФОВ

Р.С.Ахметханов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия, [mibsts@mail.ru](mailto:mibsts@mail.ru)

**Аннотация.** В докладе представлен подход к анализу структуры материала по изображению микрошлифов с применением методов теории фракталов (фрактальные оценки) и вейвлет-анализа (кратно-масштабный анализ).

**Ключевые слова:** микрошлиф, изображение, фрактальная размерность, показатель Херста, вейвлет-преобразование, кратно-масштабный анализ, структура, фазы, зерно, границы, остов

Выявление и анализ физических особенностей механизмов появления и накопления повреждений в материале играет важную роль при формировании физических критериев достижения конструкционным материалом (КМ) предельного состояния.

Для обеспечения необходимой прочности и ресурса элементов конструкции проводятся экспериментальные исследования их механических характеристик. При этом в некоторых случаях требуется проводить анализ микрошлифов (изображений), например, при нагрузочных испытаниях. Изменения, происходящие внутри деформируемого материала при нагрузочных испытаниях, находят однозначное отражение и в изменениях изображения микрошлифа.

Существует множество алгоритмов цифровой обработки изображений, основанных на различных математических подходах. В настоящее время одним из развивающихся направлений в цифровой обработке изображений является фрактальный анализ. Методы фрактального материаловедения применяются для описания структур материала сварных швов, усталостных изломов и областей разрушения, выделения локальных особенностей и т.п.

При исследовании микрошлифов его изображение может быть представлено в различном виде – выделены фазы, границы, остов и т.п. При этом фрактальная размерность  $D$  может определяться в следующих границах:  $1 < D < 2$ ;  $2 < D < 3$ .

На рис. 1 приведен пример изображения границ между фазами КМ полученного при обработке изображения микрошлифа.

Для анализа микрошлифов также может быть применено вейвлет-преобразование. На рис. 2 приведен пример кратного-масштабного вейвлет-анализа изображения микрошлифа (рис. 2а) и вейвлет-дерево (рис. 2б), определяющее процентный состав структурных элементов (фаз) различного масштаба в изображении микрошлифа.

Представленные в докладе результаты исследований показывают, что теория фракталов и вейвлет-преобразование могут быть использованы для исследования локальных, общих и масштабных особенностей изображений микрошлифов при оценке состояния технических систем – косвенной оценке накопленных повреждений в материале образца.



Рис. 1. Изображение распределения границ между фазами конструкционного материала

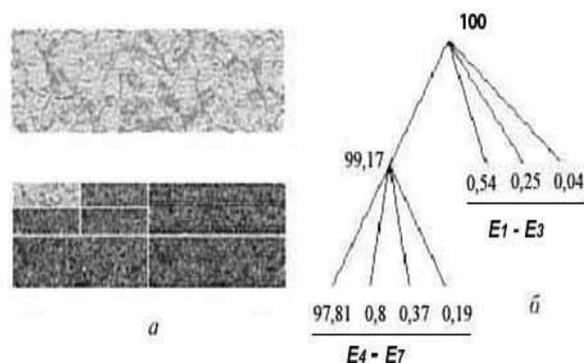


Рис. 2. Кратно-масштабный анализ изображения: а – кратного-масштабное разложение изображения, б – вейвлет-дерево

Теория фракталов дает общую качественную оценку произошедших изменений в изображении микрошлифа, например, при увеличении числа циклов нагружений, а вейвлет-анализ позволяет получить количественные оценки для фазовых элементов различных масштабов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ

М.Б.Бакиров, Е.М.Морозов, И.А.Белуник., Е.С. Крутько

Центр материаловедения и ресурса, Люберцы, Моск. обл., Россия; [info@expresstest.ru](mailto:info@expresstest.ru)

**Аннотация.** Описана методика определения характеристик трещиностойкости материалов по кривым, полученным при испытаниях методом кинетического вдавливания.

**Ключевые слова:** кинетическое индентирование, вязкость разрушения, удельная работа вдавливания.

Предложена безобразцовая методика определения вязкости разрушения материалов на основе метода кинетического индентирования. Методика основана на вычислении удельной работы индентирования, которая на определенной глубине вдавливания равна вязкости разрушения контролируемого материала. Приводятся результаты экспериментов [1], проведенных на компактных образцах корпусной стали 15Х2МНФА с определением вязкости разрушения по ГОСТ25.506 и по результатам индентирования шариками диаметром 1 и 2,5 мм. Образцы подвергались термообработке, имитирующей старе-

ние металла во времени. Получена тарировочная линия, позволяющая находить вязкость разрушения стали в условиях эксплуатации. Данная методика позволяет оценивать степень охрупчивания материалов конструкций в условиях длительной эксплуатации при периодическом натурном неразрушающем контроле.

1. Бакиров М.Б., Морозов Е.М., Белуник И.А., Е.С. Крутько. Определение вязкости разрушения корпусной стали 15Х2МНФА методом кинетического индентирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 2. С. 44-49.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ИНДЕНТИРОВАНИЮ СТЕКЛА

О.А. Батанова, Ю.Г. Матвиенко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; ygmatvienko@gmail.com

**Аннотация.** В докладе в рамках феноменологического подхода рассмотрены закономерности образования поверхностных трещин в экспериментах по индентированию стекла индентором Роквелла. Результаты получены на базе конечно-элементного моделирования экспериментов с использованием программного комплекса ANSYS 13.

**Ключевые слова:** индентирование, хрупкие материалы, конечно-элементное моделирование, контактная задача

Выполнен анализ экспериментов по индентированию стекла индентором Роквелла с радиусом закругления 200 мкм на основе конечно-элементного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS 13. При моделировании использовалась модель упруго деформирующегося тела. Анализ расчётов позволяет утверждать, что первичная трещина, с траекторией в виде окружности, возникает при достижении напряжениями на этой траектории значений соответствующих предельному напряжённому состоянию, определяемому по критерию прочности. Наблюдаемый в экспериментах по индентированию хрупких материалов факт [1] образования первичной кольцевой трещины не на границе контактной площадки, а её пределами и на различных расстояниях от центра индентора, обусловлен различием у хрупких материалов пределов прочности при растяжении и сжатии. При наличии экспериментальных данных о пределах прочности при растяжении и сжатии в качестве условия прочности может быть применено условие [2]:

$$PI_2(D_\sigma) + QI_1(T_\sigma) - 1 = 0,$$

где  $I_2(D_\sigma)$  - второй инвариант девиатора напряжений,  $I_1(T_\sigma)$  – первый инвариант тензора напряжений,  $P = 3/\sigma_c \sigma_p$ ,  $Q = (\sigma_c - \sigma_p)/\sigma_c \sigma_p$ ;  $\sigma_c, \sigma_p$  - пределы прочности при сжатии и растяжении.

Помимо первичной круговой трещины в экспериментах по индентированию стекла наблюдаются также, распространяющиеся от неё, поверхностные радиальные трещины (рис. 1).

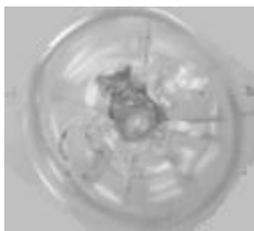


Рис. 1. Трещина близкая по форме к окружности и расходящиеся от неё радиальные трещины, возникающие при внедрении индентора Роквелла в поверхность стекла.

За пределами площадки контакта главные напряжения убывают по абсолютной величине, стремясь к нулю. Объяснить образование вторичных поверхностных радиальных трещин в осесимметричном поле напряжений с точки зрения наступления предельного напряжённого состояния не представляется возможным. Анализ изменения компонент перемещений, деформаций и напряжений в окрестности площадки контакта, позволил установить, что четыре взаимно перпендикулярные радиальные трещины распространяются от круговой трещины вдоль траекторий, соответствующих локальным экстремумам функций  $\varepsilon_x(x)$ ,  $\sigma_x(x)$  (трещины в направлении оси Z) и  $\varepsilon_z(z)$ ,  $\sigma_z(z)$  (трещины в направлении оси X) (рис. 2).

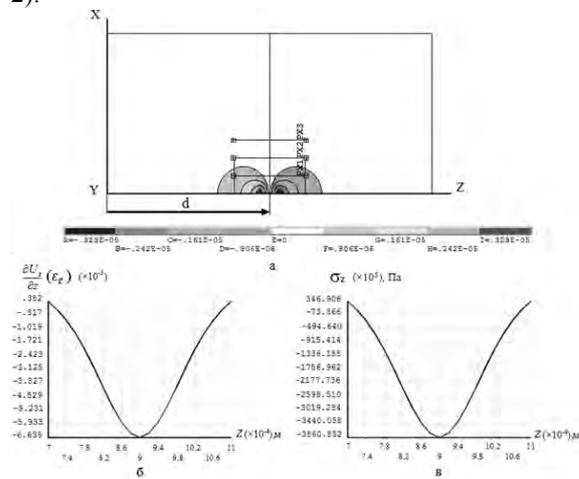


Рис. 2. Траектории  $PATH X_i$  в плоскости XZ образца из стекла на фоне изолиний компоненты  $U_x$ (м) вектора перемещений (а). Графики изменения  $\partial U_x / \partial z$  ( $\varepsilon_z$ ) (б) и  $\sigma_z$  (в) для траектории  $PATH X_2$  ( $X=2 \times 10^{-4}$  м).

Помимо четырёх взаимно перпендикулярных трещин, в экспериментах наблюдаются, также, другие радиальные трещины, появление которых можно объяснить наличием дополнительных дефектов в материале образца.

1 Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: ЛКИ, 2007. 219 с.

2. Батанова О.А. Специфика прочностного расчёта деталей из полухрупких материалов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2009. № 5.С. 48-53.

## СТЕПЕНЬ ИОНИЗАЦИИ КВАЗИ-ТЕПЛОВЫХ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ, РАСПЫЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛОВ В РЕЖИМЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КАСКАДОВ СТОЛКНОВЕНИЙ

С.Ф. Белых<sup>1</sup>, А.Б. Толстогузов<sup>2</sup>, А.А. Лозован<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», Москва, Россия; [loz-plasma@yandex.ru](mailto:loz-plasma@yandex.ru)

<sup>2</sup>Centre for Physics and Technological Research (CeFITec), Dept. de Fisica da Faculdade de Ciencias e Tecnologia (FCT) Universidade Nova de Lisboa, Campus de Caparica 2829-516 Caparica, Portugal

*В настоящей работе впервые получена аналитическая формула для расчета степени ионизации атомных частиц, распыленных из металлов в режиме нелинейных каскадов столкновений.*

*Ключевые слова: линейный и нелинейный режимы ионного распыления, тепловой пик, квази-тепловые атомы и атомные ионы, степень ионизации квази-тепловых атомных частиц.*

Известно, что при ионном распылении металлов в режиме линейных каскадов столкновений зарядовый состав распыленных атомных частиц формируется в процессе электронного обмена с поверхностью (на расстоянии порядка нескольких Å), а степень ионизации  $\alpha = N^+/N^0$  ( $N^+$  и  $N^0$  – число распыленных ионов и атомов), определяющая эффективность электронного обмена, зависит от потенциала ионизации, скорости и угла вылета эмитируемых атомов, а также локальной электронной структуры поверхности [1]. Если теория распыления металлов в режиме линейных каскадов [2] количественно описывает эмиссию нейтральных атомов, то существующие модели электронно-обменного механизма дают лишь качественное понимание процесса ионизации, но не количественное описание вторично-ионной эмиссии, что ограничивает использование такой эмиссии в аналитических и технологических целях.

Современная аналитика [3, 4] и технологии, нацеленные на создание новых конструкционных материалов [5], все более ориентируются на использовании ионного распыления металлов в режиме нелинейных каскадов, когда плотность энергии (средняя энергия, приходящаяся на один атом), выделенной бомбардирующим многоатомным ионом в объеме теплового пика, превышает критическую температуру среды. По сравнению с линейным режимом, нелинейный режим распыления инициирует более интенсивную эмиссию «квази-тепловых» атомов и атомных ионов и аномально интенсивную эмиссию кластеров и кластерных ионов. Энергетический спектр квази-тепловых частиц существенно смещен в область малых энергий и не описывается максвелловским распределением. Принципиально важно, что в нелинейном режиме распыления «работают» совершенно другие механизмы эмиссии атомных частиц и формирования их зарядового состава. В работах [6, 7], в предположении о столкновительном движении потока распыленных частиц на отлете от металла, предложена модель эмиссии, в рамках которой получены аналитические формулы для расчета энергетических спектров распыленных квазитепловых атомов и ионов. Результаты расчетов

по этим формулам чувствительны к экспериментальным параметрам, а именно: типу и энергии бомбардирующего многоатомного иона, типу материала мишени, типу распыляемой частицы, значению начальных температур в тепловом пике.

В настоящей работе, в рамках модели эмиссии квази-тепловых атомов и ионов, впервые получена аналитическая формула для расчета степени ионизации атомных частиц, распыленных из металлов в режиме нелинейных каскадов столкновений. Результаты расчетов анализируются для различных комбинаций «бомбардирующий ион-мишень».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения Государственного задания в части проведения научно-исследовательских работ (код проекта 3087).

1. Belykh S.F., Palitsin V.V., Adriaens A., Adams F. Effect of projectile parameters on charge state formation of sputtered atoms //Phys. Rev. B. 2002. V.66. No19. P.195309.
2. Sigmund P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets //Phys. Rev. 1969. V.184. No2. P.383-416.
3. Fahey A. J. Ion Sources Used for Secondary Ion Mass Spectrometry //Cluster Secondary Ion Mass Spectrometry: Principles and Applications. – 2013. – P. 57-75.
4. Gillen G., Bennett J. Cluster Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) for Semiconductor and Metals Depth-Profiling //Cluster Secondary Ion Mass Spectrometry: Principles and Applications. – 2013. – P. 247-268.
5. Погребняк А.Д., Лозован А.А., Кирик Г.В. и др. «Структура и свойства нанокompозитных, гибридных и полимерных покрытий». – М.:Книжный дом «ЛИБРИКОМ», 2011. – 344 с.
6. Belykh S.F., Tolstoguzov A.B., Lozovan A.A. et al. Model for the emission of quasi-thermal atoms during sputtering of metals in the nonlinear collision cascade regime //J. Exper. and Theor. Phys. 2014. V.118. No4. P.560-568.
7. Belykh S.F., Tolstoguzov A.B., Lozovan A.A. Ion-beam sputtering of metals in the non-linear collision cascade mode: analysis of conditions of the flow emitted particle formation //J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2014. V.6. (in press).

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ И ОБРАЗЦОВ

В.П. Бирюков, И.М. Петрова, И.В. Гадолина

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [Laser-52@yandex.ru](mailto:Laser-52@yandex.ru)

Целью работы было определение влияния состава порошкового материала и режима лазерной наплавки на сопротивление усталости образцов.

Лазерная наплавка применяется в случае, когда зона термического влияния должна быть минимальной. С помощью наплавки лазером в зависимости от эксплуатационных требований можно наносить на поверхность покрытия, в состав которых входят износостойкие, коррозионностойкие и другие компоненты, что позволяет удовлетворить возрастающим требованиям к высокой износостойкости и прочности в широком интервале условий эксплуатации, в том числе и динамическом нагружении.

Выполнения экспериментов с порошком на основе никеля производилось на технологическом комплексе HUFFMAN HC-205 оснащенном волоконным лазером ЛС-3,5 мощностью 3500 Вт, изготовленным в ООО НТО «ИРЭ-Полос» [3,6]. Для отработки технологического процесса лазерной наплавки использовали массовый поток порошка – 1,5-6 г/мин; давление аргона – 2 атм., поток аргона – 3 л/мин; порошок с размером частиц 40...160 мкм. Наплавку на образцы сталей 35 и 38ХНЗМА производили при мощности излучения 500...1000 Вт, скорости перемещения 5...25 мм/с. Микроструктура наплавленных покрытий исследовалась с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30 производства фирмы Carl Zeiss JENA с увеличением до 500 крат. Исследованная микроструктура представлена на рис.1. Глубина анализируемого слоя составляла ~1 мкм.

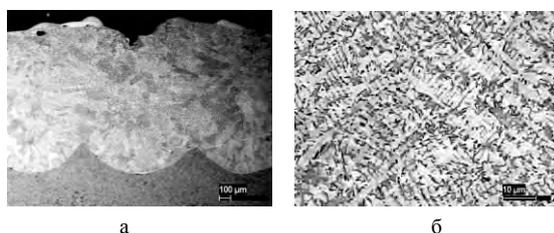


Рис. 1. Микршлиф дорожек на образце:  
а – общий вид наплавленных слоев; б – дендритная структура зоны наплавки

Микротвердость образцов измерялась по методу Виккерса. Микротвердость наплавленных слоев изменялась в пределах 4250...5200 МПа.

Проведенные испытания на машине трения МИ-1 наплавленных покрытий в паре трения с баббитом Б83 показали повышение износостойкости в 2...4 раза по сравнению со сталями 35 и 38ХНЗМА [1,2].

Для определения оптимальной технологии упрочнения поверхности с целью повышения эксплуатационных свойств покрытий по критерию усталости, были проведены сравнительные испытания на усталость. Испытания проводили при изгибе с вращением при симметричном цикле нагружения. База испытаний была принята равной  $2 \cdot 10^6$  циклов.

Исследовались образцы гладкие диаметром 7,5 мм, изготовленные из стали 38ХНЗМА. На рис. 2 представлены кривые усталости образцов.

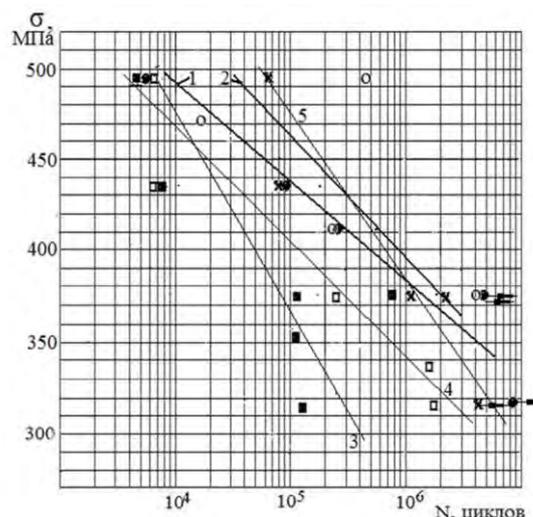


Рис.2 Кривые усталости образцов

1 – исходная кривая усталости; 2 – наплавка порошком П1; 3 – наплавка порошком П2; 4 – наплавка порошком П3; 5 – наплавка порошком П4.

Из рис. 2 следует, что варианты 4 и 5 технологии наплавки повышают характеристики сопротивления усталости, особенно при больших нагрузках.

В то же время в работе [3] установлено, что с увеличением размера образца негативное воздействие лазерной наплавки на характеристики сопротивления усталости уменьшается.

1. Бирюков В.П. повышение долговечности работы пар трения скольжения при лазерной наплавке порошковых материалов//Тяжелое машиностроение. – 2013. №9. – С 14-17.
2. Бирюков В.П., Лаптева В.Г., Хренникова И.А., Татаркин Д.Ю. Восстановление лазерной наплавкой работоспособности пары трения вал - вкладыш подшипника скольжения //Проблемы машиностроения и надежности машин 2013. - №5. - С.91- 95.
3. Архипов В.Е., Биргер Е.М., Поляков А.Н. Влияние лазерной наплавки на сопротивление усталости и износостойкость стали 45 // МитОМ 1988. №1, с. 55-58

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ «ОСНОВА - МАТЕРИАЛ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ», СФОРМИРОВАННОЙ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ж.М. Бледнова, П.О. Русинов, М.А. Степаненко

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия [blednova@mail.ru](mailto:blednova@mail.ru)

*Приведены функционально-механические свойства композиция «сталь – сплав с эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе TiNi, TiNiCu, NiAl», полученной в условиях аргонодуговой и лазерной наплавки, плазменного и высокоскоростного газопламенного напыления, с формированием структуры различной дисперсности от мелкокристаллической до наноразмерной и показана их многофункциональность. Показано, что наиболее универсальной характеристикой износоусталостных свойств является адаптивность, определяемая методом мультифрактального анализа структуры.*

*Ключевые слова: композиция «сталь – сплав с эффектом памяти формы», высокоэнергетические воздействия, трибологические свойства, усталость, адаптивность.*

### Цель

Исследование механических и трибологических свойств многофункциональной композиции «основа - материал с ЭПФ различного гранулометрического состава», сформированной в условиях высокоэнергетических воздействий.

### Материалы, технологии и методы исследования

Исследования проводились на сталях: сталь 45, 40X, 30XГСА, 12X18Н9Т. В качестве материала для поверхностного модифицирования использовали порошки никелида титана марки ПН55Т45, никелида алюминия марки ПН80Ю20 и трехкомпонентный порошок на основе TiNiCu. Для обеспечения лучшей адгезии поверхностного слоя и основы на сталь наносился подслой никеля (порошок ПНК1-ВЛ). Перед напылением порошок подвергался механической активации в шаровой мельница ГЕФЕСТ-2 (АГО-2У).

Для формирования поверхностных слоев из материалов с ЭПФ использовались различные технологии: Аргонодуговая и лазерная наплавка, плазменное (пат. № 2402628) и высокоскоростное газопламенное напыление (пат. № 2502829).

Структуру и фазовый состав поверхностного слоя исследовали методами рентгеноструктурного анализа (Shimadzu XRD – 7000 в Cu-K<sub>α</sub> излучении) и световой микроскопии (электронный микроскоп JSM-7500F и оптический микроскоп NU-2E).

Многоцикловые усталостные испытания при изгибе с вращением проводились на установке МУИ-6000. Малоцикловые испытания на воздухе и в условиях воздействия среды при чистом симметричном изгибе и испытания на фрикционно-механическую усталость производилось на четырехпозиционной машине (пат. № 2140066). Испытания на износ производились на машине трения СМТ-1 – 2070.

### Результаты и их обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования образцов с модифицированным поверхностным слоем, сформированным в условиях высокоэнерге-

тических воздействий для всех реализованных технологий (лазерная наплавка, обеспечивающая получение ультрамелкозернистой структуры, и плазменное напыление механоактивированного порошка, обеспечивающее получение наноструктуры) показали значительное повышение усталостной прочности и износоустойчивости:

- наибольший эффект повышения предела выносливости при изгибе с вращением достигнут для образцов из стали 45 с наноструктурированным поверхностным слоем, полученным плазменной наплавкой механоактивированного порошка и составляет 51%, при этом износоустойчивость повышается в 3-3,5 раза;

- после полного цикла обработки сталей с покрытием TiNi, полученным лазерной наплавкой, циклическая долговечность при малоцикловом нагружении возрастает в 1,9÷2,2 раза (сталь 38ХНЗМФА) и в 2÷2,5 раза (сталь 12X18Н9Т), а в условиях фрикционно-механической усталости – в 1,4÷1,6 раз, при этом износоустойчивость стали 12X18Н9Т с TiNi-слоем повышается в 3,6÷4 раза;

- повышение износоусталостных характеристик сталей с поверхностно модифицированным слоем из материалов с ЭПФ объясняется псевдоупругостью поверхностных слоев этих материалов в зоне трения и снижением концентрации напряжений за счет увеличения площадки контакта микронеровностей поверхности;

- определены фрактальные характеристики структуры поверхностно-модифицированных слоев из материалов с ЭПФ, позволяющие оценить на мезоуровне устойчивость структуры к внешним воздействиям, а также эффекты обработки на деградиационные процессы; показано, что наиболее универсальной характеристикой износоусталостных свойств является адаптивность - мера динамической устойчивости структуры.

*Работа выполнена в рамках государственного задания (проект 2416-2014) при поддержке Минобрнауки и гранта Президента РФ № МК-5017.2014.8.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ОРГСТЕКЛЕ АКУСТО-ЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ, ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАТЕРИАЛ НИЗКИМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ

А.М. Большаков, Я.М. Андреев

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия; [ya-kovmich@rambler.ru](mailto:ya-kovmich@rambler.ru)

**Аннотация:** Рассмотрен метод акусто-эмиссионного контроля конструкций на основе локального термического нагружения. Акустическое исследование зарождения трещины в полиметилметакрилате (ПММА) в условиях низких температур, показало температурную зависимость основных параметров акустических сигналов генерируемых искусственной трещиной. По результатам исследования, открывается возможность модернизации метода акустического неразрушающего контроля без нагружения всего контролируемого объекта.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, неразрушающий контроль, температурная деформация.

Опасные производственные объекты как действующие трубопроводы и резервуары хранения нефтепродуктов, должны проходить техническое диагностирование с применением стандартных методов неразрушающего контроля, таких как: визуальный контроль (НК), ультразвуковая толщинометрия, рентгенографические, капиллярные методы контроля и твердометрия. Недостатком традиционных методов контроля является невозможность определения за короткое время реальный прогноз развития дефекта и реальную степень опасности дефекта [2, 3].

Одним из методов НК, которая предоставляет выявлять степень опасности дефекта является акусто-эмиссионный (АЭ) контроль. Но для реализации контроля на указанных объектах приходится искусственно изменять напряженно деформированное состояние (НДС) контролируемого объекта путем изменения рабочего давления или высоты уровня налива. В данной статье рассматривается модернизация метода АЭ контроля, путем локального изменения НДС на объекте с помощью изменения температуры в отрицательную сторону вероятного опасного участка. Для реализации этого «способа» был произведен эксперимент на примере оргстекла с размерами 805x515x5 мм с зарождающимся дефектом в виде трещины длиной 20 мм и расположенного посередине образца.

Регистрация акустических параметров производилась на АЭ-диагностическом комплексе "Эксперт-2014" с настройками по ПБ 03-593-03 [6]. При начальной температуре образца с дефектом +10°C, установлены преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) образующие одну антенну. Для изменения НДС образца исследуемый образец с установленными ПАЭ был перемещен на площадку для натурных испытаний, где температура окружающей среды составляла -47°C. После неподвижной фиксации образца начата регистрация акустических сигналов в течении 26 мин, т.е. до перехода температуры образца в константу. Обработка полученных данных показала, что развитие (зарождение) искусственной трещины при изменении температуры

возникла в первые 5 минут, что подтверждается логированными событиями «рис. 1, 2».

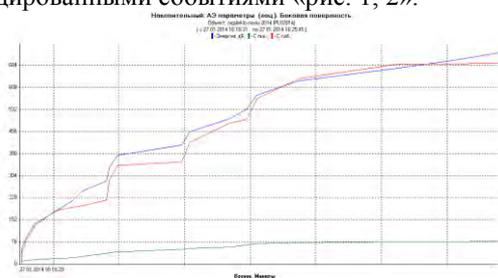


Рис. 1. Накопительный график по времени Энергии событий, Количества пиков событий и Длительности событий

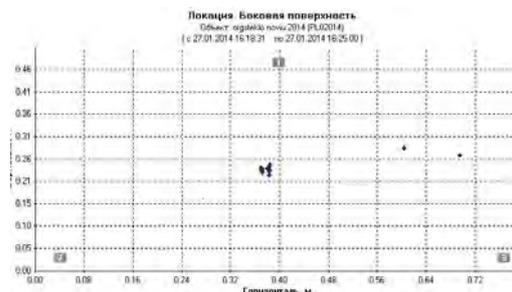


Рис. 2. Лоцированные события после 5 мин после начала эксперимента

На образце получены картины локализации АЭ, на которых можно выделить интервалы времени, соответствующие стадиям развития трещины.

Исследование зарождения трещины в оргстекле в условиях низких температур показало на температурную зависимость основных параметров акустических сигналов генерируемых искусственной трещиной.

1. И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. М Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практическое пособие. М.: Высшая школа. 1991. 283 с.;

2. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: НТЦ Промышленная безопасность. 2006. 111 с.;

3. ПБ-03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. СПб.: Издательство ДЕАН, 2004. 64с.

## НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

А.М. Большаков, А.В. Бурнашев

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Россия

**Аннотация:** Приведены результаты испытаний сосудов давления на разрушение внутренним давлением при низких температурах под воздействием внешнего электрического поля. Сравняется характер разрушения сосудов под влиянием электрического поля и без него на испытываемые сосуды.

**Ключевые слова:** хладостойкость, пластичность, электропластичность, электрический потенциал, низкие температуры

Проблема обеспечения надежной эксплуатации металлоконструкций эксплуатирующихся в регионах с низкими климатическими температурами затрагивается в работах многих ученых ведущих институтов нашей страны, благодаря которым создаются новые материалы и методы повышения прочности, ресурса конструкций. В настоящее время существует много различных конструкционных сталей предназначенных для эксплуатации в условиях низких температурах, но также и есть конструкции, выполненные из обычных углеродистых сталей, которые представляют реальную угрозу разрушения при температурах эксплуатации ниже температуры установленного вязкохрупкого перехода и запрещены к эксплуатации ниже минус 40 °С. Не секрет, что многие организации эксплуатирующие конструкции (в основном резервуары для хранения нефтепродуктов, технологические трубопроводы и т.д) из марок сталей 3, 10, 45 и т.п. вынуждены останавливать эксплуатацию, а в ряде случаев на свой страх и риск эксплуатировать жизненно важные объекты.

Перед научными исследователями возникает острая проблема повышения хладостойкости таких конструкций. Основная задача наших исследований заключается в поиске и разработке технологических механизмов и методов повышения прочности и хладостойкости материалов металлоконструкций, путем воздействия на материал конструкций различными электромагнитными, импульсными и другими методами позволяющими влиять на пластические свойства, на основе анализа деградации пластических свойств материалов металлоконструкций Севера.

Во многих работах, начиная с 1970-х годов, показано положительное влияние тока на пластические свойства металлов. Внешние энергетические воздействия на металлические твердые тела, подвергаемые деформации, способны существенно изменять как кинетику протекания процесса, так интегральные прочностные и пластические характеристики металла. Обработка образцов электрическим и магнитным полями, короткими высокоамплитудными импульсами электрического тока металлов и сплавов, оказывает влияние на деформационную субструктуру, может изменять распределение внутренних напряжений, фазовый состав,

зеренную структуру, и в конечном итоге, существенно снижать сопротивление деформированию. Особый интерес проявляют к себе слабые электрические воздействия, когда энерговыделение ничтожно, а деформационные свойства материалов заметно меняются, что многократно подтверждено различными экспериментами.

Возникает вопрос, если воздействие электромагнитного поля повышает пластические свойства, то должно и отодвигать процесс хрупкого разрушения металла на более поздние стадии деформации, способствуя тем самым к сдвигу границы хладоломкости в сторону более низких температур. Это открыло бы новый путь в увеличении прочности металла и повышении надежности эксплуатации металлоконструкций в условиях низких температур.

С этой целью, мы экспериментально исследовали влияния слабых электрических полей на изменение прочностных и пластических характеристик сосудов давления изготовленных из углеродистой стали, подвергаемых к деформации в условиях низких климатических температур.

1. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
2. Большаков А.М., Бурнашев А.В. Влияние внешнего электрического поля на пластичность углеродистых сталей в условиях низких климатических температур // Деформация и разрушение материалов. – 2013. -№7. – С.63-68.
3. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Филиппов Р.А., Котова Н.В. О вариациях механических характеристик металлов при действии электрического потенциала // Металлы. 2010. № 4. С. 39–45.
4. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений // М.: Мир, 1990. том 2. – 1016 с.
5. Баранов Ю.В. Эффект А.Ф. Иоффе на металлах. М.: МГИУ, 2005. 140 с.
6. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
7. В.В. Столяров Деформационное поведение титановых сплавов при растяжении с пропуском импульсного тока // Физика высоких давлений. 2010. Том 20. №4. С. 126-133.

## ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ ПРОЦЕССА АНАЛИЗА РИСКА, КАК ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Большаков А.М., Захарова М. И.

ФГБУН Институт физико-технических проблем Севера им. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

**Аннотация.** В работе приводятся основные моменты процесса анализа риска, как элемента системы управления промышленной безопасностью.

**Ключевые слова:** анализ риска, опасность

Как показывает практика эксплуатации технических систем жизнеобеспечения в экстремальных условиях, интенсивность аварий в последние годы повышается. Для объективного решения проблемы уменьшения тяжести последствий аварий, необходимо заранее оценивать опасность количественно. Анализ риска представляет собой один из существенных компонентов обеспечения безопасности и проводится для выявления отдельных источников опасности и оценки их потенциального влияния на возможные ущербы, которые могут быть причинены населению, окружающей среде и хозяйственным объектам.

Анализ риска представляет собой один из существенных компонентов обеспечения безопасности и проводится для выявления отдельных источников опасности и оценки их потенциального влияния на возможные ущербы, которые могут быть причинены населению, окружающей среде и хозяйственным объектам.

Основной элемент анализа риска – идентификация опасности (обнаружение возможных нарушений), которые могут привести к негативным последствиям [1, 2].

Многочисленные наблюдения за отказами, авариями техники и сооружений на Севере, констатируют факт внезапного и хрупкого разрушения с основным механизмом разрушения - отрывом, как наиболее опасного и ущербного.

Хрупкое разрушение элементов конструкций, работающих в условиях Севера, обусловлено, прежде всего, воздействием низких климатических температур, а также, рядом факторов, таких как конструктивные, технологические и другие.

Для определения хрупкого или спонтанного распространения трещины, в работах Махутова Н.А., Лыглаева А.В., Большакова А.М. [3] предложена схема оценки второй критической температуры вязко-хрупкого перехода для тонкостенных металлоконструкций

Для количественной оценки последствий аварий требуется создавать математическую модель,

позволяющую осмыслить поведение технической системы и с ее помощью оценить различные стратегии риска. Модель должна отражать важнейшие черты явления, т.е. в ней должны быть учтены все существенные факторы, от которых в наибольшей степени зависит функционирование системы. Выходными параметрами функционирования математической модели риска аварии определяется математическое ожидание пораженных жителей, постоянно проживающих в районе, подвергаемом опасности при функционировании объекта [4].

Анализ риска является, по существу, ключевым элементом системы управления промышленной безопасностью. Это последняя оставшаяся инженерная мера, с помощью которой можно усовершенствовать указанную систему и добиться снижения аварийности и травматизма. После того, как и эти возможности будут использованы, останутся только меры, связанные с пересмотром самого отношения персонала к безопасности, работе и жизни вообще, тем, что определяется понятием «культура безопасности».

### Литература

1. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. Техногенный риск: анализ и оценка М.: Академкнига, 2004. 157 с.
2. Меньшиков В.В., Швыряев А.А. Опасные химические объекты и техногенный риск: Учебное пособие. – М.: Химия, факультет Московского университета, 2003. – 254 с.
3. Махутов, Н. А. Метод оценки хладостойкости тонкостенных металлоконструкций / Н. А. Махутов, А. В. Лыглаев, А. М. Большаков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2011. - Т. 77, N 1. - С. 49-53.
4. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А., Томаков В.И., Фалеев М.И. Надежность технических систем и техногенный риск. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002 – 368 с.

## СПОСОБ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗОПРОВОДОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР

А.М. Большаков, А.Р. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П.Ларионова СО РАН, Якутск, Россия;  
[spartak01@mail.ru](mailto:spartak01@mail.ru)

**Аннотация.** Представлен способ прогнозирования остаточного ресурса резервуаров и магистральных газопроводов, работающих в условиях низких климатических температур на основе разработанной методики оценки предельного состояния конструкционных материалов. Данный способ оценки остаточного ресурса не требует использования методов разрушающего контроля и сложной аппаратуры. Показано сравнение данного способа с существующими способами.

Магистральные газопроводы и резервуары для хранения нефтепродуктов Республики Саха (Якутия) функционируют в зоне распространения вечномёрзлых грунтов на протяжении более 40 лет. Стабильная эксплуатация газопроводных систем обеспечивает основным топливом центральную часть Республики Саха (Якутия) и ее столицу город Якутск. Однако общее техническое состояние газопроводов и резервуаров с каждым годом ухудшается, их эксплуатационный ресурс практически исчерпан.

В основном при оценке остаточного ресурса исходят от изменения скорости деградационных процессов. К числу таких процессов для газопроводов и резервуаров относятся:

- изменение пластичности металла, определяемой по изменению предела текучести, твердости, ударной вязкости;
- уменьшение толщины стенки при воздействии на металл фронтальной (общей) коррозии;
- изменение НДС при воздействии на металл локальной (язвенной, межкристаллитной) коррозии;
- старение изоляционного материала.

В настоящее время рядом нормативных документов рекомендуется оценка остаточного ресурса упрощенными методами по отдельным деградационным процессам.

В данное время существуют следующие виды расчетов остаточного ресурса металлоконструкций: по коррозионному утонению стенки металла трубы или резервуара; при действии изменяющихся напряжений при изгибе трубопровода в результате необратимых процессов просадки трубопровода производится по экспериментальным данным просадки и расчета  $\sigma_{ЭКВ}$ ; по изменению механических характеристик металла; по изменению ударной вязкости металла трубы; по оценке напряженно-деформированного состояния при наличии фронтальной коррозии металла трубы; по оценке локального напряженно-деформированного состояния в местах коррозионных язв (питтингов) металла трубы;

Одним из недостатков существующих способов расчета остаточного ресурса, является необходимость применения разрушающих методов и вырезки

образцов для механических испытаний, и невозможность оперативной диагностики текущего состояния материала в полевых условиях.

На основе проведенных экспериментальных исследований и разработанной методики оценки предельного состояния [1, 2], предложен способ прогнозирования остаточного ресурса [3] для конструкций типа магистральных газопроводов и резервуаров, по следующей схеме (рис. 1)

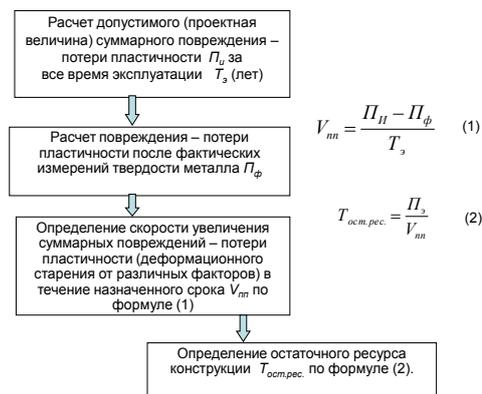


Рис. 1. Схема расчета остаточного ресурса металлоконструкции

1. Лыглаев А.В., Большаков А.М., Иванов А.Р. Оценка предельного состояния металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / Заводская лаборатория – апрель №7-2009, С.44-47.
2. Иванов А.Р., Большаков А.М. Способ оценки потери пластичности по изменению микротвердости конструкционной стали / Патент на изобретение № 2382351 от 22.02.2010г.
3. Иванов А.Р. Разработка методики оценки остаточного ресурса трубопроводов и резервуаров, работающих в условиях Крайнего Севера. Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Новосибирск. –2011. –18 с.
4. Ivanov A.R., Bolshakov A.M. and Lyglayev A.V. [Estimation of ultimate state of metal structures exploited in the environment of the extreme north](#) / Inorganic materials – Volume 46, №14-2010, 1564-1566, DOI: 10.1134/S0020168510140177.

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЛИТЬЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СПЛАВОВ

М.С. Варфоломеев<sup>1</sup>, В.С. Моисеев<sup>1</sup>, Г.И. Щербакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, Москва, Россия; [varfolom2a@rambler.ru](mailto:varfolom2a@rambler.ru)

<sup>2</sup>ГНЦ РФ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений», Москва, Россия

*В настоящей работе исследованы механические свойства и разработана технология изготовления высокоогнеупорных (до 2000 °С) керамических корундовых форм по выплавляемым моделям на бескремнеземном связующем. Эта технология наиболее перспективна в процессе изготовления керамических форм для точного сложнопрофильного литья по выплавляемым моделям из высоколегированных сталей, тугоплавких металлов, жаропрочных и титановых сплавов.*

*Ключевые слова:* литье по выплавляемым моделям, корундовая керамическая форма, алюмоиттриевое связующее

Учитывая тенденции современного производства к повышению качества, точности и эксплуатационной надежности литых изделий, особенно деталей ответственного назначения, увеличивается доля сложных фасонных отливок из титановых и жаропрочных сплавов, получаемых методом литья в керамические формы по выплавляемым моделям.

Однако получение таких литых деталей сопряжено с определенными технологическими трудностями, в частности, в расплавленном состоянии титан является химически весьма активным элементом и его сплавы активно взаимодействуют с большинством огнеупорных материалов керамических форм с образованием трудноудаляемого поверхностного альфирированного слоя с повышенной твердостью.

Применяемые в литейном производстве огнеупорные формовочные материалы активно взаимодействуют с титаном и его сплавами. Химически наименее прочным огнеупором для титана и его сплавов является диоксид кремния, а наиболее прочным – диоксид иттрия [1].

Применяемые в настоящее время в технологии литья по выплавляемым моделям керамические корундовые формы, содержащие SiO<sub>2</sub> (свыше 3 мас. %), обладают рядом существенных недостатков связанных с тем, что при их изготовлении используют связующие этилсиликат, коллоидальный кремнезем, жидкое стекло. Это единственные промышленно выпускаемые и широко применяемые связующие материалы в отечественном литейном производстве.

В ГНЦ ГНИИХТЭОС осуществлен синтез растворимых в органических растворителях иттрийсодержащих органоалюмоксанов [2-4]. Они представляют собой прозрачные спиртовые жидкости, которые отверждаются на воздухе в течение 1-2 часов при комнатной температуре. Растворы иттрийсодержащих органоалюмоксанов были использованы в качестве связующих материалов для изготовления образцов керамических форм.

Керамическую суспензию изготавливали по традиционной технологии литья по выплавляемым моделям на основе алюмоиттриевого связующего и мелкодисперсного электрокорунда. Керамические образцы формировали на восковой восьмигнездной

модельной пластине с размерами получаемого образца 50x20x5 мм. путем окунания ее в суспензию с последующей обсыпкой зернистым электрокорундом и сушкой каждого слоя во влажной камере. На восковую модель наносили от 5 до 7 слоев суспензии. После нанесения керамических слоев, восковой состав выплавляли в горячей воде, а полученные образцы керамических пластин обжигали при различных температурах (900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1500) и испытывали на прочность на статический изгиб с помощью машины Instron 5982 (рис. 1).

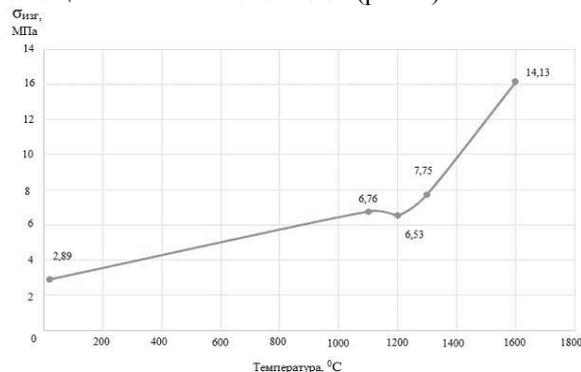


Рис. 1. Прочность керамических образцов на изгиб  
Установлено, что с повышением температуры прочность образцов значительно увеличивается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения базовой части Государственного задания (код проекта 3087).

1. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Под ред. Глазунова С.Г., Неуструева А.А. М.: Metallurgia, 1998, 292 с.
2. Пат. РФ №2453550. Способ получения иттрийсодержащих органоалюмоксаносилоксанов, связующие и пропиточные композиции на их основе.
3. Пат. РФ 2451687 27.05.2012 Бюл. № 15. Способ получения иттрийсодержащих органоалюмоксанов / Г.И. Щербакова, П.А. Стороженко, Н.Б. Кутинова, М.С. Варфоломеев, Д.В. Сидоров, Н.С. Кривцова.
4. Shcherbakova G.I., Storozhenko P.A., Kutinova N.B., Krivtsova N.S., Varfolomeev M.S. Synthesis of organoaluminumoxanesiloxanes and preparation of glass and glass-ceramics on their base // Inorganic Materials. 2014. 50 (3) P. 306 – 313.

## ЖИВУЧЕСТЬ ТРУБЫ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА НЕФТЕПРОВОДА С ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОЙ С УЧЁТОМ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.М. Веселуха<sup>1</sup>, А.В. Богданович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь,

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь, ; [bogal@tut.by](mailto:bogal@tut.by)

**Аннотация:** Приводятся результаты испытаний на циклическую трещиностойкость образцов из трубной стали на основе нового инженерного подхода. Выполнена оценка живучести труб линейной части нефтепровода при наличии опасной продольной полуэллиптической трещины при заданном уровне нерегулярного эксплуатационного нагружения и с учетом длительного (более 30 лет) воздействия повреждающих факторов.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, живучесть, пластичная сталь, нефтепровод, длительная эксплуатация, коэффициент интенсивности напряжений, утяжка.

Испытания на циклическую трещиностойкость компактных образцов вырезанных из трубы линейных участков нефтепровода вели на универсальной сервогидравлической машине Ви-01-102 при внецентренном растяжении в условиях комнатной температуры, с частотой 20 Гц и коэффициентом асимметрии цикла  $R=0,1$  [1].

По результатам испытаний компактного образца получены значения необходимых для расчета живучести труб характеристик циклической трещиностойкости трубной стали (табл. 1).

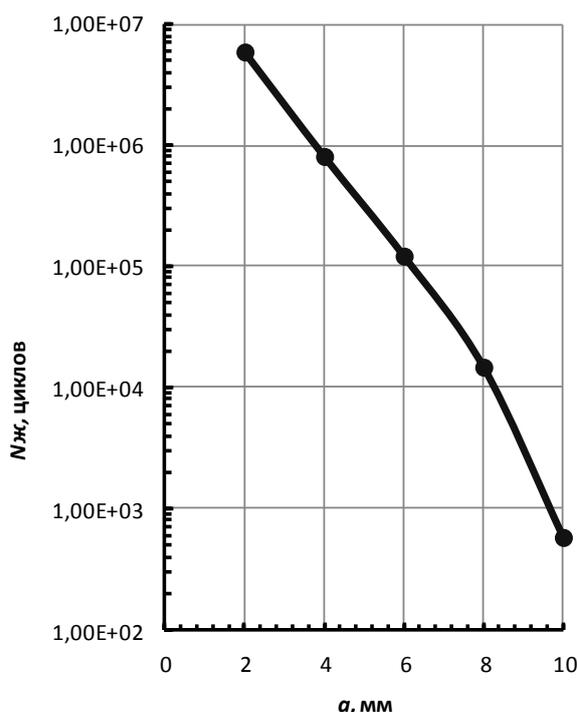
**Таблица 1.** Характеристики сопротивления развитию трещин образцов труб линейной части нефтепровода участка «НПС Мозырь» [2]

Характеристика	Численное значение
Критическая скорость роста трещины $v_c$ , мм/цикл	$2,39 \cdot 10^{-8}$
Пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) $K_{th}$ , МПа $\sqrt{м}$	4,91
Предельное значение КИН (циклическая вязкость разрушения) $K_{fc}^F$ , МПа $\sqrt{м}$	54,75
$C_k$ , мм/(цикл(МПа $\sqrt{м}$ ) <sup><math>m_k</math></sup> )	$4 \cdot 10^{-10}$
$m_k$	1,555

Анализ живучести трубы при заданном уровне нерегулярного эксплуатационного нагружения и с учетом длительного (более 30 лет) воздействия повреждающих факторов выполнен на рис. 1 в зависимости от размера  $a$  начальной продольной полуэллиптической трещины на основе разработанной методики [2, 3] по формуле:

$$N_{ж\sum} = \frac{N_6}{C_k (m_k + 1) \sum_{i=1}^s \frac{\Delta K_i^{m_k} n_{i6}}{(1 - \omega_F)^{m_k + 1}}},$$

где  $\Delta K_i$  есть разность максимального  $K_{I\max}$  и порогового  $K_{th}$  КИН, т. е.  $\Delta K_i = K_{I\max} - K_{th}$ ;  $C_k$  и  $m_k$  – параметры (постоянные материала), определяемые по кинетической диаграмме усталостного разрушения в координатах скорость роста трещины  $v = d(1 - \omega_F) / dn$  – КИН  $K_{I\max}$ ;  $i$  – номер ступени блока;  $s$  – количество ступеней в одном блоке;  $n_{i6}$  – число циклов  $i$ -того уровня нагрузки в одном блоке. При этом КИН вычисляли по формулам линейной механики разрушения, но с учетом поправки на пластичности для трубной стали [2,



**Рис. 1.** График зависимости живучести  $N_{ж}$  элементов труб из основного металла от длины  $a$  полуоси поверхностной полуэллиптической трещины в осевом направлении

Предложенную методику можно использовать для расчета живучести труб линейных участков нефтепроводов и при иных опасных трещиноподобных дефектах, принимая во внимание соответствующие формулы для оценки величины КИН.

1. A.V. Bogdanovich and V.M. Veselukha. Cyclic crack resistance of the steel of oil mains after long periods of operation //Materials Science Volume 47, Number 1, 70-75, DOI: 10.1007/s11003-011-9369-6.
2. Сосновский Л.А., Богданович А.В., Бордовский А.М. Живучесть линейной части нефтепровода. – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2004. 112 с.
3. Богданович, А.В. Об оценке ресурса труб нефтегазопроводов на основе деформационного критерия трещиностойкости / А.В. Богданович, В.М. Веселуха, А.Н. Козик, В.В. Воробьёв // Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов. Выпуск 2, Минск, 2013 г. / редкол.: А.А. Дюжев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. С. 243-246.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СТЕРЖНЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ СПЛАВА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

С.С. Гаврюшин, С.М. Ганыш

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)

Предлагается математическая модель для расчета стержневых конструкций из сплава с эффектом памяти формы. Модель позволяет рассматривать задачи при больших перемещениях. Задача сводится к решению краевой задачи для системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение стержня из сплава с эффектом памяти формы. Ключевые слова: сплав с эффектом памяти формы, пространственный стержень, конечный элемент.

Расчеты большинства применяемых в современных конструкциях упругих элементов из сплавов с эффектом памяти формы, так или иначе, могут быть сведены к расчету стержневых моделей. Целью исследования является разработка математической модели стержней из сплава с эффектом памяти формы, а также разработка методов внедрения математической модели в современные вычислительные системы.

Для построения модели стержня из сплава с эффектом памяти формы необходимо выбрать модель материала, выбрать модель стержня, а также разработать методику интегрирования уравнений, описывающих модель материала в модель, описывающую поведение пространственного стержня. Математическая модель сплава с эффектом памяти формы строится на основе уравнений Ауриччио, представленных в работе [1]. Система уравнений в операторной форме имеет вид:

$$\dot{\xi}_S, \dot{\xi}_M^T = F \xi_S, \xi_M, \sigma, \dot{\sigma}, \tau, \dot{\tau}, T, \dot{T}, H_i, D_{const} \quad (1)$$

Где  $\sigma$  – нормальные напряжения,  $\tau$  – касательные напряжения,  $T$  – температура,  $\xi_S$  – объемная доля ориентированного мартенсита,  $\xi_M$  – объемная доля неориентированного мартенсита,  $H_i$  – функции-переключатели, отвечающие за активацию процессов фазовых переходов,  $D_{const}$  – постоянные параметры диаграммы фазовых переходов сплава с эффектом памяти формы.

С помощью соотношений (1) определяется величина  $\xi_S$ . В предположении об аддитивном разложении деформации на упругую и не упругую, физические соотношения принимают вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{полн} &= \varepsilon_{упр} + \varepsilon_L \cdot \xi_S \\ \gamma_{полн} &= \gamma_{упр} + \gamma_L \cdot \xi_S \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_L, \gamma_L$  – соответственно максимальные линейная и угловая деформации, возникающие в результате ориентации мартенсита в соответствующем направлении.

В качестве уравнений, описывающих поведение пространственного стержня, взята система дифференциальных уравнений, представленная в работе [2]. В операторной форме система имеет вид:

$$\begin{aligned} X, \vartheta, M, Q^T \\ = F X, \vartheta, M, Q, \kappa_i, \kappa_i^0, \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения дополняются алгебраическими уравнениями для кривизн и деформации осевой линии стержня.

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \alpha \cdot \Delta t + B_0^{-1} \cdot (N + N^{sma}) \\ \kappa_1 &= B_1^{-1} \cdot M_Z + M_{кр}^{sma} + (1 - \varepsilon) \cdot \kappa_1^0 \\ \kappa_2 &= B_2^{-1} \cdot M_X + M_{изг}^{sma} \cdot \sin \omega + (1 - \varepsilon) \cdot \kappa_2^0 \\ \kappa_3 &= B_3^{-1} \cdot M_Y + M_{изг}^{sma} \cdot \cos \omega + (1 - \varepsilon) \cdot \kappa_3^0 \end{aligned} \quad (4)$$

В выражении (4) присутствуют дополнительные внутренние силовые факторы, которые являются результатами действия эффекта памяти формы по сечению. Для случая круглого поперечного сечения стержня были получены следующие выражения дополнительных внутренних силовых факторов.

$$\begin{aligned} M_{кр}^{sma} &= 2\pi \cdot G + \gamma_L \cdot \int_0^R \xi_s(r) \cdot r^2 dr \\ M_{изг}^{sma} &= E \cdot \varepsilon_L \cdot \int_A \xi_s(y) \cdot y dA \\ N^{sma} &= E \cdot \varepsilon_L \cdot \int_A \xi_s(y) dA \end{aligned} \quad (5)$$

Для интегрирования разработанной математической модели в современные расчетные системы применяется метод конечных элементов. Например, матрица жесткости одномерного элемента растяжения-сжатия из сплава с эффектом памяти формы имеет вид:

$$K = K_{SMA} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Где  $K_{SMA}$  – жесткость элемента, вычисляемая на каждом шаге нагружения с помощью соотношений (1)-(5). Аналогичным образом строятся матрицы жесткости других стержневых элементов.

1. F. Auricchio. Shape Memory Alloys: applications, micromechanics, macromodelling and numerical simulations. Berkeley, California, 1995, 163 с.
2. Гаврюшин С.С. Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования / Гаврюшин С. С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2011. - № 12. - С. 12-19.

## УСКОРЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧИСЕЛ ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ

И.В.Гадолина<sup>1</sup>, Р.И.Зайнетдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; gadolina@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет путей сообщения, Москва, Россия.

Описываются особенности ускорения усталостных испытаний в зависимости от выбранного диапазона числа циклов. Для ускорения усталостных испытаний в малоциклового области предлагается использовать вейвлетный анализ случайного процесса нагружения.

Ключевые слова: ускорение испытаний, метод «гоночной полосы», вейвлет-анализ, усталость.

Диапазон чисел циклов нагружения при испытаниях на усталость условно можно разделить на три области: малоцикловую ( $N < 5 \cdot 10^4$ ), многоцикловую ( $5 \cdot 10^4 < N < 5 \cdot 10^7$ ) и гигацикловую ( $N > 5 \cdot 10^7$ ). В каждой области существуют свои особенности и подходы к решению задачи ускорения испытаний.

В гигацикловой области в последние годы отчетливо наметилась тенденция проведения испытаний при ультразвуковых частотах 20...30 КГц [1]. Аппаратура для проведения испытаний при ультразвуковых частотах позволяет использовать лишь постоянную амплитуду нагружения, поэтому представляется необходимым выбирать наиболее информативную амплитуду и испытывать при ней с последующим пересчетом по гипотезам накопления усталостных повреждений.

В области многоциклового усталости весьма большое значение обычно имеет стадия распространения трещины [2]. На этой стадии важна последовательность нагрузок, поэтому целесообразно применять метод фильтрации «гоночной полосы» (gasetrack) [3], при котором циклы с относительно малой амплитудой отбрасываются, а последовательность экстремумов, образующих большие циклы сохраняется. При этом достигается ускорение испытаний за счет того, что сжатая реализация сокращается до нескольких пиков (до 10% от исходного числа), которые образуют циклы, ответственные за 90% повреждения. На рис. 1, b ширина  $s$  «гоночной полосы» определяет степень фильтрации, в точках  $g$  на реализации гонщик изменяет направление движения. Эти точки остаются в отфильтрованной реализации (помечены кружочками на рис. 1, c).

В области малоцикловых испытаний не всегда целесообразно ускорение испытаний, за исключением тех случаев, когда частоты крайне малы. Последовательность пиков нагружения, частота, а в ряде случаев и форма циклов имеют значение. Метод gasetrack удаляет мелкие циклы, но для ускорения испытаний необходимо дальнейшее сжатие случайного процесса нагружения. В условиях нестационарных процессов эксплуатационного нагружения целесообразным представляется выбор вейвлетного анализа [4] в качестве инструмента для выделения и сжатия повреждающей части процесса нагружения.

Исследование проводилось на основе пакетов Wavelab, Matlab и набора инструментов Wavelet

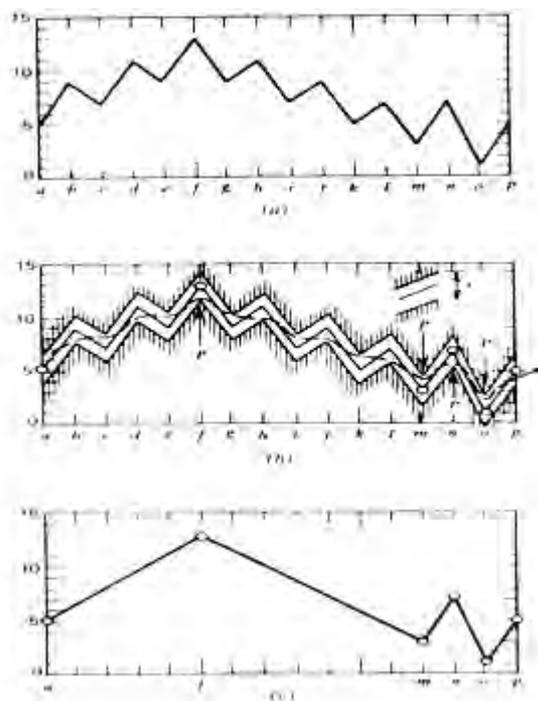


Рис.1 Алгоритм метода «гоночной полосы»

Toolbox с использованием вейвлетов Добечи (DB30), Морле и «мексиканская шляпа» (Mexh). Показана возможность выделения эффективной части процесса нагружения «stress (strain) – time», оказывающей значительное повреждающее действие на материал с учетом истории нагружения. Сопоставление Фурье- и вейвлет-преобразования свидетельствует о преимуществах последнего, а сопоставление результатов, полученных на основе вейвлетов разных семейств, показало преимущества вейвлета Mexh.

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. New York: CRC Press, 2004. – 328 p.
2. Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue / ASTM STP 1546. Fatigue and Fracture Mechanics: 38<sup>th</sup> volume, ASTM, W. Conshohoken, 2012. – Pp. 20-64.
3. Conle A, Topper T.H. Evaluation of small cycle omission criteria for shortening of fatigue service histories// International Journal of Fatigue. 1979 1(1). – Pp. 23-28
4. Зайнетдинов Р.И. Вейвлетный анализ и его применение в инженерном деле (на примере сварных конструкций). Учебное пособие. М.: МИИТ, 2001. – 56 с.

## ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В.Гриб

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены методологические вопросы и примеры решения задач диагностического моделирования технического состояния механических систем.

**Ключевые слова:** диагностика, механическая система, моделирование

Под диагностическим моделированием понимается разработка и исследование диагностической модели механической системы, т.е. формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования, с целью оценки ее технического состояния и изменения его во времени [1].

Необходимость диагностического моделирования обусловлена решением следующих задач: исследования многопараметрического состояния сложных механических систем с целью определения работоспособности на текущий момент времени; исследования механической системы, когда невозможно или затруднительно применение средств непосредственного контроля параметров технического состояния; оценки значимости различных процессов в общем изменении технического состояния системы; исследования влияния различных факторов внешнего воздействия на систему; прогнозирования возможности аварийных ситуаций, риска эксплуатации с заданными вероятностными показателями; в сочетании с экспериментальными методами контроля технического состояния в будущем времени эксплуатации, прогнозирования ресурса механической системы; расшифровывания сигналов косвенных методов оценки состояния (вибрации, шума и др.).

Методология исследования технического состояния включает себя две группы задач: моделирование процессов, протекающих в системе, и сигналов, поступающих от измерительных приборов. Первые основываются на современных достижениях науки и практики в области механики (теории механизмов и машин,

динамики, прочности, надежности) и физико-химии деградиционных процессов (старения, коррозии, изнашивания). Вторые – на достижениях в области исследования сигналов контрольно-измерительных систем.

Математически описание многопараметрического состояния системы может быть представлено обобщенным вектором, представляющим собой упорядоченную совокупность множества параметров, описывающих техническое состояние системы в рамках принимаемой модели, и изменяющихся в процессе эксплуатации.

Изменение технического состояния во времени эксплуатации описывается вектор-функцией, т.е. движением вектора технического состояния в фазовом пространстве состояний. Это пространство разделено поверхностью отказов механической системы, отделяющих часть работоспособных состояний от неработоспособных. Вероятность безотказной работы объекта соответствует вероятности нахождения вектора состояния в области работоспособных состояний.

Общий прием решения задачи изменения технического состояния механической системы заключается в дискретизации ее во времени и пространстве и рассмотрении ряда последовательных состояний через задаваемый достаточно малый промежуток времени - шаг наработки.

В докладе приводятся решения задач диагностического моделирования различных механических систем.

1. Гриб В.В. Диагностическое моделирование механических систем. – СПб. Экспертные решения, 2014 – 448 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВАРИАЦИОННОЙ ПОСТАНОВКЕ

Е.Л. Гусев

Институт проблем нефти и газа Сибирского Отделения РАН, Якутск, Россия; [elgusev@mail.ru](mailto:elgusev@mail.ru)

**Аннотация.** Исследована проблема разработки физической и геометрической структуры многослойных трубопроводных конструкций, обеспечивающей наиболее эффективный режим транспорта. Методами математического и компьютерного моделирования проведено исследование прямых и обратных задач функционирования систем трубопроводного транспорта при воздействии экстремальных факторов внешней среды.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт, вариационная постановка, композиционные материалы, многослойные композиционные покрытия, критерии оптимальности, оптимальное проектирование, многокритериальные постановки.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования трубопроводных систем является применение при их проектировании и эксплуатации полимерных и композиционных материалов. В последние десятилетия, в связи с разработкой новых композиционных материалов с широким разнообразием физико-механических и химических свойств возникает проблема разработки физической и геометрической структуры многослойной трубопроводной системы, обеспечивающей наиболее эффективный режим транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды [1- 6]. Конструкция стенок трубопроводов проектируется согласно полю действующих нагрузок и, как правило, является многослойной. При этом показано, что физическая и геометрическая структура слоисто-неоднородной трубопроводной системы оказывает существенное влияние на режимы транспортировки. Направленный выбор физической и геометрической структуры покрытий из композиционных материалов позволяет достичь существенного синергетического эффекта в улучшении свойств слоисто-неоднородных покрытий по сравнению с однослойными. Увеличение числа слоев покрытия может позволить существенно улучшить его физико-механические свойства, а также разрабатывать композиционные покрытия, в которых отсутствуют характерные недостатки покрытий, имеющих меньшее число слоев.

В соответствии с этим, возникает важная проблема направленного выбора физической и геометрической структуры как самой трубопроводной системы, так и физической и геометрической структуры внешних и внутренних композиционных покрытий, обеспечивающей наиболее эффективный режим функционирования трубопроводных систем в условиях неблагоприятных сочетаний экстремальных факторов внешней среды [3-6].

На основе математического и компьютерного моделирования проведено исследование функционирования многослойных трубопроводных систем при воздействии экстремальных факторов внешней среды. Проведено исследование влияния зависимо-

сти основных параметров транспортируемой среды от температуры на режимы функционирования трубопроводных систем. На основе математических моделей функционирования трубопроводных систем в условиях экстремально низких температур внешней среды проведены вычислительные эксперименты при различных значениях параметров, описывающих трубопроводную систему. На основе проведенных вычислительных экспериментов установлены закономерности зависимости оптимальной структуры трубопроводной системы от определяющих параметров.

Разработанные вариационные постановки многокритериальных задач оптимизации трубопроводного транспорта, методы их решения позволяют осуществлять эффективное управление режимами функционирования трубопроводного транспорта на основе оптимального выбора физической и геометрической структуры многослойных трубопроводных систем. Это открывает новые потенциальные возможности достижения наиболее эффективных режимов трубопроводного транспорта на стадии функционирования трубопроводной системы в условиях действия экстремальных факторов внешней среды.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований - грант № 13-08-00229.

1. Богомольный В.М. Оптимальное проектирование оболочек машин, трубопроводов, агрегатов. М.:МГУС. 2003. 223 с. .
2. Рекомендации по расчету трубопроводов из многослойных труб на динамические нагрузки. М.:ВНИИСТ. 1982.
3. Борисов Б.И. Защитная прочность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. М.: Недра. 1987.
4. Гусев Е.Л. Качественные закономерности взаимосвязи параметров в оптимальных структурах в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях // Доклады РАН. 1996. т.346. № 3. С. 324-326.
5. Гусев Е.Л. Качественные закономерности структуры оптимальных решений в задачах оптимального синтеза многослойных конструкций при воздействии упругих волн// Доклады РАН. 1998. Т. 368. № 1. С.53-56.
6. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н., Марков В.Г. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов. М.: Наука-Физматлит. 2008. 256 с.

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НОЖЕЙ ПИТАЮЩЕ-ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ АППАРАТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КОМБАЙНОВ

В.О. Замятнин<sup>1</sup>, В.В. Комиссаров<sup>2</sup>, П.С. Дробышевский<sup>1</sup>, Н.В. Псырков<sup>1</sup>, Л.А. Сосновский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Гомсельмаш», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

<sup>3</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь

**Аннотация.** Представлены сведения о сравнительной эксплуатационной стойкости ножей питающе-измельчающих аппаратов сельскохозяйственных комбайнов производства ОАО «Гомсельмаш» по результатам наблюдений в хозяйствах РБ.

**Ключевые слова:** ножи, высокопрочный чугун, сталь, кормоуборочный комбайн, испытания.

### Материалы и методы

Объектом исследования являются ножи питающе-измельчающих аппаратов комбайнов КВК-800 следующих типов: а) импортные стальные ножи с износостойким покрытием (MWS, Германия); б) ножи из чугуна ВЧТГ (55 HRC) объемно закаленные до твердости 55 HRC. Мониторинг работоспособности ножей проведен по утвержденной методике ОАО «Гомсельмаш» в сельхозпредприятии «Боровики» (РБ).

### Результаты

Результаты мониторинга до и после наработки 1000 т без заточки ножей представлены на рисунке 1. Каждая точка на графике – это результат измерения радиуса затупления  $r$  на одном ноже. Линии проведены по средним значения  $\bar{r}$ .

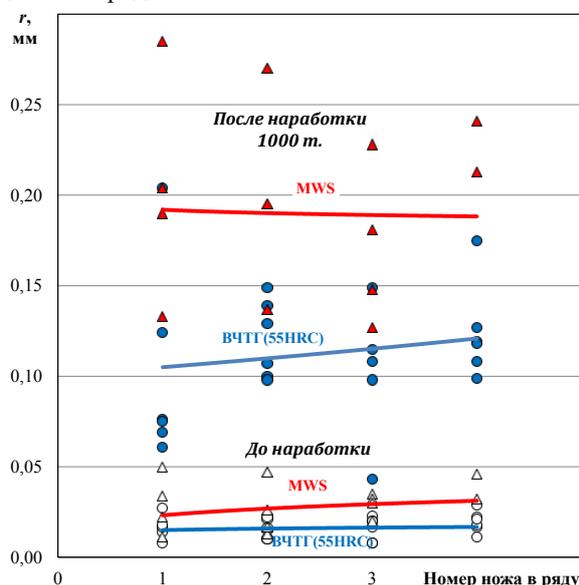


Рис. 1. Радиус затупления режущей кромки ножей ВЧТГ (55 HRC) и MWS до и после наработки 1000 т, при уборке кукурузы в КДСУП «Боровики»

Чтобы описать рассеяние результатов измерений, проведена статистическая обработка данных. На рисунке 2 показаны эмпирические функции распределения радиуса режущей кромки ножей MWS (сталь) и «Гомсельмаш» (чугун ВЧТГ) при наработке 1000 т.

Из приведенных данных следует, что ножи MWS (Германия) после наработки 1000 т. имеют повышенные в ~2 раза значения радиуса режущей кромки по сравнению с ножами из чугуна ВЧТГ (55 HRC), и при

этом они обнаруживают больший разброс (рассеяние) результатов испытаний.

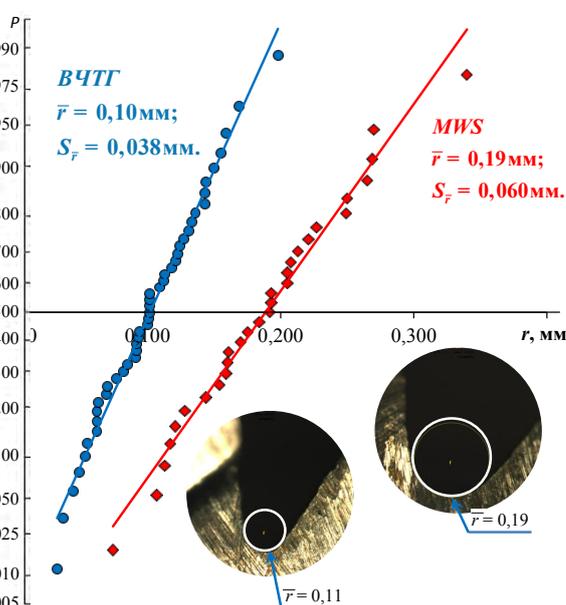


Рис. 2. Эмпирические функции распределения радиуса режущей кромки ножей MWS (сталь) и Гомсельмаш (чугун ВЧТГ) при наработке 1000 т.

Долговечность чугунных и стальных ножей, определенная по износу в процессе длительной эксплуатации, показана на рисунке 3.

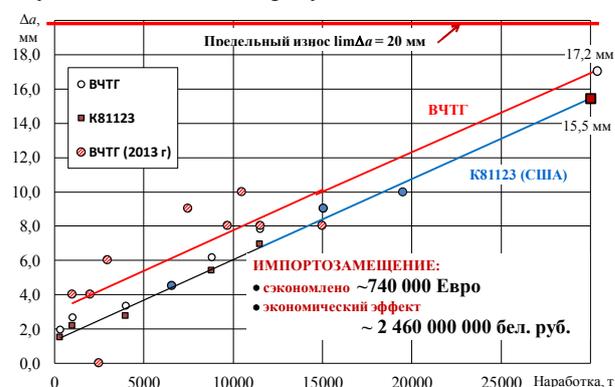


Рис. 3. Эксплуатационная стойкость чугунных и стальных ножей

Установлено, что чугунные ножи удовлетворительно работают (17 тыс. т.) как на подборе трав (2 тыс. т.), так и на кукурузе (15 тыс. т.); при этом их износ (9 мм) не превысил половины допустимого (20 мм).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Е.В. Зеньков<sup>1</sup>, Л.Б. Цвик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия, jovanny1@yandex.ru

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия, tsvik\_l@mail.ru

**Аннотация.** В работе описываются результаты проведенных экспериментальных исследований по деформированию предложенных призматических образцов, моделирующих уровень и вид НДС материала деталей машин, работающих в условиях двухосного растяжения. Интерпретация полученных данных осуществлялась с использованием уточненного критерия прочности Писаренко-Лебедева.

**Ключевые слова:** призматический образец, двухосное растяжение, вид напряженно-деформированного состояния.

Прочность и долговечность материала деталей и узлов машин с концентраторами напряжений определяется возникающим вблизи таких концентраторов напряженно-деформированным состоянием (НДС), которое является, как правило, двухосным. Распространенные методы оценки прочности материала таких деталей, осуществляемые с использованием классических критериев, например, Галилея, Кулона, Треска-Сен-Венана, Хубера-Мизеса-Генки, могут приводить к существенному несовпадению расчетного и экспериментально установленного предельных состояний их материала [1 – 4]. Связано это с тем, что существенное влияние на прочность материала детали оказывает вид двухосного растяжения.

Указанное несоответствие преодолевается в уточненных критериях прочности или уравнениях предельного состояния, учитывающих двухосный характер деформирования материала в момент его разрушения – критериях Писаренко-Лебедева, Баландина, Друккера-Прагера и других [5]. Препятствием, сдерживающим их применение, является трудоемкость и сложность получения прочностных констант материала, входящих в эти критерии.

В работе предложена конструктивная схема призматического образца единой формы, отличающегося наличием боковых выступов L-образной формы с наклонными опорными поверхностями, на которых в процессе его испытания возникают контактные реакции, необходимые для создания одной из составляющих двухосного растяжения в образце, что не требует использования сложных машин и рычажных механизмов.

В соответствии с расчетно-экспериментальной оценкой прочности материала, применяемой при использовании уравнений предельного состояния [5], проводились испытания до разрушения в условиях квазистатического нагружения конструктивных вариантов призматических образцов, изготовленных из стали 50ХФА, в рабочих зонах которых двухосное растяжение характеризовалось видом НДС  $P^{nped}=1,8$  и  $P^{nped}=1,6$ . В качестве характеристики  $P$  вида НДС, определяющей прочность материала детали, используется отношение первого инварианта тензора напряжений ко второму, введенного Смирновым-Аляевым [5]. Экспериментальные исследования

проводились на типовой машине Instron 5989.

Характеристики НДС в момент разрушения испытанных образцов определялись с помощью численного моделирования процесса их деформирования в момент разрушения. Испытания показали, что первое главное напряжение в условиях двухосного растяжения (для первого из испытанных образцов  $P^{nped}=1,8$ ) в предельном состоянии существенно ниже значения  $\sigma_1^{nped} = \sigma_g = 1270$  МПа, полученного для разрушения этой стали в условиях одноосного растяжения.

Интерпретация полученных результатов осуществлялась с применением уточненного (двухосного) критерия прочности Писаренко-Лебедева, хорошо согласующегося для ряда материалов с экспериментальными данными

$$\chi \sigma_i^{nped} + (1 - \chi) \sigma_1^{nped} A^{1-P^{nped}} = \sigma_g. \quad (1)$$

С учетом полученных из эксперимента расчетных характеристик НДС –  $\sigma_i^{nped}$ ,  $\sigma_1^{nped}$ ,  $P^{nped}$  – в момент разрушения двух призматических образцов были вычислены прочностные константы материала  $\chi$  и  $A$  для исследуемой стали, входящих в уравнение Писаренко-Лебедева. Их полученные значения хорошо согласуются с данными, рекомендуемые в справочной литературе, например [5, 6].

1. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
2. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальное исследование в обработке металлов давлением. М-Л.: Машиностроение, 1972. 324 с.
3. Гагарин Ю.А., Пичков С.Н. Исследование поведения дефектов в полях растягивающих и сжимающих напряжений // Проблемы прочности и пластичности. Межвузовский сборник. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2000. С. 11 – 116.
4. Цвик Л.Б., Щеглов Б.А., Федотова С.И. и др. Укрепление отверстий и статическая прочность осесимметричных штурцеров узлов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. № 1. С 58 – 65.
5. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник М.: Машиностроение, 1985. 224 с. (Основы проектирования машин).
6. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 416 с.

## АКТИВНОЕ ГАШЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М.Я. Израйлович<sup>1</sup>, Б.М. Эрлих<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [optima44@mail.ru](mailto:optima44@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [boriserlich@gmail.com](mailto:boriserlich@gmail.com)

**Аннотация.** Рассматривается механическая система, подверженная действию гармонического параметрического возмущения. Приводятся результаты решения задач активного силового гашения параметрических колебаний, имеющих высокую интенсивность.

**Ключевые слова:** Механическая система, параметрическое гармоническое возмущение, активное силовое гашение

Известно, что параметрические возмущения даже малых амплитуд могут обуславливать возникновение колебаний высокой интенсивности различных машин, механизмов и приборов [1], что снижает их живучесть.

В настоящее время для снижения интенсивности такого рода колебаний разрабатываются методы пассивного их гашения, так и методы активного гашения [2], [3], [4]. В [4] разработаны регулярные методы синтеза силовых виброгасящих воздействий с обратной связью на основе сочетания методов гармонической линеаризации в вариационных методах теории оптимального управления.

В докладе излагается представляющий существенную теоретическую и практическую значимость эффект, имеющий место при гашении параметрических колебаний. Суть этого эффекта заключается в том, что при определенных условиях оказывается возможным обеспечить существенное снижение амплитуды параметрических колебаний,

имеющих высокую интенсивность, при использовании виброгасящего воздействия малой интенсивности.

1. Фролов К.В. Некоторые проблемы параметрических колебаний элементов машин. В сб. «Колебания и устойчивость приборов, машин и элементов систем управления». М.: Наука. 1968.
2. Ковыршин С.В. Разработка математических моделей активного демпфирования и оценок долговечности деталей турбомашин. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Иркутск. 2006.
3. Мяло Е.В. Гашение параметрических колебаний вертикального стержня подвижной массой // Машиностроение и инженерное образование. 2008.
4. Израйлович М.Я. Активное виброгашение параметрических колебаний. М.: URSS. 2011. 169 с.
5. Израйлович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение в системе с нелинейной фрикционной характеристикой автоколебательного типа при действии параметрического возмущения с использованием силового воздействия малой интенсивности. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. №9.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ R-КРИВОЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА ИЛ-96-300

А.С. Ким<sup>1</sup>, В.В. Оводов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

[kimanton@front.ru](mailto:kimanton@front.ru)

<sup>2</sup>ОАО «Ил», Москва, Россия

**Аннотация.** В докладе представлены результаты расчета остаточной прочности самолета Ил-96-300 по 4-м зонам фюзеляжа методикой с использованием R-кривой материала обшивки. Предложена методика по расчету подрастания физической длины трещины от приложенной нагрузки с использованием результатов расчета остаточной прочности данной методикой. Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** остаточная прочность, натурные испытания, R-кривая, методика расчета, фюзеляж, выпучивание обшивки.

### Методика расчета остаточной прочности

Согласно методике [1] расчета остаточной прочности конструкции с использованием R-кривой для начальной длины трещины  $2a_0$  получаем кривую зависимости напряжений в обшивке с учетом влияния подкреплений –  $\sigma_R$  от значений эффективной длины трещины –  $2a_{эфф}$  ( $\sigma_R$ -кривая). На полученную кривую накладывается кривая зависимости разрушающих напряжений стрингера с учетом влияния подкреплений –  $\sigma_{с стр}$ . По расположению кривых разрушающих напряжений обшивки и стрингера определяется критический элемент подкрепленной конструкции и величина разрушающих напряжений. Особенностью данной методики является учет стабильного подрастания трещины в обшивке, и в связи с этим более точное определение поправочных коэффициентов учитывающих перераспределение напряжений в обшивке –  $C$  и в стрингере –  $\beta$ , при приближении трещины к стрингеру. С использованием результатов расчета данной методикой возможно сравнение расчетных и экспериментальных подрастаний физической длины трещины, что является очень актуальным, так как испытания натурных фюзеляжей редко происходят до разрушения. Для определения расчетных подрастаний физической длины трещины была разработана отдельная методика.

### Расчет остаточной прочности

В 2013 году в ЦАГИ были проведены испытания на остаточную прочность некоторых зон фюзеляжа самолета Ил-96-300, среди которых две зоны с поперечной трещиной и две зоны с продольной трещиной. Испытания проводились не до разрушения, были зафиксированы подрастания продольных трещин.

При расчете зон с продольной трещиной крайне важно учитывать выпучивание обшивки фюзеляжа под действием избыточного давления, приводящее к появлению дополнительных изгибных моментов у кончиков трещины, что снижает остаточную прочность конструкции. Степень влияния выпучивания зависит от длины трещины, радиуса фюзеляжа, а также от типа конструкции фюзеляжа и

шпангоута и характеризуется значением поправочного коэффициента  $\beta_{bulge}$ .

В зарубежной литературе выпучивание обшивки наиболее часто описывается двумя моделями: Свифта и Чена-Счиива. В расчетах использовалась модель Чена-Счиива, в которой значение  $\beta_{bulge}$  для случая двухпролетной продольной трещины с разрушенным центральным шпангоутом задается следующим уравнением [2]:

$$\beta_{bulge} = \sqrt{1 + MD} \quad (1)$$

где

$$M = \frac{5 Etb}{12\pi R^2 P} \frac{0.316}{\sqrt{1+18\chi}} \tanh \left[ 0.06 \left( \frac{R}{t} \right) \sqrt{\frac{Pb}{4Et}} \right];$$

$$D = \frac{1 + \cos(\pi c/b)}{2} + F \frac{1 - \cos(\pi c/b)}{2};$$

$c$  – физическая полудлина трещины;

$R$  – радиус кривизны фюзеляжа;

$b$  – расстояние между подкреплениями;

$F$  – параметр, учитывающий неполное ослабление выпучивания.

$E$  – модуль упругости обшивки;

$t$  – толщина обшивки;

$P$  – давление;

$\chi$  – отношение, характеризующее двухосное нагружение ( $\sigma_{прод}/\sigma_{кол}$ );

$\sigma_{прод}$  и  $\sigma_{кол}$  – продольные и кольцевые напряжения.

Полученные расчетные значения остаточной прочности методикой с использованием R-кривой по 4-м исследуемым зонам не противоречат результатам эксперимента. Сравнение экспериментальных и расчетных подрастаний длин продольных трещин показало хорошее совпадение, что говорит об эффективности используемой методики расчета остаточной прочности и модели выпучивания.

1. Нестеренко Б.Г. Метод расчета остаточной прочности подкрепленной конструкции при помощи R-кривых // Труды ЦАГИ. Выпуск 2658, 2008. - 221-228с
2. Chen D., Schijve J., Bulging of Fatigue Cracks in a Pressurized Aircraft Fuselage // Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-655, May 1991. Presented at 16<sup>th</sup> ICAF Symposium, Tokyo, Japan, 22-24 May 1991.

## ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ.

Корнев Ю.В.<sup>1</sup>, Мурашов М. В.<sup>2</sup>, Горская Е. В.<sup>3</sup>, Бойко О.В.<sup>1</sup>, Чиркунова С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва, Россия, [yurikornev@mail.ru](mailto:yurikornev@mail.ru).

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. Москва, Россия.

<sup>3</sup> Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526, Москва, Россия.

**Аннотация.** Представлен обзор возможностей метода определения механических свойств материалов в наномасштабе – наноиндентирование. Приведены экспериментальные данные, полученные авторами при исследовании особенностей механического поведения наноструктурированных композиционных материалов и покрытий.

Описание механических характеристик материалов в наномасштабе позволяет изучать закономерности механического поведения их приповерхностных слоёв, субмикронных объёмов, кластеров. Это особенно актуально в свете развития нанотехнологий и, как следствие, постоянного уменьшения размеров механических и электронных компонентов устройств, толщин покрытий и т.д. Основным методом, позволяющим получать широкий спектр механических характеристик различных материалов и покрытий в наномасштабе, в настоящее время является наноиндентирование [1].

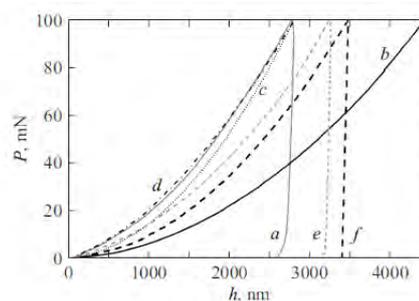
Данный метод хорошо себя зарекомендовал при изучении твёрдых материалов (стекло, металлы и др.) [1]. В тоже время, отмечается, что существуют различные факторы, которые могут заметно влиять на результаты экспериментов, полученные методом наноиндентирования: шероховатость поверхности, температурный дрейфт, особенности структуры материала и др. Особенно важно учитывать структуру материала и свойств поверхности при определении механического поведения структурно сложных композиционных материалов на основе полимерных матриц. Например, в [2], отмечается необходимость корректировки стандартных методов проведения экспериментов и обработки данных при наноиндентировании образцов пластиков на основе полистирола.

В настоящей работе для определения механических свойств образцов методом наноиндентирования применялся измерительный комплекс NanoTest 600 (Micro Materials Ltd., England). Изучение механических свойств эластомерных композитов, наполненных наночастицами различной природы, показало зависимость приведённого модуля упругости от глубины индентирования, т.е. размерный эффект при наноиндентировании. Возможные причины такого механического поведения дисперснонаполненных эластомерных композитов представлены в [3].

При изучении упругих свойств твёрдых тонких плёнок в экспериментах по наноиндентированию, был предложен метод расчёта их модуля упругости с учётом деформации подложки. Результаты были получены для ряда покрытий с различной

толщиной (от 70 нм) и механическими свойствами [4].

Для образца алюминиевого сплава AD 1 сравнивалась глубина внедрения индентора в элемент шероховатости поверхности, полученная в эксперименте по наноиндентированию и при трёхмерном моделировании методом конечных элементов, рис. 1. Установлено, что в контактных моделях для элементов шероховатости поверхности, применение механических свойств, определённых из макроэкспериментов, требует корректировки, учитывающей наклёп поверхностного слоя материала и размерный эффект [5].



**Рис. 1.** Зависимость глубины погружения  $h$  от нагрузки на индентор  $P$ . Шероховатая поверхность: физический эксперимент — а, конечно-элементный расчет — б, расчет со скорректированной кривой упрочнения — с, расчет с дополнительным учетом размерного эффекта — д. Полированная поверхность: физический эксперимент — е, конечно-элементный расчет — ф.

1. Ю. И. Головин Наноиндентирование и его возможности, Машиностроение, Москва, 2009, 312 с.
2. D. Tranchida, S. Piccarolo, J. Loos, A. Alexeev, Accurately evaluating Young's modulus of polymers through nanoindentations: A phenomenological correction factor to the Oliver and Pharr procedure// Applied physics letters 2006, Volume 89, issue17, article 171905.
3. Y.G. Yanovsky, K.K. Valiev, Y.V. Kornev, Y.N. Karnet, O.V. Boiko, K.P. Kosichkina, O.B. Yumashev The role of the scale factor in estimation of the mechanical properties of composite materials with nanofillers //International Journal of Nanomechanics Science and Technology. 2010. Т. 1. № 3. p. 187-210.
4. I.G. Goryacheva, E.V. Torskaya, N.K. Myshkin, D.M. Gutsev V.G. Kudritskii, I.N. Kovaleva, Y.V.Kornev Modeling friction of tribological composite coatings// Journal of Friction and Wear, 2012. Т. 33. № 6. p. 407-414.
5. M. V. Murashov, Y. V. Kornev Elastoplastic Deformation of a Roughness Element //Technical Physics, 2014, Vol. 59, N 3, p. 383-389.

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ О ТОНКОЙ АТОМНОЙ СТРУКТУРЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ И ПЛЕНОК ПРИ ИХ ИЗУЧЕНИИ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ

И.С.Левин<sup>1,2</sup>, М.М.Хрущов<sup>1</sup>, В.М.Авдюхина<sup>2</sup>, С.А.Шальнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия, [michel\\_x@mail.ru](mailto:michel_x@mail.ru)

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия, [is.levin@physics.msu.ru](mailto:is.levin@physics.msu.ru)

**Аннотация.** Описана методика исследования структуры и фазового состава наноструктурированных и нанокompозитных тонких покрытий методом диффузного рассеяния рентгеновских лучей и его особенности. Приведены примеры использования данной методики для изучения легированных хромом алмазоподобных покрытий, полученных реактивным магнетронным распылением.

**Ключевые слова:** рентгеновская дифрактометрия, вакуумные ионно-плазменные покрытия, нанокристаллическая структура, нанокompозит.

В работе [1] нами была предложена методика изучения диффузного фона в тонких покрытиях на подложках, состоящая в восстановлении его величины до уровня, характерного для объемного материала. Окончательное выражение для интенсивности диффузного рассеяния покрытием, приведенной к электронным единицам имеет вид:

$$I_{\text{е.с.}}^{\text{покp}} = \frac{K_{\text{abc}}}{1 + \cos^2 2\theta_{\text{м}} \cos^2 2\theta} \cdot \frac{I_{\text{д.р.}}^{\text{эксп}} / I_{\text{эт.}}^{\text{эксп}}}{1 - \exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)} - K_1 \cdot \frac{\exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)}{1 - \exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)} \cdot I_{\text{ат.}}^{\text{подл}}, \quad (1)$$

$$\text{где } K_{\text{abc}} = \frac{A_{\text{покp}} \mu_{\text{покp}} / \rho_{\text{покp}}}{A_{\text{эт.}} \mu_{\text{эт.}} / \rho_{\text{эт.}}} (1 + \cos^2 2\theta_{\text{м}} \cos^2 2\theta_{\text{эт.}}) I_{\text{эт.}}^{\text{(е.с.)}},$$

$$K_1 = \frac{A_{\text{покp}} \mu_{\text{покp}} / \rho_{\text{покp}}}{A_{\text{подл}} \mu_{\text{подл}} / \rho_{\text{подл}}}.$$

Предполагалось, что при съемке используется кристалл-монокроматор на отраженном пучке (соответствующие выражения при его отсутствии существенно упрощаются). Принятые обозначения:  $t$  – толщина покрытия;  $A_i$ ,  $\rho_i$ ,  $\mu_i$  – атомные веса, плотности и линейные коэффициенты поглощения материалов покрытия, подложки и эталона;  $\theta_{\text{м}}$ ,  $\theta_{\text{эт}}$  – угол отражения монокроматора и фиксированный угол, при котором теоретически рассчитывается интенсивность рассеяния эталоном  $I_{\text{эт.}}^{\text{(е.с.)}}$  в электронных единицах. Выражение (1) отличается от стандартно используемого в теории диффузного рассеяния объемными (д.р.об) материалами [2] выражения:

$$I_{\text{е.с.}}^{\text{об}} = \frac{K'_{\text{abc}}}{1 + \cos^2 2\theta_{\text{м}} \cos^2 2\theta} \cdot \frac{I_{\text{д.р.об}}^{\text{эксп}} / I_{\text{эт.}}^{\text{эксп}}}{1 - \exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)}, \quad (2)$$

$$\text{где } K'_{\text{abc}} = \frac{A_{\text{об}} \mu_{\text{об}} / \rho_{\text{об}}}{A_{\text{эт.}} \mu_{\text{эт.}} / \rho_{\text{эт.}}} \cdot 1 + \cos^2 2\theta_{\text{м}} \cdot \cos^2 2\theta_{\text{эт.}} \cdot I_{\text{эт.}}^{\text{(е.с.)}},$$

что связано как с наличием эффектов поглощения, вносящих дополнительную угловую зависимость в интенсивность диффузного фона и влияющих помимо этого на абсолютную величину интенсивности, так и с необходимостью учета диффузного рассеяния подложкой. С учетом (1) и (2) приведенную к

электронным единицам интенсивность диффузного рассеяния покрытием можно записать, как функцию приведенных к эталону экспериментальных значений интенсивностей  $I_{\Sigma}$  и  $I_{\text{подл}}$ :

$$I_{\text{е.с.}}^{\text{покp}} = C \cdot \frac{I_{\Sigma} - I_{\text{подл}} \cdot \exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)}{(1 + \cos^2 2\theta_{\text{м}} \cos^2 2\theta)[1 - \exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)]}, \quad (3)$$

где  $C = K_{\text{abc}}$  – константа для данной геометрии съемки и материала покрытия. При съемке в отсутствие монокроматора угловая зависимость интенсивности рассеяния покрытием, выраженная в электронных единицах, в значительной степени определяется величиной фактора  $\exp(-2\mu_{\text{покp}} t / \sin \theta)$ , связанного с ослаблением интенсивности подложки нанесенным на неё покрытием. Таким образом, процедура оценки диффузного фона наноструктурированного покрытия состоит из двух этапов: на первом, используя соотношение (4), определяют значение  $\mu_{\text{покp}} t$  – произведения линейного коэффициента поглощения рентгеновских лучей и толщины покрытия; на втором, на основе (3) получают угловую зависимость  $I_{\text{е.с.}}^{\text{покp}}(\theta)$ .

Для иллюстрации приводятся результаты, полученные при съемке легированных хромом алмазоподобных покрытий а-С:Н:Сг:Н, нанесенных на подложки из нержавеющей стали ХН35ВТ [3].

Предложенный метод позволяет в ходе дифрактометрических исследований выделить информацию о структуре материала покрытий, и может быть полезен при изучении особенностей многофазных нанокompозитных покрытий и поведения их трибологических и микромеханических свойств.

### Литература

1. Хрущов М.М., Свешников С.В. К методике рентгеновского исследования диффузного фона тонких аморфных и наноструктурированных покрытий, конденсированных на подложки // Наноинженерия. 2012. № 8. С.37-41.
2. Иверонова В.И., Кацнельсон А.А. Ближний порядок в твердых растворах. М.: Наука. 1977. 256 с.
3. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А. и др. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия а-С:Н:Сг – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН. Сер. физич. 2014. Т.78. № 10. С.1257-1265.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ МЕТАЛЛ – МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ СИСТЕМЫ (СТАЛЬ 45 – СИЛУМИН) ПРИ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

И.Н. Лис<sup>1</sup>, Л.А. Сосновский<sup>2</sup>, А.В. Богданович<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь,;

<sup>2</sup> ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь;

<sup>3</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; [bogal@tut.by](mailto:bogal@tut.by)

**Аннотация:** Проанализированы результаты испытаний на фрикционно-механическую усталость силовой системы сталь 45-силумин с помощью энергетической теории предельных состояний силовых систем.

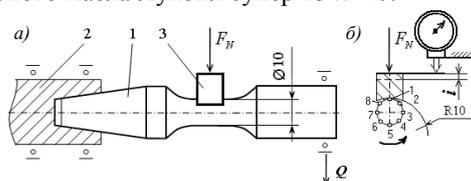
**Ключевые слова:** Фрикционно-механическая усталость, энергетический критерий предельных состояний, силовая система, предел выносливости.

### Цель

Во время эксплуатации машин в элементах их силовых систем развиваются комплексные износоусталостные повреждения [1-2]. Для корректной оценки надежности и долговечности таких систем необходимо проводить исследования основных закономерностей их повреждения при фрикционно-механической усталости.

### Методика испытаний

В соответствии с [3] проводились испытания металл - металлической силовой системы на фрикционную (ФУ) и фрикционно-механическую усталость (ФМУ). Образец-вал 1 из стали 45 с диаметром рабочей части 10 мм консольно закреплялся в шпинделе 2 испытательной машины УКИ-6000-2 и вращался с частотой 3000 мин<sup>-1</sup> (рис. 1, а). Контроль-образец-вкладыш 3 шириной 4 мм, выполненный из силумина, прижимался к опасному сечению образца контактной нагрузкой  $F_N$ , величину которой поддерживали постоянной в процессе испытания каждой пары образец-контроль-образец. В процессе испытаний обеспечивался капельный подвод смазочного материала – универсального всесезонного моторного масла Лукойл супер 15W-40.



1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контроль-образец  
Рис. 1. Схема испытания на ФУ (при  $Q = 0$ ) и ФМУ (при  $Q > 0$ )

При испытаниях на ФМУ изгибная нагрузка  $Q$  поддерживалась одинакового уровня для каждой пары образец-контроль-образец, что обеспечивает амплитуду циклических напряжений изгиба в опасном сечении образца  $\sigma_a = \text{const}$ . Прочие условия испытаний оставались такими же, как и при испытаниях на фрикционную усталость.

В качестве предельного состояния при испытаниях на ФУ и ФМУ был принят суммарный износ пары образец – вкладыш  $i_{пред} = 100$  мкм, а база испытаний составляла  $10^7$  циклов в соответствии с [3].

### Результаты испытаний

По результатам испытания силовой системы были построены кривые ФУ и ФМУ, по которым определили основные характеристики (предел выносливости, абсцисса точки перелома кривой усталости, показатель наклона кривой усталости).

### Энергетический анализ результатов испытаний

Закономерность обратного эффекта при ФМУ может быть предсказана теоретически с помощью, например, энергетической теории предельных состояний силовых систем [2, 4].

Провели анализ экспериментальных данных с помощью энергетического критерия предельного состояния силовой системы [5]:

$$U^{ef} = R_{TM} \cdot [a_T \cdot T_S + R_{\sigma\tau} \cdot (a_{\sigma} \cdot \sigma^2 + a_{\tau} \cdot \tau_w^2)] = U_0,$$

где  $U^{ef}$  – часть полной энергии, которая затрачивается на образование и накопление повреждений в силовой системе ( $U^{ef}$  включает тепловую, силовую и фрикционную составляющие, которые пропорциональны, соответственно, температуре  $T_S$ , квадрату амплитуды максимальных изгибающих напряжений  $\sigma^2$ , квадрату фрикционных напряжений  $\tau_w^2$ );  $R_{TM}$  – функция взаимодействия тепловой и механических составляющих эффективной энергии;  $a$  – коэффициенты, выделяющие из полных тепловой и механической энергий их эффективные части;  $U_0$  – энергия разрыва межатомных связей.

Анализ результатов приведен в докладе. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при расчете металл-металлических силовых систем типа вал-вкладыш, работающих в условиях ФМУ.

1. Сосновский Л.А., Махутов Н.А. Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности. – 2000. – 304 с.
2. Сосновский Л.А. Механика износоусталостного повреждения: монография. Гомель: БелГУТ. 2007. 434 с.
3. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость. СТБ 1448–2004. Минск: ГОССТАНДАРТ. 2004. 14 с.
4. Богданович А.В. Прогнозирование предельных состояний силовых систем: монография. Гродно: ГрГУ. 2008. 371 с.

## ФОРМИРОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ОСАЖДЕНИИ ТИТАНА В ВАКУУМЕ

А.А. Лозован<sup>1</sup>, С.В. Прищепов<sup>1</sup>, С.В. Франгулов<sup>1</sup>, Р.Н. Ризаханов<sup>2</sup>, С.К. Сигалаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», Москва, Россия; [loz-plasma@yandex.ru](mailto:loz-plasma@yandex.ru)

<sup>2</sup>ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия; [nanocentre@kerc.msk.ru](mailto:nanocentre@kerc.msk.ru)

**Аннотация.** Исследованы состав и структура фрактальных нитей Ti, полученных лазерным напылением в высоком вакууме.

**Ключевые слова:** кластеры, фрактальные нити, пленки, наноструктуры.

Производство тонких пленок с толщиной в наноразмерном диапазоне является одним из важных направлений нанотехнологии [1]. Все более широкий спектр применений для этого направления нанотехнологии находит импульсное лазерное осаждение (ИЛО) [2, 3]. При лазерной абляции в процессе разлета плазменного факела образуются кластеры, являющиеся чрезвычайно перспективным инструментом нанотехнологий.

Наноструктуры, которые образуются при напылении кластеров, часто обладают специфическими свойствами, структурой и размерным диапазоном. Когда твердые кластеры осаждаются на поверхности, то они могут перемещаться на ней. Это диффузионное движение кластеров на поверхности может приводить к их объединению и к уменьшению коэффициента диффузии образовавшейся структуры [4].

Интересным объектом из фрактальных кластеров являются фрактальные нити, впервые полученные в работе [5], образованные в процессе эволюции разлетающейся, первоначально плотной, плазмы. Нити образуются по механизмам кластер-кластерной агломерации [4] или перколяции [6]. Эти нити получали при напылении металлов, керамики и композитов как при внешних электрических полях, так и без них, при этом обычно при высоких давлениях. В работе [7] при давлении Ar 0,05 мбар и температуре подложки 600 °С были зерна диаметром около 100-150 нм, которые собирались в цепи длиной между 400 нм и 5 мкм.

В данной работе исследуются фрактальные нити (представленные на рис.1 при разных увеличениях), полученные при напылении Ti при давлении  $\sim 10^{-4}$  Па и комнатной температуре подложки методом ИЛО при  $I=200$  мДж,  $\tau_{\text{имп}} = 10$  нс,  $f = 30$  Гц на медную пленку на ситалловой подложке. Исследованы состав и структура нитей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения Государственного задания в части проведения научно-исследовательских работ (код проекта 3087).

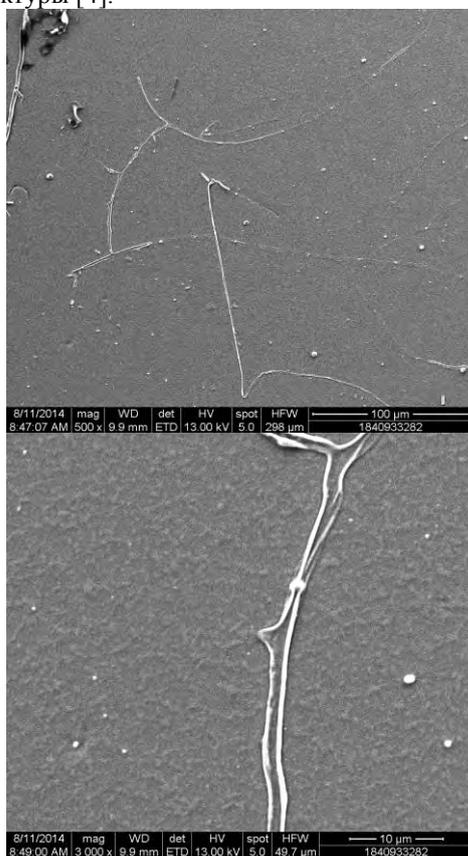


Рис.1. Фрактальные нити Ti

1. Borisenko V.E., Ossicini S. What is What in the Nanoscience (Weinheim: Wiley-VCH, 2004).
2. Фоминский В.Ю., Григорьев С.Н., Гнедовец А.Г. Об особенностях ионно-иницированных процессов при импульсном лазерном осаждении покрытий MoSe<sub>2</sub> в импульсных электрических полях// Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, вып. 14. С. 86-94.
3. Lozovan A.A., Frangulov S.V., Chulkov D.V. Chapter 8. Application of Pulsed Laser Deposition for Putting Multi-Layer Coatings on the Inner Surfaces of Hollow Objects/ed., M. Thys and E. Desmet. Laser Beams: Theory, Properties and Applications Nova Science Publishers, Inc. New York, 2011. – P. 331-349.
4. Смирнов Б.М. Фрактальный клубок - новое состояние вещества//УФН. 1991. Т. 161, № 8. С. 141-153.
5. Lushmkov A.A., Negin A.E., Pakhomov A.V. Experimental observation of the aerosol-aerogel transition//Chem. Phys. Lett. 1990. V. 175, No 1-2. P. 138-142.
6. Каск Н.Е., Лексина Е.Г, Мичурин С.В. и др. Эффективность образования фрактальных структур при лазерном испарении//Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 5. С. 437-442.
7. Filipescu M., Stokker-Cheregia F., Colceaga D. et al. Morphological and structural characterization of SiC based composite nanostructures// Appl. Surf. Sci. 2013.Т. 278. P. 96-100.

## СТРУКТУРА $\text{CeO}_2$ ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

А.А. Лозован<sup>1</sup>, С.С. Александрова<sup>1</sup>, С.В. Франгулов<sup>1</sup>, Р.Н. Ризаханов<sup>2</sup>, С.К. Сигалаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», Москва, Россия; [loz-plasma@yandex.ru](mailto:loz-plasma@yandex.ru)

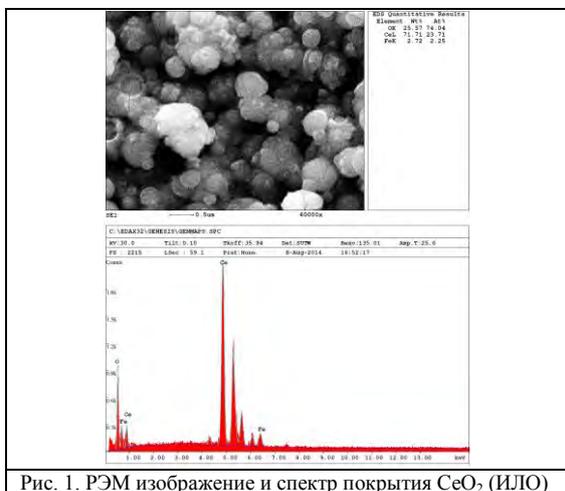
<sup>2</sup>ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия; [nanocentre@kerc.msk.ru](mailto:nanocentre@kerc.msk.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты исследований структуры и состава  $\text{CeO}_2$ , напыленных импульсным лазерным осаждением и электронно-лучевым испарением на стальную подложку и ковар при разной температуре.

**Ключевые слова:** покрытия, оксиды, пленки, импульсное лазерное осаждение и электронно-лучевое испарение.

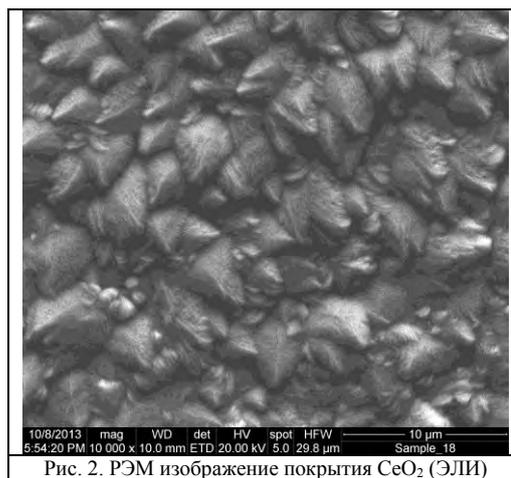
Интерес к исследованиям соединений редкоземельных элементов (РЗЭ) обусловлен уникальным сочетанием оптических, электрических и магнитных свойств [1]. Так оксиды РЗЭ обладают высокой стабильностью диэлектрических и электрических свойств и большой диэлектрической проницаемостью. Среди оксидов РЗЭ в настоящее время большое внимание уделяется  $\text{CeO}_2$  как в виде тонких пленок для применений в оптике, электронике [2], твердооксидных топливных элементов [3] и др., так и толстых покрытий, например - для создания теплозащитных покрытий [4].

Свойства и структура покрытий  $\text{CeO}_2$  в значительной степени зависят от технологии осаждения. В данной работе использовали импульсное лазерное осаждение (ИЛО) и электронно-лучевое испарение (ЭЛИ). Исследовали топографию и состав покрытий с толщиной от 1 мкм до ~ 100 мкм, полученных при разной температуре. На рис.1 представлены РЭМ изображение и спектр покрытия  $\text{CeO}_2$  толщиной ~ 10 мкм на стали SUS 304, полученного методом ИЛО при комнатной температуре при параметрах лазера:  $I = 200$  мДж, длительность импульса  $\tau_{\text{п}} = 10$  нс; частота следования импульсов  $f = 30$  Гц. Видно, что покрытие состоит из сферических элементов размером 150 - 750 нм и их агломератов. Адгезия покрытия к подложке неудовлетворительная, поэтому покрытия большей толщины методом ИЛО не напыляли.



Покрытия  $\text{CeO}_2$  толщиной десятки мкм на под-

ложки из листовой стали SUS 304 и ковара 29 НК напыляли методом ЭЛИ испарением таблеток при давлении не выше  $6 \cdot 10^{-3}$  Па, температуре подложки 500 °С, токе эмиссии пушки 150 мА и ускоряющем напряжении 6 кВ. РЭМ изображение покрытия  $\text{CeO}_2$  на коваре толщиной 100 мкм представлено на рис. 1. Видно, что покрытие имеет зерна с треугольной формой и однородным размером. Эта структура похожа на известную из литературы структуру под названием «цветная капуста» [5]. Адгезия покрытий к обоим подложкам хорошая.



Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения Государственного задания в части проведения научно-исследовательских работ (код проекта 3087).

1. Пека Г.П. Физические явления на поверхности полупроводников. К.: Вища школа. Головне изд-во. 1984. 214 с.
2. Mansilla C. Structure, microstructure and optical properties of cerium oxide thin films prepared by electron beam evaporation assisted with ion beams // Solid State Sci. 2009. V.11. P.1456–1464.
3. Mansilla C., Hologado J.P., Espinós J.P. Microstructure and transport properties of ceria and samaria doped ceria thin films prepared by EBE-IBAD // Surf. Coat. Technol. 2007. V.202. P.1256–1261.
4. Jang B.K., Matsubara H. Nanoporous Yttria-Stabilized Zirconia Films Fabricated by EB-PVD // J. Eur. Ceram. Soc. 2006. V.26. No9. P.1585.
5. Huang J., Li Y., Hea X. et al. Enhanced spectral emissivity of  $\text{CeO}_2$  coating with cauliflower-like microstructure // Appl. Surf. Sci. 2012. V.259. P.301.

## НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ ИЗ ЧУГУНА ВЧТГ

В.И. Матвеев<sup>1</sup>, Н.Е. Мирошников<sup>1</sup>, Л.А. Сосновский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь; [tribo-fatigue@mail.ru](mailto:tribo-fatigue@mail.ru)

**Аннотация.** Рассмотрен опыт изготовления железнодорожных рельсов из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ. Представлены данные эксплуатационных испытаний опытной партии железнодорожных рельсов из чугуна ВЧТГ.

**Ключевые слова:** железнодорожные рельсы; высокопрочный чугун; эксплуатационные испытания.

Чугун – давний конкурент стали, он дешевле ее и лучше по технологичности. Это обусловило постоянную конкуренцию обоих материалов. По имеющимся данным, производство чугуна по энергозатратам почти вдвое дешевле стали [1]. Основные его прочностные характеристики приближаются к «стальному уровню», а некоторые важные служебные свойства (изностостойкость, способность к самосмазыванию, способность к демпфированию и др.) лучше, чем у стали [2].

В Гомеле специалистами ПО «Гомсельмаш» и ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» был разработан высокопрочный чугун марки ВЧТГ. Результаты испытаний образцов такого чугуна показали, что основные его служебные свойства (по сопротивлению контактной и изгибной усталости) практически близки к аналогичным свойствам высокопрочных сталей [2, 3].

На основании полученных результатов испытаний было сделано предложение об изготовлении опытных рельсов из специального высокопрочного чугуна марки ВЧТГ [2].

В сентябре 2008 г. была произведена опытная отливка первого рельса типа Р65 из чугуна марки ВЧТГ для проведения лабораторных испытаний.

В августе–сентябре 2010 года в ОЛП ГП «ГЗЛиН» ПО «Гомсельмаш» методом литья в песчаную форму была изготовлена опытная партия из четырех рельсов типа Р65 длиной по 6,5 м из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ, которые до укладки в путь прошли соответствующую механическую обработку и визуальный контроль. Из этих рельсов был изготовлен натуральный образец длиной 1,2 м, который был испытан на трех точечный изгиб по известной методике. Испытанный образец рельса показал достаточную механическую прочность: разрушение произошло под воздействием вертикальной нагрузки более 1400 кН при стреле прогиба 18 мм. Имел место хрупкий излом рельса на два куска.

Осенью 2012 года для проведения опытной эксплуатации были уложены первые рельсы из чугуна марки ВЧТГ на станционных путях в прямых участках Гомельской дистанции пути. Рельсы лежали на щебеночном балласте и железобетонных шпалах со стандартным промежуточным и стыковым скреплением. По данным путям обращаются организованные поезда с осевыми нагрузками до 23–25 кН и скоростями до 40 км/ч (рис. 1). За уло-

женными рельсами велся ежедневный контроль работниками железной дороги и сотрудниками университета. Они пролежали в пути 1 год и 4 месяца. Дополнительных трудностей в процессе эксплуатации в зимний и летний период не возникало. Общий вид и состояние рельсов нормальное. Вертикальный и боковой износ головки рельсов отсутствовал.



Рис. 1. Чугунные рельсы, лежащие в пути

На основании визуального осмотра внешнего вида снятых рельсов и результатов контрольных промеров состояния пути и рельсов в процессе эксплуатации и в момент снятия, можно сделать следующий вывод:

рельсы из высокопрочного чугуна ВЧТГ успешно прошли плановые эксплуатационные испытания на станционных путях Гомельской дистанции пути и новая партия рельсов из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ может быть рекомендована для широких эксплуатационных испытаний на Опытном кольце ОАО «ВНИИЖТ».

1. Roedter, H. ADI – Austempered Ductile Iron / H. Roedter (фирма RTIRON&TITANUM GMBH) // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей: информационный сборник технических материалов / Металлург; под ред. Н.Н. Александрова [и др.]. – М., 2004. – С. 249–258.
2. Сосновский Л.А., Жмайлик В.А., Гапанович В.А., Комиссаров В.В. Железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна. Постановка проблемы // Комплексная система содержания инфраструктуры ОАО «РЖД» (Материалы научно-практической конференции, 28 октября 2009 г.). – М.: ОАО «РЖД», 2009. – С.74-78.
3. Жмайлик В.А., Псырков Н.В., Комиссаров В.В., Замятнин В.О., Сосновский Л.А. Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / Редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 73-77.

## РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМАХ ПРОЧНОСТИ

Ю.Г. Матвиенко

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ygmatvienko7@gmail.com

**Аннотация.** Обсуждены перспективные модели и критерии механики разрушения, учитывающие особенности напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещиноподобного дефекта. Приведены теоретические и экспериментальные методы, позволяющие оценивать конструкционную прочность и живучесть поврежденных критически важных элементов. На основе критерия осреднения максимальных тангенциальных напряжений у вершины трещины смешанного типа для прогнозирования ее траектории.

**Ключевые слова:** двухпараметрическая механика разрушения, прочность, живучесть, траектория трещины.

Развитие приоритетных направлений в системе подходов к прогнозированию, обеспечению и повышению прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности машин и конструкций в междисциплинарных проблемах машиноведения обусловлено постановкой и проведением фундаментальных исследований по разработке комплексных и многостадийных моделей, локальных критериев разрушения на различных масштабно-структурных уровнях, методов нормирования прочности, надежности, живучести и безопасности машин и конструкций. Проводимые исследования базируются на физико-математическом и имитационном моделировании; комбинированных экспериментально-расчетных методах анализа напряженно-деформированного и предельного состояний, в т.ч. при наличии дефектов типа трещин и разрезов; комплексном мониторинге процессов нагружения и повреждения критически важных элементов машин и конструкций. Кроме того, привлечение развиваемых моделей, критериев прочности и разрушения представляется также весьма актуальным для решения современных технологических проблем.

Современные исследования показывают, что для расширения рамок применимости классической механики разрушения в модели и критерии разрушения необходимо введение дополнительных параметров, более полно характеризующих напряженно-деформированное состояние и отражающих локальное стеснение деформаций (или трехосность напряженного состояния) в окрестности вершины трещины. Вышеотмеченные представления приводят к формированию, так называемой, двухпараметрической механики разрушения, учитывающей в анализе напряженно-деформированного состояния не только сингулярную компоненту поля напряжений, но и несингулярную компоненту как параметр локального стеснения деформаций у вершины трещины. Таким образом, становится очевидным необ-

ходимость уточнения моделей и критериев механики разрушения, базовых уравнений и методов расчета на прочность поврежденных трещинами критически важных элементов машин и конструкций с учетом двухпараметрического представления напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины [1-3].

В этом случае для определения параметров механики разрушения современными экспериментальными методами (цифровой спекл-интерферометрии, корреляции цифровых изображений и др.) успешно привлекают многопараметрическое представление поля перемещений у вершины трещины в упругом теле в виде сингулярной и несингулярных компонент.

Дальнейшее совершенствование моделей и критериев двухпараметрической механики разрушения связано с развитием комбинированных экспериментально-расчетных методов, позволяющих более корректно оценивать значения компонент  $T$ -напряжений вдоль фронта дефекта сложной геометрии. Специального рассмотрения требует двухпараметрическая механика разрушения тел с U- и V-образными вырезами, а также адаптация двухпараметрической механики разрушения применительно к перспективным технологическим проблемам.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-00383).

1. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
2. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения в современных проблемах прочности// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №5. С. 37-46.
3. Матвиенко Ю.Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. №3. С. 80-89.

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Л.Е. Матохнюк, А.В. Бялонович

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина mle@ipp.kiev.ua

**Аннотация.** Накопление усталостных повреждений в стали 45, X18H10T и сплаве АМг6Н оценивали путем статистической обработки изображений микроструктуры. В качестве параметра, характеризующего состояние материала, использовали значение эксцентриситета эллипса Фурье-преобразования изображения, для количественной характеристики изменений структуры – коэффициент поврежденности.

**Ключевые слова:** микроструктура, Фурье-преобразование, усталостные повреждения, коэффициент поврежденности

### Цель работы

Разработка метода количественной оценки поврежденности материала в процессе циклического нагружения.

### Материалы и методы исследования

Образцы из стали 45 и сплава АМг6Н точили из прутка и фрезеровали для создания лыски для структурных исследований, из стали X18H10T – вырезали из листа толщиной 3 мм. Поверхности рабочей части образцов полировали и травили до выявления микроструктуры. До начала усталостных испытаний на оптическом микроскопе выполняли снимки структуры рабочей части образцов, которые являлись исходными изображениями. Образцы из стали 45 и АМг6Н испытывали при значениях коэффициентов асимметрии  $R = -1; 0$  и  $0,5$  при комнатной температуре, а из стали X18H10T – при  $R = 0$  и  $0,5$  в условиях комнатной температуры и  $R = 0$  при температуре  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . В процессе усталостных испытаний периодически образец снимали и фотографировали его микроструктуру.

Для определения интегральной характеристики направленности периодической либо квазипериодической структуры на основании полученной двухмерной матрицы коэффициентов Фурье-преобразования рассчитывали эксцентриситет эллипса, вторые моменты которого совпадают со вторыми моментами матрицы коэффициентов Фурье. Вычисляли моменты первого и второго порядка, и на основании полученных данных находили эксцентриситет эллипса  $e$  – отношение между меньшей и большей полуосями, который свидетельствует о мере анизотропии структуры. Для изображения, не имеющего направленных структур, значение  $e$  близко к 1. Величину  $e$  рассматривали как параметр, характеризующий Фурье-образ структуры, с помощью которого количественно определяли ее текущее состояние, свидетельствующее о накоплении усталостных повреждений.

### Результаты и их обсуждение

На рис.1 и 2 приведена структура стали 45 в исходном состоянии и после наработки 90%.

Количественные изменения в структуре материалов характеризовали с помощью коэффициента

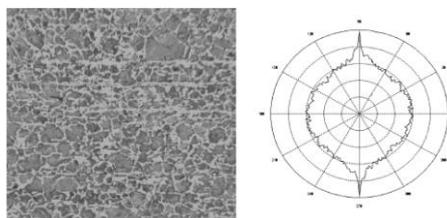


Рис. 1. Исходная структура стали 45 и диаграмма среднего распределения коэффициентов Фурье по направлениям

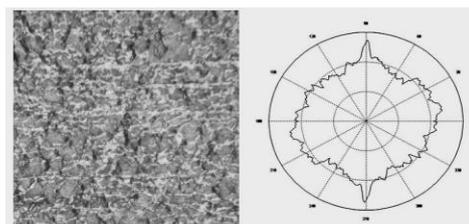


Рис. 2. Структура стали 45 после наработки 90% долговечности и диаграмма среднего распределения коэффициентов Фурье по направлениям

поврежденности

$$k = \frac{e_{исх} - e}{\sigma_{max}} \sigma_{0,2},$$

где  $e_{исх}$  – значение  $e$  для материала до испытаний,  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала,  $\sigma_{max}$  – максимальные напряжения циклов. Показано, что параметр  $k$  монотонно возрастает с количеством циклов нагружения, и к моменту разрушения достигает для конкретного материала определенной величины, причем вне зависимости от амплитуды напряжений и коэффициента асимметрии циклов, потому может служить структурным критерием разрушения материала при циклическом нагружении (рис. 3).

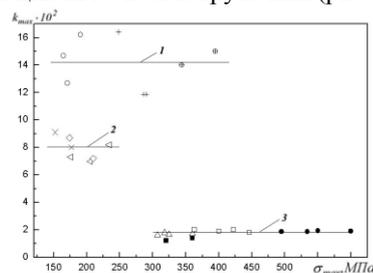


Рис. 3. Зависимость максимального значения  $k_{max}$  от максимальных напряжений цикла для Стали 45 (1), АМг6Н (2) и X18H10Т (3)

## ЖИВУЧЕСТЬ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ

Н.А. Махутов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [safety@imash.ru](mailto:safety@imash.ru)

**Аннотация.** Рассмотрено современное состояние работ в области проблем конструкционного материаловедения и безопасности, проводимых на протяжении последних десятилетий специалистами РАН, ОЭММПУ РАН и ИМАШ РАН. Показана настоятельная необходимость изменения традиционных подходов к обеспечению безопасной эксплуатации опасных объектов и намечены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: прочность конструкционных материалов, разрушение, ресурс, надежность, живучесть, техногенная безопасность, оценка рисков.

Конструкционное материаловедение, как одно из ведущих направлений науки о материалах и технологиях, становится важнейшей составной частью решения фундаментальных и прикладных проблем техногенной безопасности критически и стратегически важных объектов.

Разработки проблем конструкционного материаловедения и безопасности на протяжении последних десятилетий выполняются в РАН, ОЭММПУ РАН и ИМАШ РАН.

Современное развитие фундаментальной теории безопасности обосновывает необходимость изменения традиционных подходов к обеспечению безопасной эксплуатации опасных объектов на новые, перспективные. В их основу должны быть положены нормируемые параметры рисков и безопасности, обосновываемые по критериям надежности, прочности, ресурса и живучести. Ключевым фактором в решении данной проблемы является использование концепции диагностики состояния объектов техносферы и мониторинга рисков возникновения нештатных ситуаций.

С учетом потенциальных опасностей и технологической сложности современных машин и механизмов использование систем диагностики и мониторинга осуществляется для следующих стадий и состояний:

- штатные состояния объектов и нормальные ситуации при эксплуатации;
- опасные аварийные состояния объектов и аварийные ситуации при эксплуатации;
- предельно опасные катастрофические состояния и катастрофические чрезвычайные ситуации.

По мере перехода от штатных (нормальных) состояний к аварийным и катастрофическим характеризуются тремя основными категориями, имеющими соответствующие тенденции:

- рисками, характеризующими рассматриваемые процессы, которые экспоненциально нарастают;
- уровнем и возможностями диагностики состояний, которые существенно сокращаются;
- уровнем мониторинга состояний и рисков, который для катастрофических ситуаций невысок.

Решенные и решаемые в рассматриваемом направлении проблемы характеризуются исторически сложившейся последовательностью формиро-

вания фундаментальных научных основ, разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы, обеспечения их функционирования в заданных пределах проектных режимов и параметров. Базовыми поэтапно повышающимися требованиями к штатному (нормальному) функционированию и проектным параметрам функционирования для уникальных и экстремально нагруженных критически и стратегически важных объектов на всех стадиях их жизненного цикла стали «прочность → жесткость → устойчивость → ресурс → надежность → живучесть → безопасность → риск → защищенность».

При использовании действующих и разработках новых диагностических систем применительно к каждому классу катастроф и каждому типу аварийных ситуаций должны быть выделены следующие разновидности диагностируемых параметров и характеристик:

- характеристики состояния наиболее важных систем потенциально опасных компонентов оборудования в штатных и аварийных ситуациях;
- характеристики повреждающих факторов при возникновении и развитии аварийных ситуаций;
- характеристики состояния конструкционных материалов и их свойств.

К наиболее важным характеристикам и параметрам состояния машин и конструкций относятся имеющие место в их наиболее нагруженных элементах напряжения  $\sigma$  (деформации  $\epsilon$ ), температуры  $t$ , размеры, формы и места возникновения дефектов (трещин)  $l$ , которые изменяются при эксплуатации во времени  $t$ . Эти параметры являются зависящими от реальных условий нагружения (давления  $p$ , механических, тепловых и электромагнитных усилий, скоростей, ускорений), геометрических форм и размеров конструктивных элементов, свойств конструкционных материалов.

При создании систем обеспечения безопасности машин и механизмов на основе развития и комплексного использования систем диагностики и мониторинга их эксплуатационных параметров должны учитываться как степень опасности объектов, типы катастроф и аварийных ситуаций (нормальные условия эксплуатации, отклонения от нор-

мальных условий эксплуатации, проектные аварии, запроектные аварии, гипотетические аварии), так и комплексный набор поражающих факторов и комплексная система критериев безопасности. В качестве реализации такого подхода к решению поставленной задачи должны быть предусмотрены следующие мероприятия:

- разработка методологии анализа и обоснования безопасности по критериям рисков;

- разработка единой системы критериев и параметров риска, живучести, устойчивости и безопасности объектов при возникновении аварий и катастроф;

- создание систем физических и математических моделей образования и развития аварий и катастроф;

- определение и классификация основных параметров поражающих факторов и их воздействий на человека, окружающую среду и сложные технические системы;

- построение и назначение критериев, определяющих безопасность людей, окружающей среды и объектов;

- разработка предложений по структуре унифицированных и специализированных методов диагностики, мониторинга и нормативно-технических документов, регламентирующих риск и безопасность эксплуатации объектов техносферы при техногенных и природных катастрофах.

С учетом анализа общих проблем техногенной безопасности и мониторинга рисков  $R(t)$ , направлений и перспектив развития техносферы обеспечение должного уровня прочности и эксплуатационной безопасности машин и конструкций становится одним из актуальных направлений развития по мере роста рабочих параметров и повышения потенциальной опасности систем «человек-машина-среда». При этом основными задачами дальнейших разработок в этом направлении являются:

- фундаментальные исследования по механике деформирования и по механике катастроф, лежащих в основе создания критериев и методов решения проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности объектов с повышенной потенциальной опасностью техногенных аварийных ситуаций;

- прикладные исследования и разработки инженерных методик, алгоритмов, программ, моделей,

стендов, аппаратуры для расчетно-экспериментального обоснования конструкторско-технологических решений при проектировании, создании, эксплуатации и выводе из эксплуатации высокорисковых машин и конструкций с применением комплексных критериев прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности.

В наибольшей степени актуальность анализа рисков тяжелых катастроф проявляется для критически и стратегически важных объектов, к которым и должны быть применены подходы обеспечения их защищенности и безопасности эксплуатации по изложенным выше методологии и критериям рисков на основе результатов диагностики соответствующих определяющих параметров для условий штатных, аварийных и катастрофических ситуаций.

Результаты техногенной диагностики, мониторинга и испытаний материалов и конструкций в настоящее время являются одними из определяющих факторов при комплексном обосновании прочности, ресурса, живучести и безопасности для всех объектов инженерной инфраструктуры. Основной в этом направлении стоит задача комплексного контроля текущего состояния материалов и конструкций на разных стадиях их жизненного цикла, в связи с чем такой контроль должен стать, по крайней мере, трехцелевым (для обеспечения прочности, ресурса и безопасности) и трехпараметрическим (не разрушающим, повреждающим и разрушающим). Только сочетание указанных видов контроля состояния объектов обеспечит прогресс в решении фундаментальных проблем обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности машин и механизмов на основе диагностики и мониторинга их состояния и рисков с целью защиты от техногенных аварий и катастроф и поддержания заданного уровня приемлемого риска  $R(\tau) \leq [R(\tau)]$ .

Создание и использование систем диагностики состояний и мониторинга рисков для обеспечения условий безопасной эксплуатации объектов техносферы по критериям прочности, ресурса, живучести с соблюдением новых требований к приемлемым уровням эксплуатационных рисков и к защите этих объектов от тяжелых катастроф составляют суть перехода на новый уровень государственного стратегического планирования, отвечающего стратегии национальной безопасности.

## АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СТАТИЧЕСКОГО И МАЛОЦИКЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ С УЧЁТОМ РАССЕЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И НАГРУЖЕНИЯ

Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный, Д.О.Резников

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [v.zatsar@mail.ru](mailto:v.zatsar@mail.ru)

**Аннотация.** Проведено сопоставление детерминированного и вероятностного подхода к анализу статической и малоцикловой прочности и долговечности. Показаны диапазоны изменения вероятностей разрушения при изменении коэффициентов вариации эксплуатационных напряжений и характеристик основных механических свойств.

**Ключевые слова:** статическое и малоцикловое разрушение, рассеяние механических свойств, надёжность, вероятностные запасы прочности.

При традиционном детерминированном нормативном подходе статическая и малоцикловая прочность и долговечность материалов и конструкций обеспечивались введением необходимых коэффициентов запаса  $n_\sigma$  в заданных предельных состояниях с использованием расчётных эксплуатационных напряжений  $\sigma^p$  и критических характеристик механических свойств  $\sigma_c$ . Учитывая реальную случайную природу прочности и долговечности, а также случайный характер эксплуатационных нагрузок, в расчётах используются вероятностные методы анализа и показатели (критерии) теории надёжности по параметрам вероятности  $P$  [1-3].

$$\bar{n}_\sigma = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{\sigma}^p}, \quad n_{\sigma_p} = \frac{(\sigma_c)_p}{(\sigma^p)_p} \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  – предельное разрушающее напряжение с заданным уровнем вероятности  $P$ ,  $(\sigma^p)_p$  – эксплуатационное напряжение с тем же параметром  $P$ . При уточнённых оценках статической прочности обычно принимают, что нагрузки  $\sigma^p$  и прочность  $\sigma_c$  являются независимыми не коррелируемыми случайными величинами, распределёнными по нормальному закону.

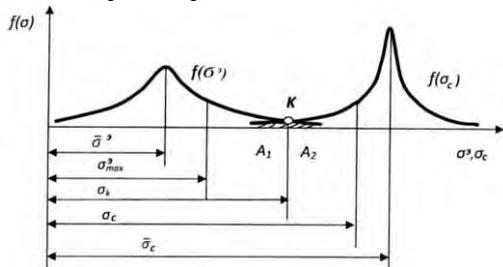


Рис. 1. Кривые плотности распределения нагрузки  $f(\sigma^p)$  и несущей способности  $f(\sigma_c)$

Пересечение кривых плотностей распределения нагрузки и несущей способности соответствует вероятности разрушения  $P_k$  (рис. 1).

Тогда вероятность неразрушения  $P_{(n)}$  несущего элемента будет равна [4]

$$P_{(n)} = 1 - P_{(разр)}, \quad (2)$$

$$P_{разр} = \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{\bar{n} - 1}{\sqrt{v_\sigma^2 + \bar{n}^2 v_\sigma^2}} \right) \quad (3)$$

где  $v^\sigma = v_{\sigma^p}$  и  $v_c = v_{\sigma_c}$  – коэффициенты вариации эксплуатационной нагрузки и прочности,  $\bar{n}$  – коэффициент запаса в (1).

С целью оценки взаимосвязи параметров рассеяния ОМС  $\sigma_{c_p}$  и нагруженности  $\sigma_p^p$  на долговечность и запасы по долговечности были также проведены расчётные исследования вероятностных кривых малоцикловой усталости стали 38ХНЗМФА при 20<sup>0</sup>С [3,5].

При варьировании не только основных механических свойств, но и эксплуатационной нагруженности (с коэффициентами вариации напряжений от 0,01 до 0,1) исчерпание суммарного запаса по долговечности 10 происходит в диапазоне малых вероятностей (примерно от  $3 \cdot 10^{-11}$  до  $2 \cdot 10^{-10}$ ) в зоне долговечности  $10^1 - 10^3$  циклов [5].

Такой подход в дальнейшем позволит определять уточнённые вероятностные характеристики прочности и проводить оценку рассеяния малоцикловых долговечностей, запасов и остаточного ресурса.

Изменение вероятностных циклических запасов прочности  $n_\sigma$  и долговечности  $n_N$  по (1) для заданных вероятностей разрушения  $P$  оценивалось для теплостойкой стали 25Х1МФ при 20<sup>0</sup>С по моменту образования трещин  $N_0$ .

$$\bar{n}_N = \frac{\bar{N}_0}{N^p}, \quad n_{N_p} = \frac{(N_0)_p}{(N^p)_p} \quad [4]$$

Оценка рассеяния долговечности проводилась по [3] с введением в уравнение вероятностных значений ОМС ( $\sigma_b, \psi_k, \sigma_{-1}, E$ ).

Исследовались вариации долговечностей  $N_0$  и относительных коэффициентов запаса  $\bar{n}_N$  и  $\bar{n}_\sigma$

(применительно к принятым нормативным запасам 2 и 10) для следующих возможных гипотетических зависимостей между соответствующими группами свойств ОМС (различные сочетания свойств прочности и пластичности) (Рис.2).

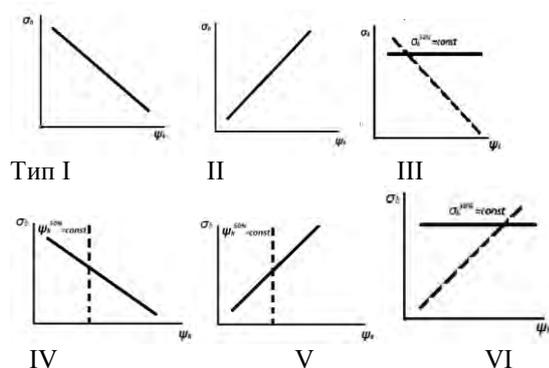


Рис.2. Схемы возможных сочетаний между основными группами свойств прочности и пластичности

При этом при принятых расчётных уравнениях, коэффициентах вариации механических свойств и связях между  $\sigma_B$  и  $\psi$  для набора вероятностей  $P$ , равных 0,001; 0,01; 0,5; 0,99; 0,999, максимальный разброс долговечностей в малоцикловой области для типа I составлял до 15 раз, а по амплитудам  $\sigma_a$  до 3,5 раза.

Проведенная оценка относительных коэффициентов запаса  $\tilde{n}_N$  и  $\tilde{n}_\sigma$ , изменяющихся для данных вероятностей и чисел циклов для типа I, дало диапазоны их изменения для малоцикловой области от 0,28 при  $P=0,001$  до 4,1 при  $P=0,999$ , а для  $\tilde{n}_\sigma$  соответственно от 0,53 до 1,8 при тех же вероятностях разрушения.

Таким образом, вариация механических свойств  $v_{омс}$  существенно сказывается на вероятностных характеристиках циклического ресурса и циклической прочности.

Подобный вероятностный анализ изменения запасов прочности и долговечности для материалов с различными типами связей между характеристиками прочности и пластичности был использован для уточнения вероятностей разрушений, входящих в параметры рисков для АЭС с ВВЭР [6].

1. Ржаницин А.Р. Расчёт сооружений с учётом пластических свойств материала. М.: Стройиздат, 1954.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчёт на прочность деталей машин. Справочное пособие. Под общей ред. докт. техн. наук И.А.Биргера. Изд. 2-ое, исправл. и дополн. М.: Машиностроение, 1966. - 616 с.
3. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: Фундаментальные и прикладные исследования/Н.А.Махутов. Новосибирск: Наука,2008.-528 с.
4. Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный, Д.О.Резников. Особенности статистических подходов при оценке статической прочности. Безопасность в техносфере, 2014, №2, с.33-39
5. Махутов Н.А., Зацаринный В.В. Обоснование безопасности по параметрам рассеяния основных механических свойств, нагруженности и запасов прочности. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. №3, 2009. С.29-43
6. Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный. Исследование вероятностных характеристик деформирования и разрушения корпусных сталей./ Материалы двенадцатой Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» Санкт-Петербург, ЦНИИ КМ Прометей, 5-8 июня 2012 г., т. II.- С.163-175

## ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ В ЗОНАХ РАЗНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ МАЛОЦИКЛОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН

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

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [I.V.Makarenko@yandex.ru](mailto:I.V.Makarenko@yandex.ru)

**Аннотация.** С использованием деформационных критериев нелинейной механики разрушения на основе расчетно-экспериментальных подходов и численных методов решения дана оценка прочности и ресурса элементов конструкций с учетом кинетики объемности напряженно-деформированного состояния по контуру малоцикловых поверхностных полуэллиптических разно-ориентированных трещин.

**Ключевые слова:** наклонные полуэллиптические трещины, малоцикловое нагружение, упругопластические деформации, анизотропия свойств, поверхность разрушения, объемность напряженно-деформированного состояния, ресурс, живучесть оборудования АЭС.

Прочность, живучесть и ресурс элементов ответственного оборудования регламентируется разрушением развивающегося при упругих или пластических деформациях. Начальный этап разрушения состоит в зарождении и развитии микродефектов рассеянных по объему тела, которые в дальнейшем формируются в макротрещину, развитие которой и определяет живучесть элемента конструкции.

Так как трещина в материале может располагаться произвольным образом по отношению к главным напряжениям, то в работе исследовалось напряженно деформированное состояние (НДС) вблизи контура наклонных, полуэллиптических трещин.

С помощью программных комплексов проведены численные исследования НДС. На рис.1 приведена характерная картина упругопластических деформаций вблизи самой глубокой точки (эллиптический угол  $\varphi = \pi/2$ ) полуэллиптической наклонной трещины под углом  $45^\circ$  к первому главному напряжению. Показано хорошее совпадение с экспериментальными результатами.

Получены функциональные зависимости моделирования траектории развития поверхностей полуэллиптических наклонных поверхностных трещин. Зависимости размахов относительных коэффициентов интенсивности деформаций в упругопластической области номинальных нагружений по моделям разрушения  $i=I, II, III$ .

$$\left( \Delta \bar{K}_i^{*(k)} \right)_\varphi = f_2(\bar{e}_n, \Delta \bar{e}_{in}, b, a, b/a, b/t, \beta^*, r^*, \varphi, k, m_k), \quad (1)$$

где  $\bar{e}_n, \Delta \bar{e}_{in}$  - относительные номинальные и локальные вблизи контура трещины упругопластические деформации;  $b_i, a_i$  - полуоси трещины;  $t, \beta^*, r^*, \varphi, m, k, m_k$  - геометрические характеристики трещины, образца и параметры деформирования материала с учетом малоцикловой анизотропии. При этом учтена на базе экспериментальных данных объемность номинального напря-

женно-деформированного состояния  $\tilde{V}^* = V_{b^*} / V_{a^*}$  (где  $V_{b^*}, V_{a^*}$  - соответственно, скорости роста трещины в направлении расчетных полуосей  $b^*$  и  $a^*$  от числа циклов нагружения).

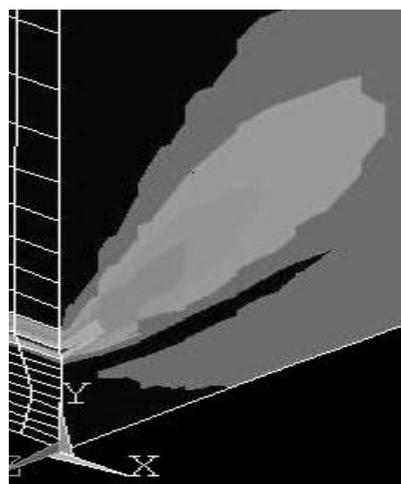


Рис. 1. Характерная картина упругопластических деформаций вблизи самой глубокой точки полуэллиптической наклонной трещины.

$$\tilde{V}^* = \left( A_1 - A_2 \left( \frac{\sigma_{bi}}{\sigma_{Ti}} \right)^2 \right) \cdot \left( \frac{b^*}{t} \right)^{\left( A_3 - A_4 \left( \frac{\sigma_{bi}}{\sigma_{Ti}} \right) \right) \cdot (A_5 + A_6 \bar{e}_{fi})}, \quad (2)$$

$t$  - толщина образца;  $\sigma_{bi}, \sigma_{Ti}$  - соответственно локальный предел прочности и текучести материала в  $i$  - зоне;  $\bar{e}_{fi}$  - относительная разрушающая деформация в локальной зоне трещины, которая равна  $\bar{e}_{fi} = \bar{e}_c D_e / I$ ;  $\bar{e}_c$  - относительная разрушающая местная деформация для гладкого образца.  $A_1 - A_6$  - расчетно-экспериментальные характеристики материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-08-00839-а).

## РАЗВИТИЕ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СТАЛИ ЛИТЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Г.В. Москвитин, С.Г. Лебединский, М.С. Пугачёв М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; [moskvitin@imash.ru](mailto:moskvitin@imash.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты расчётно-экспериментального исследования закономерностей развития усталостных трещин в низколегированной литой стали 20ГФЛ при нерегулярном нагружении с целью определения различных стадий накопления повреждений (изменения скорости) по мере развития трещины.

**Ключевые слова:** усталостные трещины, нерегулярное нагружение, растягивающие перегрузки.

С увеличением уровня коэффициента интенсивности напряжений (КИН) влияние растягивающих перегрузок на скорость роста усталостных трещин может быть разделено на стадии. Для определения их проведены экспериментальные исследования. Они выполнены на компактных образцах для внецентренного растяжения размера 125x120x10мм. (ГОСТ 25.506-85), вырезанных из надрессорной балки грузового вагона. Схема вырезки и методика испытаний приведены в [1]. Испытания проведены на электрогидравлическом стенде SHIMADZU (controller 4830) с максимальным усилием 50 kN. Ранее [1] для этого материала и на таких же образцах получена полная кинетическая диаграмма усталостного разрушения (КДУР) при регулярном циклическом нагружении. В настоящей работе основная нагрузка на образец оставалась с постоянными параметрами цикла:  $P_{max}=15$  kN;  $P_{min}=7$  kN. По мере роста трещины прикладывались однократные перегрузочные циклы с уровнем перегрузки  $Q = P_{max}^n / P_{max} = 1,73$  (6 перегрузок) и  $Q=2,1$  (одна перегрузка) (рис.1), где  $P_{max}^n$  – максимальное усилие в перегрузочном цикле. Очередная перегрузка прикладывалась после выхода трещины из области влияния предыдущей перегрузки. То есть, когда скорость трещины от основного уровня нагружения достигала величины скорости на КДУР при соответствующих значениях параметров цикла КИН. Выбор таких величин нагрузок и их чередование сделан из рассмотрения типовых эксплуатационных процессов нагружения тележек грузовых вагонов.

На экспериментально полученной зависимости длины трещины  $L$  от числа циклов нагружения  $N$  (кривая  $b$ - на рис. 1) можно выделить две области. Первая, где перегрузки оказывают резко выраженный (скачкообразный) характер замедления роста трещины. Трещина в этом случае не имеет видимого на поверхности образца роста в течении нескольких сотен тысяч циклов. И вторая область, начиная с  $K_{max}=27$  МПа $\sqrt{м}$  и  $K_{max}=15,58$  МПа $\sqrt{м}$ , при коэффициенте асимметрии  $R=0,47$  (после перегрузки 3), где развитие трещины идёт со значительно меньшим выражением дискретности задержек, что определяется, сравнительно, гладкой функцией  $L(N)$ . Если для “гладкого” участка зависимости  $L(N) \geq 0,036$ м. (рис.1) определить регрессионное уравнение скорости роста трещины  $V$

от амплитуды КИН в виде зависимости Пэриса, то оно имеет вид:  $V=1,489 \cdot 10^{-10} \cdot (\Delta K)^{4,025}$ ; [м/цикл - МПа $\sqrt{м}$ ]

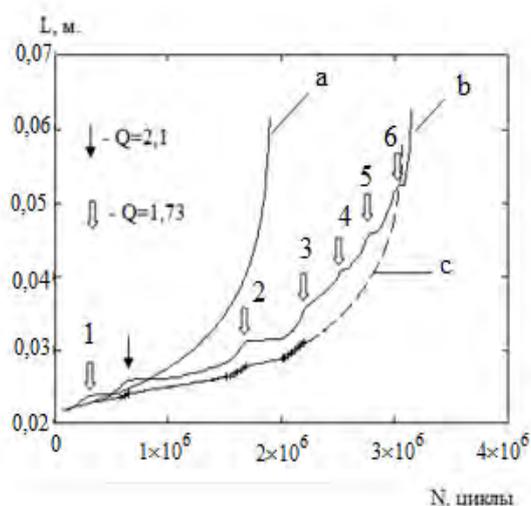


Рис. 1 Зависимость длины трещины  $L$  от числа циклов нагружения  $N$ ; а- расчётная, по КДУР без учёта влияния перегрузок; б - экспериментальная; с- расчётная, с учётом стадий развития;

и сравнить эту зависимость со стандартной КДУР, представленной так же в виде уравнения Пэриса, для того же интервала изменения КИН:

$$V=3,581 \cdot 10^{-10} \cdot (\Delta K)^{4,038}; \text{ [м/цикл - МПа}\sqrt{\text{м}}]$$

то можно видеть, что закономерность развития трещины при процессе нагружения с перегрузками  $Q=1,73$  можно, достаточно точно, определить по КДУР, корректировкой только первого множителя (параметра «С» в уравнении Пэриса). В данном случае он должен быть уменьшен в 2,4 раза.

**Выводы.** В полученной закономерности развития трещины при нерегулярном нагружении наблюдаются две стадии развития. Первая стадия, при  $1/K \cdot dK/dL \leq 0,026$  м $^{-1}$  и  $J \leq 0,0501$  МН/м, здесь расчёт требует проведения тестового эксперимента [1]. Моделирование роста трещины на второй стадии, при  $1/K \cdot dK/dL \geq 0,026$  м $^{-1}$  и  $J \geq 0,0501$  МН/м возможно при использовании смещённой КДУР, что упрощает задачу прогнозирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Грант №12-08-01008ф)

1. Москвитин Г.В., Лебединский С.Г. Влияние перегрузок на развитие усталостных трещин в литых деталях железнодорожных конструкций. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2010. № 5. С. 145-152.

## КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОПОРОШКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.В. Москвичев

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра СО РАН,  
Красноярск, Россия; [sktb@ksc.krasn.ru](mailto:sktb@ksc.krasn.ru)

Достижения конструкционного материаловедения (физика прочности, теории прочности, механика деформирования и разрушения, металловедение, механика структурно-неоднородных материалов) являются основой решения проблем безопасности технических систем (ТС). Взаимосвязь требований к материалам, конструкциям и технологиям их производства определяют единые требования к безопасности ТС и необходимость решения прямых и обратных задач материаловедения. Прямые задачи - создание новых материалов с повышенными характеристиками механических свойств и трещиностойкости для определенного класса ТС. Обратные задачи - разработка материалов с заданными характеристиками структуры и свойств для перспективных и специальных по функциональному назначению ТС. В рамках данных постановок выполнены комплексные исследования структуры, характеристик механических свойств, трещиностойкости и предельных состояний ряда конструкционных материалов [1-3].

Классификация конструкционных материалов в связи с назначением технических систем, причин отказов и разрушений позволили выделить три группы предельных состояний материалов и элементов конструкций: основные, дополнительные и предельные состояния аварийных ситуаций. С целью идентификации предельных состояний разработаны экспериментальные и расчетные методы механики деформирования и разрушения, обеспечившие унификацию методов испытаний на трещиностойкость.

В связи с созданием техники и конструкций для Сибири и Крайнего Севера, проведены исследования сопротивления разрушению малоуглеродистых и низколегированных сталей с определением критических значений характеристик трещиностойкости и оценкой влияния температурного, геометрического и технологического факторов для различных условий нагружения. Представлены результаты системных исследований характеристик трещиностойкости сварных соединений и элементов конструкций. Выполнен анализ технологической дефектности сварных конструкций, определены функции распределения характеристик механических свойств и трещиностойкости, диаграммы циклической трещиностойкости различных зон сварных соединений. Разработан алгоритм, вычислительные технологии и программный комплекс, обеспечивающие на базе статистической информации реализацию концепции ресурс-

ного проектирования сварных конструкций с построением расчетных кривых усталости, функций надежности, полных вероятностных диаграмм живучести и ресурсных поверхностей. Испытания сталей на сопротивление слоистому растрескиванию показали, что их классификация по величине относительного сужения в Z-направлении и процентному содержанию серы не позволяет идентифицировать склонность сталей к слоистому растрескиванию. Сформулированы требования по допускаемым значениям характеристик трещиностойкости для слоисто-хрупких и слоисто-вязких разрушений, определяемые по величине критической деформации в Z- направлении.

Исследованы структура, кинетика разрушения, характеристики механических свойств и трещиностойкости:

- переходных зон биметаллов различных композиций для оборудования химических производств и атомной энергетики;
- алюминиевых сплавов авиационной техники с формированием базы данных для практической реализации расчетов на трещиностойкость;
- бороалюминиевого композита для ферменных конструкций космических аппаратов;
- конструкционной керамики на основе оксида алюминия с использованием нанопорошков, полученных взрывным синтезом.

Разработаны и практически апробированы нанопорошковые технологии, обеспечивающие повышение качества изделий машиностроения (модифицирование алюминиевых деформируемых и литейных сплавов, технологии поверхностной обработки и окраски литейных форм).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № НК 14-08-31555\14) и по проектам программ фундаментальных исследований СО РАН.

1. Москвичев В.В.. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений – Новосибирск: Наука, 2002. 106 с.

2. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем – Новосибирск: Наука, 2002. 334 с.

3. Москвичев В.В., Крушенко Г.Г., Буров А.Е. и др. Нанопорошковые технологии в машиностроении. – Красноярск: СФУ. 2013. 186 с.

## СРАВНЕНИЕ УПРУГОГО И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ

Г.П. Никишков

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [nikishkov@imash.ru](mailto:nikishkov@imash.ru)

**Аннотация.** Двухпараметрический критерий разрушения  $J$ - $A$  позволяет учесть зависимость вязкости разрушения от параметра стеснения деформации  $A$ . С использованием этого критерия сделаны оценки консервативности упругого подхода при расчете упругопластических тел с трещинами.

Универсальный параметр механики разрушения  $J$ -интеграл применим как в упругой, так и в упругопластической области. Расчеты по методу конечных элементов показывают, что упругопластические значения  $J$ -интеграла всегда выше, чем его упругие величины при той же нагрузке. Если сравнивать упругопластический  $J$ -интеграл с вязкостью разрушения при плоской деформации, то упругий расчет на сопротивление разрушению во всех случаях является неконсервативным.

Очевидно, что вязкость разрушения при упругопластическом деформировании меняется с ростом нагрузки. Количественно этот эффект может быть учтен в двухпараметрическом критерии разрушения, где параметр стеснения деформации отвечает за изменение вязкости разрушения.

Корректное описание распределения упругопластических напряжений в окрестности вершины трещины дается трехчленным асимптотическим разложением, которое контролируется двумя параметрами  $J$  и  $A$  [1]. Параметр  $A$  может трактоваться как параметр стеснения деформации. Разрушение происходит в момент, когда расчетное значение  $J$ -интеграла достигает вязкости разрушения  $J_C(A)$ , соответствующей той же, что и в образце, величине параметра стеснения деформации  $A$ .

Использование зависимости вязкости разрушения от параметра стеснения деформации  $A$  позволяет сравнить количественно упругий и упругопластический подходы к определению момента старта трещины и выяснить какой из них более консервативен при определенных условиях. Будем формулировать критерии разрушения в терминах коэффициентов интенсивности напряжений. В упругой постановке критерий целостности конструкции имеет вид  $K_e < K_{IC}$ , а в упругопластической области  $K_{ep}|_A < K_C(A)$ . Введем отношения  $m_{ep} = K_{ep} / K_e$  и  $m_C = K_C(A) / K_{IC}$ . Тогда упругопластический критерий разрушения представляется в виде  $m_{ep} K_e < m_C K_{IC}$ . Последнее означает, что упругий подход к расчету на сопротивление разрушению является консервативным при условии  $m_{ep} / m_C < 1$ .

На рис.1 представлено изменение вязкости разрушения  $K_C$  при росте параметра стеснения  $A$

(для нормализации использована величина  $A_{SSY}$  – значение параметра стеснения при маломасштабном пластическом течении). График получен путем пересчета экспериментальных данных работы [2].

Конечноэлементные расчеты величин  $K_e$ ,  $K_{ep}$  и  $A$  проведены для типичных образцов, после чего сделаны оценки коэффициента консервативности упругого решения  $m_{ep}/m_C$ , которые показаны на рис.2 для образца на трехточечный изгиб. Для коротких трещин с относительной длиной  $a/W < 0,3$  упругий подход дает консервативную оценку разрушающей нагрузки, для трещин большей длины – неконсервативную.

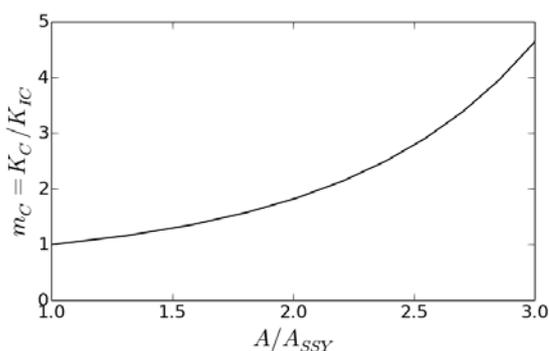


Рис. 1. Зависимость вязкости разрушения  $K_C$  от параметра стеснения деформации  $A$ .

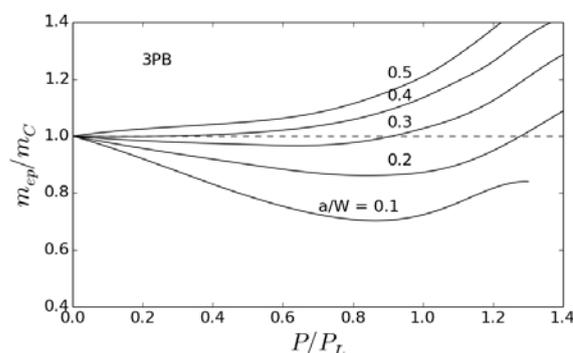


Рис. 2. Консервативность упругого подхода  $m_{ep}/m_e$  как функция нагрузки для образца на трехточечный изгиб.

1. Nikishkov G.P. An algorithm and a computer program for the three-term asymptotic expansion of elastic-plastic crack tip stress and displacement fields // Eng. Fract. Mech. 1995. V.50. P. 65—83.
2. Sumpter J.D.G. An experimental investigation of the T stress approach // ASTM STP 1171, 1993. P. 492—502.

## О КАЧЕСТВЕ МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

О.Г.Новоженова

ИМАШ РАН, Москва, Россия [info-viniti@yandex.ru](mailto:info-viniti@yandex.ru)

**Аннотация.** Дан исторический обзор отечественных моделей, используемых для описания внутреннего трения, обусловленного релаксацией и гистерезисом. Особое внимание уделено малоизвестным публикациям незаслуженно забытого А.Н.Герасимова [1-5], М.И.Розовского [6,8,13] и Т.Д.Шермергора [9-12,13], перекликающихся со статьей Ю.Н.Работнова «Равновесие упругой среды с последствием» [7][13].

Степень точности исходных физических зависимостей при прочих равных условиях определяет качество решения конкретных задач. Построением уравнений состояния и их анализом занимался **А.Н.Герасимов**. В [1] с использованием дискретизации времени в уравнении Вольтерра и метода Прони описаны вынужденные колебания анизотропной нити, доказана единственность решения [1-2]. Определен элевтероз- постепенное освобождение основного тона от сопутствующих обертонов вследствие внутреннего трения, доказанный и для малых колебаний упруго-вязких мембран [4]. Эффект элевтероза позволяет в найденном решении ограничиваться лишь конечным числом членов. В частности, «можно было бы применить акустический метод к практическому определению модуля сдвига и коэффициента внутреннего трения (кстати, позволяющего вычислять время релаксации по модели Максвелла)». В [3] построен тензор обобщенного закона Ньютона-Гука для упруго-вязких деформаций, получены интегральные уравнения Навье-Стокса. В [5] А.Н.Герасимов ввел

дробную производную при построении модели вязко-упругости (типа модели Скотта-Блэра) в отличие от Ю.Н.Работнова [7], использовавшего интегральные операторы Вольтерра со слабо сингулярными ядрами, которые можно выразить в терминах дробных интегралов и производных.

**М.И.Розовский** [6] с использованием метода Галеркина, тождества Вольтерра и способа Прони получил решения для вынужденных поперечных колебаний стержня [1], полого шара (сферы) и плиты. В [8] дан обзор работ по изучению свойств нелинейных функционалов Вольтерра и их аппроксимаций. В дальнейшем он разработал [13] практически всю математику Э-функций Ю.Н.Работнова.

**Т.Д.Шермергору 22 октября т.г. исполнилось бы 85 лет.** Сын репрессированного иностранного специалиста, воспитанник детдома в 1966г. защитил докторскую диссертацию «Вопросы теории механической релаксации в твердых телах» в МГПИ и работал в МИЭТ. Его работы по внутреннему трению [9-13] актуальны по сей день, в т.ч. монография «Пленочные пьезоэлектрики» (1986).



1. Герасимов А.Н. Проблема упругого последствия и внутреннее трение. // ПММ.- 1937(I), вып.4, 493-536
2. Ишлинский А.Ю. Заметка к статье А.Н.Герасимова «Проблема упругого последствия и внутреннее трение». // ПММ.-1937(III), вып.2, 163-164
3. Герасимов А.Н. Основания теории деформаций упруго-вязких тел. // ПММ-1938(II), вып.3, 379-388
4. Герасимов А.Н. К вопросу о малых колебаниях упруго-вязких мембран. // ПММ.- 1939(II), вып.4, 467-486
5. Герасимов А.Н. Обобщение линейных законов деформирования и его применение к задачам внутреннего трения. // ПММ.- 1948 (XII), вып.3, 251-260 [доложено 29.05.1947 на семинаре в Институте Механики АН]
6. Розовский М.И. Приложение интегро-дифференциальных уравнений к некоторым динамическим задачам теории упругости при наличии последствия. // ПММ.-1947(XI), вып.3, 329-338
7. Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием. // ПММ.-1948(XII), вып.1, 53-62

8. Розовский М.И. Функциональные уравнения состояния материалов с памятью. /Аналитические возможности метода внутреннего трения. АН СССР, АН ГССР, Институт металлургии, под ред. Тавадзе Ф.Н. Постникова В.С. , «Наука», Москва, 1973, 19-28
9. Шермергор Т.Д., Постников В.С. Температурная релаксация в твердых телах. /Релаксационные явления в металлах и сплавах. Труды III всесоюзной конференции под ред. В.С.Постникова. Воронежский политех Ин-т.Металлургиздат, Москва, 1963, 27-30.
10. Шермергор Т.Д. К феноменологической теории внутреннего трения. /Релаксационные явления в металлах и сплавах. Труды III всесоюзной конф. Воронежский политех. Ин-т.Металлургиздат, Москва, 1963, 33-39
11. Шермергор Т.Д., Мешков С.И. Феноменологическое описание высокотемпературного внутреннего трения. /Релаксационные явления в металлах и сплавах. Труды III всесоюзной конференции Воронежский политех. ин-т. Металлургиздат, Москва, 1963, 46-52.
12. Мешков С.И., Шермергор Т.Д. О высокотемпературном внутреннем трении при продольных колебаниях // ПМТФ.-1963, № 3, 20-25.
13. Новоженова О.Г. Воспоминания о функционалах Вольтерра, дробно-эксп. функции Работнова, Миттаг-Леффлера и вырожд. гипергеометрической функциях. //Наследств. механика деформ. и разрушения твердых тел – научн. насл. Ю.Н.Работнова-/Труды конф. 24-26 февраля М.: ИМАШ РАН. -2014 ,113-118

## НОРМИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ

А.Н. Панов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [a.panov@tut.by](mailto:a.panov@tut.by)

**Аннотация.** Рассматривается методология нормирования процессов проектирования и разработки продукции и процессов изготовления мобильных машин и их элементов на основе обеспечения приемлемых рисков.

**Ключевые слова:** нормирование, безопасность, риск, наземные транспортные средства, проектирование, процессы, изготовление, подтверждение соответствия, жизненный цикл

Цель работы - научно обосновать, создать и реализовать на практике методологию, модели и средства нормирования безопасности наземных транспортных средств (НТС) из условий прочности на этапах проектирования и изготовления для их эффективного серийного производства и эксплуатации.

На основе метода системно-комплексного упорядочения и оптимизации требований в работе установлены требования к целевой функции нормирования – достижение эффективности (положительный результат от использования и затраченные ресурсы в жизненном цикле) для заинтересованных сторон (потребителя, производителя, поставщика и т.д.), при обеспечении приемлемых рисков (заданный и минимально допустимый риск несоответствия машины установленным требованиям) путем задания ограничений на вектор нормируемых параметров и область его допустимых значений [1-5].

В работе развиты и разработаны: уточненная классификация критериев потери безопасности и надежности НТС и ее элементов, в основе которой серьезность последствий для системы в случае несоответствия элемента требованиям; терминологический аппарат; модели нормирования технических требований, методов экспериментальной оценки параметров безопасности, надежности (критерии прочность, износостойкость) машин, анализа надежности технологических процессов изготовления. Модель процесса нормирования содержит соответственно, этапы определения: требований к конфигуратору; развертывание функций качества на основе построения деревьев для множественных отказов – «дерево функций – конструкции (процесса) – дефектов – причин» для различного типа машин, их элементов, дальнейшего тиражирования и документирования требований. Установлена структурная связь требований, определенных для соответственно высшего, среднего и низшего уровней анализа НТС ее компонентов, и их логическое взаимодействие с позиции приемлемости риска (риски для конфигулятора и продукции, установленные в НД, а также заданные в ТУ).

Модель нормирования включает следующие множества: а) Идентификация терминов и соответствующих определений, в том числе в виде ссылок, базы данных, базы знаний; б) Определение содер-

жательной модели высшего уровня, массивы всех и нормируемых его параметров; в) Рассмотрение стадий жизненного цикла продукции; г) Определение «выходных параметров» - параметров продукции, не выполнение которых является возможной причиной несоответствий конфигулятора; д) Регламентирование границ применения; е) Определение массива вероятности появления неблагоприятного события; ж) Установление однозначных схем, расчетных случаев, методов проведения испытаний типа продукции для конструктивного исполнения; з) Осуществление неразрывной цепи статистических доказательств; и) Развертывание функций обеспечения надежности и безопасности от типа продукции к процессам тиражирования; к) Регламентирование производства без установления способа достижения цели; л) Задание критериев: документирования результатов контроля  $D(t)$  (7.28); м) Подтверждение типа изделия и системы управления в машиностроительном производстве.

Разработанный комплекс моделей, методов и средств позволяет обосновывать и осуществлять нормирование надежности, безопасности конструкции и надежности процессов изготовления НТС использован при разработке серии ГОСТ и СТБ, вошедших, в том числе, в перечни продукции подлежащей обязательной сертификации и в Технический регламент Таможенного союза.

1. Безопасность России. Том 2. Часть II. Обеспечение защищенности критически важных объектов от чрезвычайных ситуаций. / Под общ. ред. Махутова Н.А. - М.: МГФО «Знание», 2012, - 588 с.
2. Горбачевич, М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс/ М.И. Горбачевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общей ред. А.Н. Панова. – Мн.: «Технопринт», 2005г. -264 с.:ил.
3. Панов, А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении/ А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрцов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общей ред. А.Н.Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.:
4. IEC 60300-1/Ed3: Dependability management- Part 1: Guidance for management and application, 2014
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные исследования проблем техногенной безопасности. / Под общ. ред. Махутова Н.А. - М.: МГФО «Знание», 2013, - 576 с.

## УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ. ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР

А.Н. Панов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [a.panov@tut.by](mailto:a.panov@tut.by)

**Аннотация.** Рассматривается методология управления рисками процессов проектирования и разработки продукции и процессов изготовления машин и их элементов на основе обеспечения приемлемых рисков возникающих от действий персонала – «человеческого фактора».

**Ключевые слова:** нормирование, безопасность, риск, человеческий фактор, проектирование, процессы, изготовление, подтверждение соответствия, жизненный цикл

Цель работы - научно обосновать, создать и реализовать на практике методологию, модели и средства управления рисками, возникающими от действий персонала участвующего в проектировании, разработке, изготовлении, эксплуатации и утилизации продукции машиностроения. На основе метода системно-комплексного упорядочения и оптимизации требований в работе установлены требования к целевой функции нормирования – достижение эффективности (положительный результат от использования и затраченные ресурсы в жизненном цикле) для заинтересованных сторон, при обеспечении приемлемых рисков путем задания ограничений на вектор нормируемых параметров и область его допустимых значений действий персонала участвующего в проектировании, разработке, изготовлении, эксплуатации и утилизации продукции машиностроения и высокотехнологичных отраслей экономики [1-5].

В работе развиты и разработаны: уточненная классификация критериев в основе которой серьезность последствий для системы в случае несоответствия действий персонала требованиям; терминологический аппарат; модели нормирования требований, методов оценки, анализа надежности персонала. Модели, методы и средства основаны на установлении требований: к целеполаганию, к структуре жизненного цикла, к оптимальному вероятностно-детерминистическому упорядочиванию процессов предприятия и проектов; к процессам адаптации системы управления в машиностроительном производстве и проектов; к процессам и к целеполагающим вероятностно-детерминированным процедурам последовательного снятия неопределенности и достижения приемлемого риска в жизненном цикле машины.

Обосновано, что для повышения надежности и безопасности машин необходимо реализовывать процессы доведения вероятности каждой из причин появления «человеческого фактора» каждого из идентифицированных рисков и вариации процессов до приемлемого уровня опережающим, динамическим, актуализируемым, внешним целенаправленным воздействием используя критерии: результативности планирования и обеспечения соответствия требованиям к действиям персонала – адекватную

идентификацию важности параметров продукции и процессов в рамках жизненного цикла предприятия, проектов и продукции в зависимости от серьезности последствий несоответствий и в связи с вероятностями их появления и обнаружения при контроле; эффективности - равенство затрат на предупреждение несоответствий, их контроль и потерь (ущерба) из-за не достижения надежности и безопасности. Разработанный комплекс позволяет предотвращать возникновение неустойчивого равновесия, причин критических состояний и бифуркаций (рис. 1) и как следствие несоответствий машин путем управления рисками от всех идентифицированных причин от действий персонала.

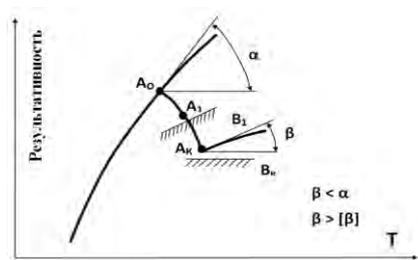


Рис. 1. Стандарты и управления рисками

Разработанный комплекс моделей, методов и средств позволяет обосновывать и осуществлять нормирование управления действиями персонала для высокотехнологичных отраслей экономики. Комплекс использован при разработке серии нормативных документов ГОСТ и СТБ.

1. Безопасность России. Том 2. Часть II. Обеспечение защищенности критически важных объектов от чрезвычайных ситуаций. / Под общ. ред. Махутова Н.А.- М.: МГФО «Знание», 2012, - 588 с.
2. Горбачевич, М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс/ М.И. Горбачевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общей ред. А.Н. Панова. – Мн.: «Технопринт», 2005г.-264 с.:ил.
3. Панов, А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении/ А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрцов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общей ред. А.Н.Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.:
4. IEC 60300-1/Ed3: Dependability management- Part 1: Guidance for management and application, 2014
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные исследования проблем техногенной безопасности. / Под общ. ред. Махутова Н.А.- М.: МГФО «Знание», 2013, - 576 с.

## ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ, ВДАВЛИВАНИЯ И ЦАРАПАНИЯ

Петржик М.И., Бычкова М.Я., Левашов Е.А.

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, [petrzhik@shs.misis.ru](mailto:petrzhik@shs.misis.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены экспериментальные результаты, полученные современными методами изучения функциональных поверхностей в условиях скольжения, вдавливания и царапания при механическом контакте с контртелом более высокой твердости, которые основаны на модели Герца. Приведены и обсуждаются свойства наноструктурных перспективных материалов и покрытий.

**Ключевые слова:** наноструктурные материалы и покрытия, аттестация свойств, механический контакт, скольжение, вдавливание, царапание, деформация, разрушение.

Современные технологии позволяют управлять структурой, составом и свойствами материалов на микронном, субмикронном и нанометровом уровне и создавать материалы и покрытия с направленно модифицированными или «функциональными» поверхностями с повышенным сопротивлением деформации и разрушению.

Аттестация свойств таких поверхностей требует применения специальных видов испытаний [1], которые были успешно внедрены в Испытательной Лаборатории Функциональных Поверхностей (ИЛФП) НИТУ «МИСиС», аккредитованной в ААЦ «АНАЛИТИКА» и «РОСНАНО». Разработаны и аттестованы методики измерительного индентирования, царапания и скольжения, а также государственные стандартные образцы модуля упругости и коэффициента трения.

В докладе рассмотрены современные методы изучения перспективных материалов и покрытий в условиях скольжения, вдавливания и царапания при механическом контакте с контртелом более высокой твердости, которые основаны на модели Герца.

Приведены и обсуждаются экспериментально определенные свойства наноструктурных сверхтвердых покрытий [2], литых микропроводов [3] и других нанокompозитов [4], в том числе износостойких, содержащих квазикристаллы [1, 5], а также сплавов с памятью формы [6], объемных металлических стекол и покрытий на их основе [7].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-03-32700а, 04-03-42741 и 07-02-91562а), Минобрнауки (госконтракт № 16.648.12.3020 и 16.513.11.30.92.).

1. Петржик М.И., Левашов Е.А. Кристаллография. 2007. Т.52. №6. С.1002—1010.
2. Tam E., Petrzhik M., Shtansky D., Delplancke-Ogletree M.-P. J. Mat. Sci Tech. 2009. V.25 P. 63—68.
3. Замяткина Е.В., Петржик М.И. Деформация и разрушение материалов. 2010. №7. С.41—44.
4. Левашов Е.А., Петржик М.И., Тюрина М.Я. и др. // *Металлург*. 2010. №9. 66—74.
5. Шайтура Д. С., Теплов А. А., Чикина Е. А. и др. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 11. 87—91.
6. Levashov E.A., Petrzhik M.I., Shtansky D.V. et al. Mat. Sci. Eng. A. 2013. V.570. P.51—62.
7. Petrzhik M.I., Vakaev P.V., Chueva T.R. et al. J. Metastable and Nanocrystalline Mat. 2005. V.24-25. P.101—104.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛОВ МАШИН ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

И.М. Петрова, И.В. Гадолина

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

**Аннотация.** Предложен метод статистических испытаний для оценки распределения ресурса и накопления повреждений элементов конструкций при действии динамического нагружения в области упругого, упругопластического нагружения и факторов, связанных с износом. Для повышения точности оценки предложено использовать данные о рассеянии характеристик прочности, полученные экспериментально – расчетным методом.

**Ключевые слова:** динамическое нагружение, сопротивление усталости, накопление повреждений, износ, рассеяние характеристик прочности.

Ресурс механической системы определяется достижением накопленных повреждений предельной величины, характеризующей техническое состояние с заданной вероятностью. При решении проблемы безопасности и риска эксплуатации опасных объектов создание многопараметрических моделей необходимо как при оценке значимости различных факторов на протекание деградационных процессов, так и при прогнозировании остаточного ресурса на основании данных о текущем состоянии. В ряде случаев эксплуатационного нагружения имеет место сложное взаимодействие механизмов нагружения и повреждения деталей машин и элементов конструкций по критериям прочности и износостойкости. При этом в зависимости от условий нагружения и среды реализуются различные механизмы накопления повреждений и разрушения.

Циклический характер действующих на объект нагружающих факторов, связанный с переменными составляющими рабочих процессов, периодическими пусками и остановами, возникновением аварийных ситуаций и т. п. приводит к возникновению в наиболее нагруженных местах напряжений, превышающих предел упругости. В этих случаях наряду с явлением многоциклового усталости проявляются процессы свойственные малоциклового усталости. В деталях трибосопряжений в зоне фрикционного контакта, накопление повреждений зависит от уровня изношенности. Суммарное повреждение  $D$ , вносимое этими факторами за некоторый представительный отрезок времени, называемый блоком нагружения, можно определить путем использования линейной гипотезы накопления повреждений [1]:

$$D = D_N + D_e + D_{II} .$$

Здесь  $D_N$  - накопление повреждений при динамическом нагружении (упругое деформирование) - многоциклового усталости;  $D_e$  - накопление повреждений при упруго пластических деформаций - малоциклового усталости,  $D_{II}$  - накопление повреждений от износа при трении.

Критерий (1) был предложен и рассмотрен в работах [1,2], где приведен алгоритм и дана оценка влияния увеличения зазоров в узлах трения на долговечность деталей машин и вероятность появления отказа рассматриваемой конструкции. Оценку вероятности безотказной работы в этом случае удобно проводить путем численного эксперимента, используя оценки характеристик прочности и их рассеяние. Рассеяние характеристик прочности рекомендовано определять с использованием методики, приведенной в [3], согласно которой каждому образцу соответствует своя кривая усталости; это позволяет оценить рассеяние характеристик сопротивления усталости для заданной долговечности по результатам испытаний ограниченного числа образцов. Для примера с использованием Численного моделирования были определены вероятности разрушения шатунов оппозитного компрессора в зависимости от зазоров в сопряжениях из- за износа. Предложенный метод позволяет учесть влияние износа и возможных перегрузок на распределение ресурса.

1. Браун Э.Д., Петрова И.М., Москвитин Г.В. Критерии для оценки долговечности элементов трибосопряжений //Трение и износ, 1998, т.19, № 2, С.176-181
2. Петрова И.М , Москвитин Г.В., Гриб В.В.. Влияние износа на накопление усталостных повреждений // Заводская лаборатория. 2006. № 11.С. 49-52.
3. Петрова И.М., Гадолина И.В. Оценка рассеяния характеристик сопротивления усталости по результатам испытаний ограниченного числа образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 11. с. 50-51.

## ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ (МЦУ) И МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ (МнЦУ) ДЕФОРМИРУЕМЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГТУ ПРИ НАЛИЧИИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

А.Н. Петухов

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», Москва, Россия

Приведен анализ экспериментальных исследований результатов испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) при частоте нагружения  $f \leq 10$  Гц и многоцикловую усталость (МнЦУ) при частоте нагружения  $f \geq 10$  Гц деформируемых и гранулированных никелевых сплавов для дисков турбин ГТУ при наличии концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 1,0 \dots 3,35$  в широком диапазоне температур от 20 до 800°C и асимметрии цикла нагружений от  $R = -1$  до  $R = 0$ .

Показано, что результаты, полученные на образцах, вырезанных из прутков и из заготовок дисков, имеют различия, связанные с особенностями

процесса старения, протекающего в поковке и прутке, т.е. режимы термообработки (снижение температуры старения, увеличение длительности термообработки) существенно влияют на кратковременные характеристики прочности сплава.

Приводятся результаты испытаний сплавов для дисков турбин ГТУ для разных видов нагружения, характерных для условий эксплуатации (растяжение, изгиб) и разных степенях асимметрии цикла нагружения ( $R = 0$ ;  $R = -1$ ) и долговечностях: МЦУ до  $N = 10^5$  циклов, МнЦУ до  $N \geq 5 \cdot 10^7$  циклов в диапазоне температур 20...800°C.

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ ЗВЕНА БАМБУКА И КОМПЗИТНОЙ ТРУБЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ СЖАТИЮ, ИЗГИБУ И КРУЧЕНИЮ

И.С.Плитов, А.Н.Полилов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [plitov@yandex.ru](mailto:plitov@yandex.ru)

**Аннотация.** Критерий многих форм разрушения труб при сжатии, изгибе и кручении, связанных с расщеплением, невозможно сформулировать в форме локальных напряжений. Энергетический критерий разрушения позволяет решить эту задачу, дополнительно предоставляя возможность определения оптимальных размеров труб.

**Ключевые слова:** композитные однонаправленные трубы, бамбук, энергетический критерий разрушения

### Цель

Работа посвящена использованию энергетического критерия разрушения для различных условий нагружения однонаправленных труб.

### Сжатие труб

При сжатии однонаправленных труб наряду с макропотерей устойчивости по Эйлеру или локальным смятием возможно также множественное продольное расщепление с выпучиванием образовавшихся полосок по форме, напоминающей китайский фонарик (Рис. 1). Критерий для последнего вида разрушения не удаётся сформулировать в терминах локальных напряжений, так как материал считается однородным и в нём возникают только напряжения вдоль волокон, а поперечные и касательные напряжения на границе раздела «волокно – матрица» отсутствуют. Следует применять энергетический критерий расщепления [1-3], который (в предположении об отсутствии диссипации энергии и дополнительной работы внешних сил в процессе быстрого разрушения) состоит в том, что разность значений упругой энергии в начальном  $U_0 = \sigma^2 FL / (2E)$  и в конечном  $U_1 = U_c + U_b$  состояниях равна работе расщепления  $A = n\gamma Lh$ , пропорциональной площади поверхности разрушения.

### Изгиб труб

Данный критерий можно использовать и в задаче изгиба, предположив, что в сжатой зоне происходит двойное расщепление с выпучиванием образовавшейся полоски. Отметим интересный пример природной оптимизации биокompозитных трубчатых конструкций - многозвенного ствола бамбука. Результаты расчетов рационального изменения длины звеньев качественно согласуются с реальным строением ствола бамбука, что подтверждает использование Природой принципа равнопрочности с учетом специфического механизма разрушения по форме китайского фонарика (Рис.2).

Анализ процессов расщепления однонаправленных труб позволяет получить простое объяснение одной из загадок Природы: зачем нужны кольца на стволе бамбука и почему они располагаются на определенных расстояниях? Принцип равнопрочности, используемый Природой, может быть применен

при оптимальном проектировании композитных конструкций.

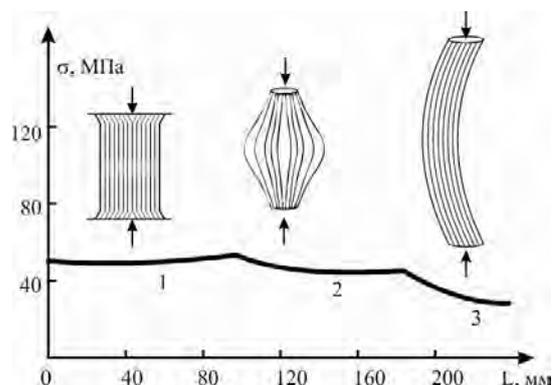


Рис. 1. Зависимости критических сжимающих напряжений  $\sigma$  от длины  $L$  композитных труб для трех видов разрушения

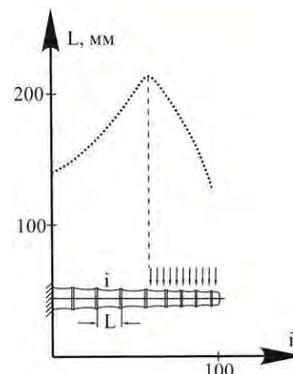


Рис.2 Изменение длин звеньев ствола бамбука по условию равнопрочности

### Ссылки на использованные источники

1. Работнов Ю.Н., Полилов А.Н. О разрушении композитных труб по форме китайского фонарика// Механика композитных материалов, 1983, № 3, с. 548 - 550.
2. Полилов А.Н., Работнов Ю.Н. Развитие расслоений при сжатии композитов// Известия АН СССР. Механика твёрдого тела, 1983, № 4, с. 166 - 171.
3. Полилов А.Н., Погарский М.В. Равнопрочная геометрия многозвенных трубчатых конструкций из однонаправленного композита// Механика композитных материалов, 1990, № 5, с. 884 - 890.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КРИВОЛИНЕЙНОГО АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ПЛАСТИНЫ В ЗОНЕ КРЕПЛЕНИЯ

А.Н.Полилов, А.В.Малахов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [polilovan@mail.ru](mailto:polilovan@mail.ru)

Идеи проектирования структуры волокнистых композитов такие же, как у Природы, создавшей древесину: направленность и неоднородность. Сильные связи (волокна) располагаются вдоль направления основных усилий, а чередование сильных и слабых элементов позволяет задерживать трещины. Сильные связи (волокна) не боятся продольных напряжений, и напротив, слабые связи очень чувствительны к касательным напряжениям. Прямослойная древесина больше боится кручения, а не изгиба. Чтобы ствол дерева сопротивлялся кручению, волокна в нем располагаются по спирали, под некоторым углом – полный оборот вокруг ствола примерно на шести метрах. Поэтому и композиты следует изготавливать с некоторой разориентацией волокон.

Ещё одна важная проблема применения искусственных анизотропных материалов – места крепления. Соединения композитных материалов ни в какое сравнение с природными не идут. Ветку или корень никогда не оторвёшь от ствола – соединение оказывается прочнее самой детали. Одна структура вырастает в другую, волокна не рвутся, а обтекают препятствие. Живой материал «чувствует» приложенную нагрузку и подстраивает под неё свою структуру и форму, реализуя основной принцип равнонапряженности.

Для моделирования биомеханических соединений волокнистых композитов необходимо решить итерационную задачу, состоящую из нескольких этапов. На первом этапе строятся алгоритмы нахождения траекторий наибольших растягивающих напряжений, вдоль которых следует укладывать волокна. На втором этапе надо смоделировать материал, в котором волокна уложены вдоль найденных на первом этапе траекторий. Этот материал имеет неоднородные анизотропные свойства, и в каждой точке направление оси упругой симметрии будет различным. Поле напряжений по результатам расчета второго этапа изменится, и оптимальные траектории укладки волокон придется определять на основе нескольких итераций этапов 1 и 2. На третьем этапе надо с учетом локальных критериев прочности оценить, насколько криволинейная укладка волокон способна повысить несущую способность.

Основной результат расчетов состоит в существенном снижении концентрации напряжений: максимальное напряжение около отверстия с учетом объемной доли волокон при оптимальной структуре армирования становится в 5 раз меньше, чем при однородной прямолинейной укладке. Перегрузка волокон у дна отверстия составляет всего порядка 20%. Очевидно, что снижения влияния концентрации напряжений в узлах крепления можно достичь именно с помощью специальной структуры армирования, согласующейся с полем напряжений.

В итоге можно отметить, что изучение живой природы – это одно из перспективных направлений развития механики неоднородных материалов, которое в будущем станет основой 3-Д технологий создания композитных конструкций, сочетающих в себе прочность, легкость и низкую энергоёмкость изготовления.

Поэтому изучение биомеханических принципов создания прочных композитных структур и соединений кажется весьма интересным, и это направление требует создания новой ветви механики деформирования и разрушения материалов с неоднородной анизотропией, изготавливаемых путем укладки волокон по специальным криволинейным траекториям.

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ НА МЕТАЛЛЫ

Е.А.Правоторова<sup>1</sup>, О.Б.Скворцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

<sup>2</sup>ООО «Диамех 2000», Москва, Россия; [skv@diamrch.ru](mailto:skv@diamrch.ru)

**Аннотация.** Действие импульсов тока на металлы может вызывать в них механические напряжения, приводящие к деформации, а при больших токах и к разрушению образцов. Методика неразрушающего циклического деформирования. Полученные экспериментальные данные и их анализ показывает возможность распространить выводы об устойчивости образцов к длительному циклическому нагружению в виде вибрации. Стоимость и сроки испытаний могут быть существенно сокращены за счет повышения частоты импульсного воздействия и уменьшения количества испытываемых образцов на основе соответствия динамических процессов условию эргодичности.

**Ключевые слова:** вибрация, стационарность, эргодичность, циклическая прочность.

В современном мощном электрооборудовании в качестве нормируемого параметра принята величина ускорения [1]. Рост динамических нагрузок и повреждения элементов конструкций в значительном числе случаев связаны с электромеханическими процессами в элементах обмоток. Один из механизмов появления механических напряжений связан с силами взаимодействия проводников, по которым протекают токи. Другой механизм связан с действием тока на сам проводник [2,3]. Возбуждение колебаний значительной амплитуды при задании импульсного тока позволяет анализировать поведение элементов конструкции обмоток. Такие испытания могут проводиться как на реальных конструкциях, так и на моделях. В данной работе было опробована методика формирования ударных импульсов при прохождении тока через модель стержня обмотки статора мощного генератора в масштабе один к десяти. Использование переносной системы формирования импульсов тока большой величины (до нескольких килоампер) позволило быстро и с малыми затратами провести такие испытания. Контроль возникающих при этом ускорений выполнялся простой системой контроля на основе трехкомпонентных акселерометров, подключаемых к системе сбора данных на основе USB модуля сбора 4431 фирмы NI и компьютера с программным пакетом LabVIEW. Аналогичным образом контроль ускорений позволяет проводить ресурсные испытания [4].

При проведении таких испытаний необходимо обоснование выбора контролируемых параметров и возможностей сокращения объема испытаний. Это связано с тем, что реальное оборудование может работать в условиях очень большого числа циклов нагрузки [5,6]. Возможности сокращения объема испытаний при минимизации количества образцов основано на экспериментальном обосновании эргодичности динамических процессов. Кроме стационарности колебательных процессов при этом важным критерием является стремление автокорреляционных функций к нулю. Простота управления характеристиками импульсов тока позволяет в широких

пределах менять режимы проведения испытаний. Это позволяет в значительной степени удовлетворить требования к методикам проведения испытаний [7].

Исследование статистических свойств последовательностей импульсных воздействий показывает, что происходящие процессы соответствуют критериям стационарности и эргодичности. Это позволяет рассматривать длительные испытания, выполняемые для ограниченного числа образцов, а иногда и одного образца, как эквивалент испытаниям большого количества однотипных изделий в различных режимах. Поскольку испытания проводятся на высокой частоте без использования сложных и сравнительно малонадежных систем формирования механических нагрузок (сам образец является источником механических нагрузок в нем), возможно проведение многоцикловых и гигацикловых испытаний за небольшое время и при низких затратах на оборудование.

1. ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия.

2. Троицкий О.А., и др. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства), том 1 и том 11 Изд-во АНО ИКИ (Москва - Ижевск) 2004 г., 563 стр и 467 с.

3. Троицкий О.А., Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом. Изв. АН СССР, сер. № 6, 1977, с.118 – 122.

4. Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. - Мир, М.: 1976 г., 272 с.

5. Claude Bathias, Paul Croce Paris. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. September 13, 2004 by CRC Press - 328 p.

6. Bokůvka O., etc. Gigacycle Fatigue At High-Frequency Loading. Diagnostyka, 4(48)/2008, p.53-56.

7. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЦЕНАРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.О.Резников,

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия, imashreznikoff@yandex.ru

**Аннотация.** Представлен подход к оценке прочностной надежности сложных технических систем, основанный на проведении сценарного анализа и оценке их локальной и структурной уязвимости. Рассматриваются основанные на данном представлении способы повышения прочностной надежности технических систем

**Ключевые слова:** сложная техническая система, уязвимость, запас прочности, вероятность разрушения, прочностная надежность.

Учитывая высокий уровень неопределенности относительно основных механических свойств конструкционных материалов и действующих нагрузок оценка прочности сложных технических систем (СТС) должна быть вероятностной [1, 2]. В связи с этим вводится понятие прочностной надежности системы  $Re_{sys}$ , под которой понимается вероятность неразрушения системы под действием расчетных режимов эксплуатационного нагружения. Величина прочностной надежности может быть оценена как дополнение до 1 вероятности разрушения рассматриваемой системы  $P(F_{sys})$ :

$$Re_{sys} = 1 - P(F_{sys}). \quad (1)$$

Сложные технические системы характеризуются сложной структурой и сложным характером взаимодействия между конструктивными элементами (КЭ). Указанное взаимодействие выражается, в частности, в способности СТС перераспределять нагрузки и сопротивляться каскадному разрушению после того, как произошли локальное разрушение их отдельных элементов и дополнительное нагружение неповрежденных элементов. Поэтому для оценки прочностной надежности СТС, необходимо оценить: (а) вероятности локальных разрушений отдельных КЭ  $LF_j$  и (б) вероятности реализации различных сценариев разрушения системы в целом  $S_F^{(i)}$ , инициированных локальными разрушениями указанных элементов (рис.1) [3, 4].

Оценка прочностной надежности может осуществляться путем построения структурных схем надежности, представляющих собой последовательное соединение параллельных структур, каждая из которых соответствует определенному сценарию разрушения системы. Используя заданную структурную схему, вероятность разрушения СТС может быть описана с помощью выражения:

$$P(F_{sys}) = P\left(\bigcup_{i=1}^{n_s} \bigcap_{j=0}^{m_i} LF_{k+j|k+j-1,\dots,k}\right), \quad (2)$$

где  $n_s$  - количество сценариев разрушения системы,  $m_i$  - количество элементарных событий - локальных разрушений/повреждений, входящих в сценарий разрушения системы  $S_F^{(i)}$

Тогда прочностная надежность СТС будет иметь вид:

$$Re_{sys} = 1 - P(F_{sys}) = 1 - P\left(\bigcup_{i=1}^{n_s} \bigcap_{j=0}^{m_i} LF_{k+j|k+j-1,\dots,k}\right). \quad (3)$$

1. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука. 2008. 528 с.
2. Thoft-Christensen P., Murotsu Y. Application of Structural Systems Reliability Theory. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1986. 345 p.
3. Махутов Н.А., Резников Д.О., Зацаринный В.В. Два типа сценариев аварий в сложных технических системах// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2014. № 2. С. 28-41.
4. Reznikov D. Analysis of local failure modes and subsequent scenarios of global failures of complex technical systems. Proceedings of the 19th European Conference on Fracture. ECF19. Kazan, Russia. 2012.

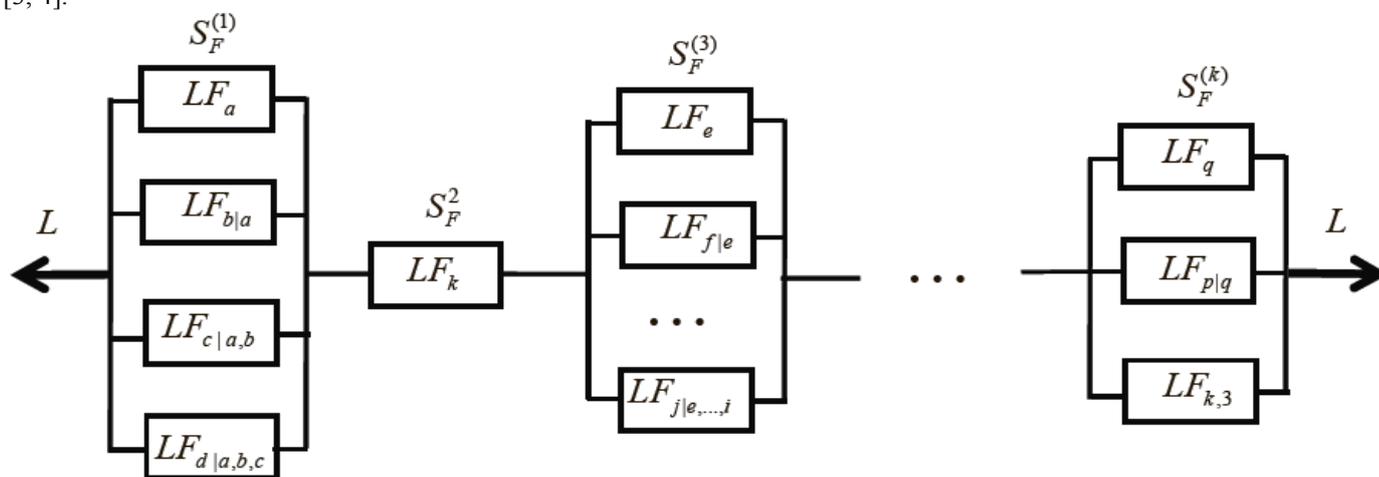


Рис. 1. Структурная схема надежности СТС

## ОБОБЩЕННАЯ КРИВАЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Романов А.Н.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, [alrom37@mail.ru](mailto:alrom37@mail.ru)

Ранее было показано, что накопление повреждений на стадии развития трещин описывается зависимостями в виде:

$$\eta = \int_0^N \frac{v_{yn} v_p}{v_c^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta v}{v_c} dN. \quad (1)$$

В предельном случае (разрушение) зависимость (1):

$$\int_0^{N_p} \frac{v_{yn} v_p}{v_c^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta v}{v_c} dN = 1, \quad (2)$$

где  $v_p$  - пластическое (остаточное) раскрытие (перемещение берегов) трещины,  $v_{yn}$  - упругопластическое раскрытие трещины в полцикле растяжения,  $\Delta v_p$  - односторонне накопленное раскрытие берегов трещины в цикле,  $v_c$  - предельное раскрытие трещины (перемещение берегов), соответствующее максимальной нагрузке при однократном разрыве образца (детали) с трещиной,  $N$  и  $N_p$  - текущее и разрушающее число циклов соответственно.

Обработка экспериментальных данных показывает, что скорость развития трещины линейно зависит от скорости накопления повреждений:

$$\frac{dl}{dN} = \Delta l_c \frac{d\eta}{dN}, \quad (3)$$

где  $\Delta l_c$  - приращение трещины от исходного значения  $l_0$  до критического  $l_c$ .

Это означает, что накопление повреждений с ростом числа циклов нагружения может быть описано через приращение длины трещины в виде:

$$\eta_n = \frac{\Delta l_n}{\Delta l_c}, \quad (4)$$

где  $\Delta l_n$  - приращение трещины за «n» циклов нагружения, а скорость накопления повреждений будет равна:

$$\frac{d\eta}{dN} = \frac{1}{\Delta l_c} \cdot \frac{dl}{dN}. \quad (5)$$

Установлено, что накопленное повреждение, рассчитанное по зависимости (1), хорошо описывается по относительному изменению длины трещины (4) и коэффициента интенсивности напряжений:

$$\eta_{KI} = \frac{\Delta K_{I_n}}{\Delta K_{I_f}}, \quad (6)$$

где  $\Delta K_{I_f}$  - приращение коэффициента интенсивности напряжений от нулевого значения  $K_{I0}$  до критического значения  $K_{I_f}$ :

$$\Delta K_{I_f} = K_{I_f} - K_{I0}. \quad (7)$$

Тогда по аналогии с зависимостями (3) и (5) скорость накопления повреждений может быть определена в виде:

$$\frac{d\eta}{dN} = \frac{1}{K_{I_f}} \cdot \frac{dK_{I_f}}{dN}, \quad (8)$$

где  $\frac{dK_{I_f}}{dN}$  - скорость изменения коэффициента интенсивности напряжений на заданном этапе нагружения.

Таким образом, получаем:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_l = \eta_{KI}, \quad (9)$$

или

$$\frac{d\eta}{dN} = \frac{1}{\Delta l_c} \cdot \frac{dl}{dN} = \frac{1}{\Delta K_{I_f}} \cdot \frac{dK_{I_n}}{dN}, \quad (10)$$

отсюда

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\Delta l_c}{\Delta K_{I_f}} \cdot \frac{dK_{I_n}}{dN}, \quad (11)$$

Зависимость (10) можно записать в виде  $v_{\eta} = \bar{v}_l = \bar{v}_{K_I}$ . Это означает, что скорость накопления повреждения равна относительной скорости развития трещины или относительной скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений, как это следует из зависимостей (5), (8) и (10).

Таким образом, получаем единую (обобщенную) кривую циклической трещиностойкости для любых материалов и условий нагружения.

Важно, что если фиксируется скорость развития трещины и параметры раскрытия в процессе эксплуатации конструкции (или задается на стадии проектирования) и рассчитывается в соответствии с критерием (1) скорость накопления повреждения, то в этом случае может быть определено критическое (предельное) приращение трещины в виде:

$$\Delta l_c = \frac{dl}{dN} \bigg/ \frac{d\eta}{dN}, \quad (12)$$

и соответственно критический размер трещины:

для краевой трещины:

$$l_c = l_0 + \Delta l_c, \quad (13)$$

для центральной:

$$l_c = 2(l_0 + \Delta l_c) \quad (14)$$

Таким образом, существование единой кривой циклической трещиностойкости металлических материалов во всем диапазоне долговечностей (мало- и многоцикловая усталость) независимо от типа материала, его структурного состояния (термообработки), вида нагружения (одно-, двухчастотное, асимметричное, с временными выдержками, программное), и условий (температура, частота) формулирует новые подходы к методам расчета долговечности и живучести конструкций, правилам выбора материала при конструировании, разработке новых материалов, методам их испытания.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА ХАРАКТЕР НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.Н.Романов, Н.И.Филимонова

Институт машиноведения РАН, E-mail: [alrom37@mail.ru](mailto:alrom37@mail.ru)

Структурная неоднородность конструкционных металлических материалов обуславливает деформационную неоднородность при циклическом упругопластическом деформировании с образованием на определенных стадиях рассредоточенного трещинообразования.

Выполнено исследование особенностей развития деформаций в локальных участках рабочей базы образцов на двухфазной стали 45, в которой феррит и цементит находятся частично в связанном состоянии, образуя структуру, состоящую из перлита и феррита.

Средние значения деформаций (циклических и односторонне накопленных), полученные суммированием по отдельным участкам, равными 30, 100 и 200 мкм.

Коэффициенты неоднородности циклической пластической деформации  $K_{\mu\epsilon_p}$  и односторонне накопленной пластической деформации  $K_{\mu\epsilon}$ , определяемые в виде

$$K_{\mu\epsilon_p} = \epsilon_{pk} / \epsilon_{pm} \quad \text{и} \quad K_{\mu\epsilon} = \epsilon_k / \epsilon_m, \quad (1)$$

где  $\epsilon_k$  – местная пластическая деформация в цикле;  $\epsilon_{pm}$  – средняя величина ширины петли гистерезиса в цикле, измеренная на всей рабочей базе;  $\epsilon_k$  – местная односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле нагружения;  $\epsilon_m$  – средняя односторонне накопленная к данному циклу деформация на большой базе измерения.

Статистическое распределение локальных деформаций в стали 45 в полуциклах растяжения после нагружения в полуциклах растяжения подобно распределению характеристик структурной неоднородности, оцениваемой статистическими параметрами значений микротвердости.

Развитие деформационной неоднородности с ростом числа циклов нагружения приводит к накоплению повреждений в локальных зонах и возникновению в них предельных состояний (образование микротрещин).

Для описания уровня накопленных повреждений  $\eta$  при циклическом упругопластическом деформировании использовался деформационно-кинетический критерий в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} dN = 1, \quad (2)$$

где  $\delta$  – пластическая деформация (ширина петли гистерезиса) в полуцикле растяжения,  $\Delta\epsilon$  – односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле,  $\epsilon$  – пластичность материала при однократном разрушении образца, обуславливающая

несущую способность материала,  $N_p$  – число циклов до разрушения.

С учетом неоднородности пластической деформации в циклах нагружения условие разрушения (появление микротрещин в локальных участках при  $N_p < 10^5$  циклов), когда повреждение от упругой деформации невелико, может быть записано следующим образом:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\delta}\delta_k)^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon}\epsilon_k}{\epsilon} dN = 1, \quad (3)$$

где  $K_{\mu\delta}$  и  $K_{\mu\epsilon}$  – коэффициенты неоднородности циклической и односторонне накопленной деформаций.

Первый член в зависимостях (2) и (3) определяет усталостное повреждение, второй – квазистатическое.

Наличие деформационной неоднородности при малоцикловом нагружении приводит к неравномерному накоплению повреждений в отдельных участках рабочей базы образца. В результате в местах максимальных деформаций наблюдается более раннее возникновение предельных состояний с образованием микротрещин.

Характер распределения повреждений во всех циклах нагружения остается одинаковым и сосредоточен в ферритной составляющей. При этом очаги неоднородности закрепляются и сохраняются во всех циклах нагружения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что характер развития деформационных процессов и в соответствии с ними и характер накопления повреждений определяется структурным состоянием деформируемого материала и его фазовым составом.

Как было отмечено ранее, в зонах с высокими локальными деформациями с ростом числа циклов нагружения образуются микротрещины и к моменту образования магистральной трещины поверхность материала покрывается многочисленными микротрещинами (рассредоточенное трещинообразование).

В двухфазных материалах таких, как сталь 45, микротрещины образуются преимущественно в ферритных зонах. В процессе технологической обработки, например, прокатки, ферритные и перлитные зоны приобретают форму полос, и микротрещины, располагаясь в этих зонах.

При достижении микротрещинами определенных размеров и плотности путем слияния и взаимодействия образуется магистральная трещина, развитие которой в поврежденном материале протекает ускоренными темпами.

# НОМЕНКЛАТУРА И СТРУКТУРИЗАЦИЯ ДАННЫХ В БАНКАХ ЗНАНИЙ О МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

Руденко В.А.<sup>1</sup>, Грот В.В.<sup>2</sup>, Гаврилов А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Россия, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, e-mail: rudenko@imash.ru

<sup>2</sup> Россия. ОАО «НТЦ Промбезопасность», e-mail: grotvv@oaontc.ru

**Аннотация.** Перечислены сущности, составляющие предметную область «Механика разрушения». Сформированы комплексы задач, объединяющие базы данных, где размещаются выделенные сущности. Рассмотрен пример структурирования записей в базе данных «Модели».

**Ключевые слова:** база данных, механика разрушения, модель, свойство, характеристика.

Предметная область механики разрушения для применения в информационных системах должна быть структурирована с учетом особенностей информационно-логической модели (ИЛМ). ИЛМ объединяет объекты (сущности), которые представляются понятиями при описании задач, решаемых в рамках механики разрушения. В качестве основных информационных объектов выделены: свойства и характеристики реальных объектов (изучаемых в механике разрушения), данные об их исследовании, модели их поведения, расчетные методы.

Для эффективного использования названных информационных объектов, они должны быть определенным образом систематизированы и структурированы в виде баз данных (БД) и банков знаний (БЗ).

При этом корректность используемых ИЛМ обеспечивается введением трех справочных БД: «Документы – источники», «Терминология» и «Классификаторы».

Все пользователи, имеющие дело с современными сложными техническими системами, вряд ли самостоятельно смогут использовать данные, полученные, как правило, на идеализированных (модельных) материалах, хотя специалист в области механики разрушения на основе тех же знаний может дать весьма ценные практические рекомендации. Основные задачи данной работы - отбор и формирование наиболее подходящей номенклатуры и разработка оптимальной, по возможности универсальной, структуризации данных в БД и БЗ, которые бы способствовали решению широкого круга практических задач пользователей.

Выше изложенное можно пояснить на примере БД «Модели». Если рассматривать ее как реляционную базу, то, в первом приближении запись структуры модели будет состоять из следующих полей: документ-источник информации; объект моделирования; гипотезы, используемые при моделировании; воздействия; графические изображения; основные положения модели; рекомендации по применению модели.

Такая номенклатура и структура данных приемлемы в том случае, когда составляется простая картотека (библиотека) моделей, как информационных объектов. Для более глубокого и корректного понимания паспорт модели должен иметь более развитую структуру и логические связи.

Здесь могут быть выделены (опуская обязательные) следующие позиции: свойства; характеристики каждого свойства; воздействия, обеспечивающие развитие модели; набор условий, обеспечивающих реализацию модели; расчетные методы, позволяющие получить численную оценку результатов моделирования.

Для каждого свойства указываются его наименование; реквизиты; правило, закон, гипотеза и т.п., определяющее реализацию свойства; характеристики свойства, определяющие изменение состояния объекта при моделировании;

Характеристика сопровождается следующими атрибутами: наименование; реквизиты; состояния характеристики: начальное, в процессе развития модели, конечное; численное выражение характеристики; примеры использования в расчетах.

Для каждого воздействия приводятся: наименование; реквизиты; какие характеристики используются; состояние характеристики воздействия: начальное, в процессе развития модели, при получении результата.

Перечисляются атрибуты каждого из условий, необходимых для реализации модели: наименование; реквизиты; влияние на развитие модели.

Для каждого расчетного метода в паспорте указываются: наименование; реквизиты; оценка результатов применения этого расчетного метода; рекомендации по его использованию.

Практическая апробация такой структуризации модели показывает, что даже в случае, если цель пользователя информации не может быть представлена проще, чем система, обсуждаемый подход позволяет добиться необходимых результатов.

Ключевые принципы при разработке комплекса БД и БЗ остаются неизменными: используется платформа Java и сохраняется архитектура веб-приложения.

## АКУСТИКОЭМИССИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТРИЦЫ И ВОЛОКНА НАГРУЖАЕМОГО СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА КАК СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ С САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТЬЮ

П.Б Северов, Ю.Г Матвиенко, В.И. Иванов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [alpinprom@yandex.ru](mailto:alpinprom@yandex.ru)

**Аннотация:** рассматриваются вопросы накопления повреждений и разрушения образцов из многослойного однонаправленного углепластика с позиций методологии неупругого деформирования и разрушения твердых тел и сред в процессе их эволюции.

**Ключевые слов:** акустическая эмиссия, однонаправленные слоистые углепластики, неупругое деформирование и разрушение, физическая мезомеханика, нелинейные динамические системы, самоорганизованная критичность, квазистационарный и катастрофический режимы, миграция деформационной активности.

В докладе рассмотрены некоторые вопросы деформирования и разрушения образцов из многослойного однонаправленного углепластика, вырезанных по направлению укладки волокон, с позиций общей методологии неупругого деформирования и разрушения твердых тел и сред как эволюционного процесса в промежутке времени от начала нагружения до окончательной потери несущей способности материала [1]. Композиционный материал представляется в качестве нагружаемой многомасштабной нелинейной динамической системы, эволюция которой может быть описана методом нелинейной динамики. Принимается идея физической мезомеханики о развитии процессов неупругого деформирования во всей иерархии масштабов материала. Многомасштабность ограничивается микро-, мезо- и макроуровнями. На базе акустикоэмиссионного исследования накопления повреждений в образцах из углепластика рассматривается проявление фундаментального свойства нелинейных динамических систем – самоорганизованной критичности. Углепластик в силу внутренних нелинейных свойств в процессе нагружения эволюционирует, проходя две стадии неупругого деформирования и разрушения – медленную квазистационарную и сверхбыструю катастрофическую.

Как видно из рис. 1, первоначальное рассеянное по объему образца квазиравномерное накопление дефектов и повреждений с течением времени

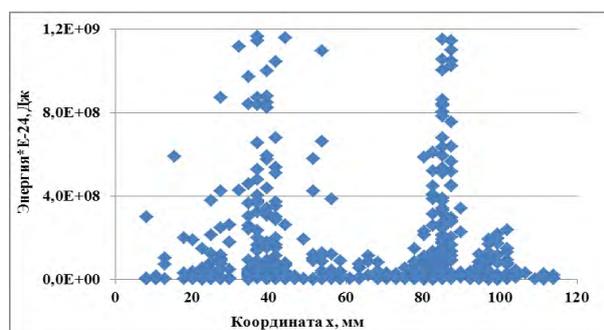


Рис. 1. Распределение энергий отдельных АИ по длине образца

сравнительно малых областях. Пространственная локализация неупругих деформаций (повреждений) постепенно переходит в стадию катастрофического разрушения. Временная последовательность не обязательно нарастающих катастрофических разрушений разделена квазистационарными участками медленного накопления повреждений (рис. 2).

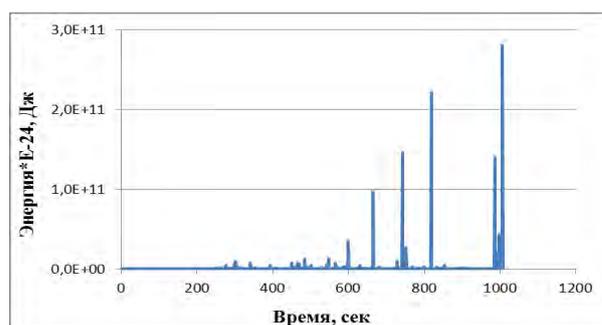


Рис.2. Распределение энергии АИ во времени

Представительные объемы материала на мезоуровне не являются статистически независимыми, что приводит к миграции деформационной активности, перераспределению неупругих деформаций, в частности, по длине образца. Волны напряжений, регистрируемые акустикоэмиссионным методом, являются средством информационного обмена между всеми частицами деформируемого углепластика. Статистика флуктуации энергий акустических импульсов дает распределение с так называемыми «тяжелыми хвостами», что подтверждает скоррелированность разрушений во всей иерархии масштабов. Полученные распределения энергий не соответствуют распределениям магнитуд сейсмических событий, описываемых уравнениями Гуттенберга-Рихтера [2].

1. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. № 1.С.5-26.
2. Захаров В.С. Предварительный анализ самоподобия афтершоковой последовательности японского землетрясения 11 марта 2011 г. // Вест. Моск. ун-та. Сер.4. Геология. 2012. №. 2. С.52-56.

локализуется с ускоренной деградацией прочности в

## СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТОНКОЙ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ОСЛАБЛЕННОЙ ОТВЕРСТИЕМ

С.В. Серёгин, О.Е. Сысоев

ФГБОУ ВПО "КНАГТУ", Комсомольск-на-Амуре, Россия; Seregin-komsHome@yandex.ru

**Аннотация.** В рамках теории пологих оболочек решена задача о влиянии отверстия на частоты собственных колебаний тонкой оболочки. Предлагается уточнение математической модели, предполагающей, что динамическая асимметрия в виде выреза у оболочки уже в линейной постановке приводит к связанным изгибно-радиальным колебаниям. Показано, что при относительно малом вырезе, динамические характеристики оболочки с отверстием могут быть найдены из решения задачи о колебаниях оболочки, несущей присоединенную массу, равную массе вырезанного элемента.

**Ключевые слова:** собственные колебания круговой цилиндрической оболочки, ослабленной отверстием, присоединенная масса, расщепление изгибного частотного спектра

**Математическая модель.** Анализ, как и в [1], основывается на известных уравнениях теории пологих оболочек, которые, при общепринятых обозначениях имеют вид:

$$\frac{D}{h} \nabla^4 w = \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{M_c}{h} \delta(x - x_0, y - y_0) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

$$\frac{1}{E} \nabla^4 \Phi = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}.$$

Упругий прогиб шарнирно опертой оболочки в новом подходе аппроксимируем выражением:

$w(x, y, t) = [f_1(t) \sin \beta y + f_2(t) \cos \beta y + f_3(t)] \sin \alpha x$ , где введенная координата  $f_3(t)$  к [2] отвечает радиальным колебаниям.

Соответствующие подстановки и ортогонализация полученного выражения к форме прогиба приводит к системе динамических уравнений из которых выразим три безразмерные собственные частоты оболочки, ослабленной отверстием  $\Omega_{n0i} = \omega_{n0i} / \omega_n$ , ( $i = 1, 2, 3$ ), не зависящие от круговой координаты места расположения выреза. Первым двум  $\Omega_{n01}$  и  $\Omega_{n02}$  соответствуют, преимущественно изгибные, а третьей  $\Omega_{n03}$  – преимущественно радиальные колебания. Большая из расщепленных собственных частот преимущественно изгибных колебаний всегда  $\Omega_{n02} = 1$ . Меньшая  $\Omega_{n01}$ , в отличии от результатов, полученных в работе [2], зависит не только от массы вырезанного элемента, но и от параметров волнообразования  $\varepsilon$  и  $\theta$ , где  $\varepsilon = (n^2 h / R)^2$  и  $\theta = \pi R / nl$  – параметры волнообразования, характеризующие относительную толщину и длину оболочки.

$$\omega_n^2 = \left( E / \rho R^2 \right) \left[ \varepsilon (1 + \theta^2)^2 / 12 (1 - \mu^2) + \theta^4 / (1 + \theta^2)^2 \right]$$

– квадрат частоты изгибных колебаний оболочки.

На рис. 1 представлена зависимость  $\Omega_{n01}$  от  $\varepsilon$ ,  $\theta$  при  $M_c / M_{so} = 0,05$ . Сплошная линия соответствует решению [2]. Штриховая и пунктирная – новому решению.

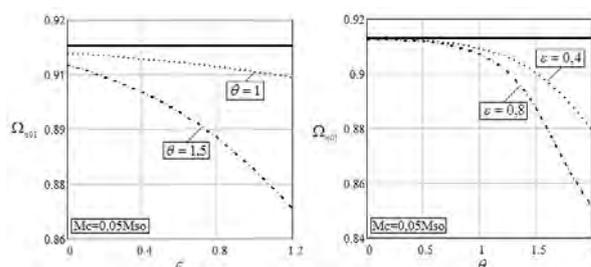


Рис. 1. Влияние параметров  $\varepsilon$ ,  $\theta$  на  $\Omega_{n01}$ .

Видно, что при колебаниях относительно длинных оболочек с вырезом ( $\theta < 0,5$ ), решения, практически, совпадают. Для относительно коротких оболочек, расхождения решений увеличивается с ростом  $\varepsilon$ ,  $\theta$ . Так, например, при  $\varepsilon = 0,8$ ,  $\theta = 2$  и  $M_c = 0,05 M_{so}$  рассогласование нового решения и результатами работы [2] составляет более 5%. С увеличением массы вырезанного элемента рассогласование значений увеличивается.

**Выводы.** Уточненная математическая модель позволила установить, что наличие выреза у круговой цилиндрической оболочки приводит к расщеплению изгибного частотного спектра, при этом меньшая из расщепленных собственных частот снижается, а большая не меняет своего значения, по сравнению со случаем оболочки без выреза. Меньшая из расщепленных частот зависит не только от массы вырезанного элемента, но и от параметров волнообразования  $\varepsilon$  и  $\theta$ , характеризующих относительную толщину и длину оболочки.

1. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В.Д. Кубенко, П.С. Ковальчук, Т.С. Краснополяская. Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.
2. Серёгин С. В. Исследование динамических характеристик оболочек с отверстиями и присоединенной массой // Вестник МГСУ. 2014. №4. – С. 52-58.
3. Серёгин С.В. Влияние присоединенного тела на частоты и формы свободных колебаний цилиндрических оболочек // Строительная механика и расчет сооружений, 2014. №3. С. 35 – 39.

## ВОЗМОЖНОСТЬ ВНЕСЕНИЯ КРИТЕРИЯ РЕСУРСАВ НОРМАТИВНО-ТЕЗНИЧЕСКУЮ БАЩУ НОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИИ

О.Б.Скворцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

<sup>2</sup>ООО «Диамех 2000», Москва, Россия; [skv@diamrch.ru](mailto:skv@diamrch.ru)

**Аннотация.** Рассмотрены недостатки российской и международной нормативной базы, регламентирующей вибрационный мониторинг роторного оборудования. Представлены рекомендации по учету ресурсных оценок, учитывающих наработку и современные исследования, учитывающие процессы, связанные с гигацикловой усталостью.

**Ключевые слова:** вибрация, надежность, ресурс, циклическая прочность.

Современные системы стандартов, регламентирующих измерение вибрации роторного оборудования, практически никак не учитывают длительность и характер вибрации, воздействующий на роторное оборудование. Результатом является практически полное отсутствие гармонизации стандартов нормирующих допустимые уровни вибрации и стандартов регламентирующих испытания на воздействие вибрации, в которых длительность воздействия и характер вибрации являются основными параметрами. В большинстве случаев вибрацию при эксплуатации контролируют как размах перемещений или СКЗ скорости. При этом подразумевается, что спектр вибрации сосредоточен в сравнительно узкой области частот или вообще сводится к небольшому количеству гармоник. При испытаниях на воздействие вибрации в качестве основной характеристики наиболее часто используют ускорение. При сложном спектральном составе эти характеристики не могут простыми способами пересчитываться, а использование интегрирования в широком диапазоне частот характеризует оборудование с совершенно разных сторон. Именно ускорение является наиболее корректной характеристикой при проведении испытаний на длительную вибрационную нагрузку [1]. Получаемые путем интегрирования от акселерометров параметры скорости и перемещения практически не учитывают воздействие высокочастотных составляющих [2]. В результате важные с точки зрения вибрационной прочности, составляющие оказываются вне частотной полосы контроля, что возможно является причиной серьезных аварийных ситуаций [3].

Критический анализ современного состояния нормирования вибрации в процессе эксплуатации [4], показывает, что существующие методы контроля вибрации оборудования по существу ориентированы на диагностику текущего состояния, а не на оценку оставшегося ресурса. Это происходит, несмотря на то, что стандарты, касающиеся измерения вибрации довольно четко делятся как ориентированные на контроль и на диагностику. Последние редакции таких стандартов рекомендуют при превышении уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ переходить к диагностике,

а при превышении уровня ОСТАНОВ либо останавливать агрегат, либо существенно менять режим его работы. По существу единственными временными параметрами являются оценки трендов, по которым и выполняется прогнозирование остаточного ресурса [5].

Для оценки долговременной вибрационной прочности и получения рекомендаций с учетом имеющихся результатов исследований в области циклической, в том числе гигацикловой усталости [6], необходим пебреход к контролю также и ускорений в широкой полосе частот, аналогично тому, как это ранее было сделано при переходе от контроля перемещений к контролю скорости [7]. Примеры нормирования всех характеристик вибрации: перемещений, скорости и ускорений уже имеются, к сожалению, пока не на уровне международной стандартизации [8]. Такие методики должны быть дополнены и учетом временного фактора [9] действия вибрации.

1. Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов., Мир, М., 1976, 272 с
2. Скворцов О.Б., Трунин Е.С. Автоматизация вибрационной защиты гидроагрегатов. HydroVision Russia 2012.
3. Слива И. Точка или многоточие? ВЕСТНИК РУСГИДРО №7, июль 2014, с.5.
4. Георгиевская Е.В., Смелков Л.Л. Проблемы нормативного обеспечения оценки остаточного ресурса основных элементов гидротурбин. HydroVision Russia 2014.
5. ISO 13381-1 (2004). Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics. 2004, 25 p.
6. Bathias C., Paris P. C.. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. September 13, 2004 by CRC Press -328 p.
7. Рунов Б.Т. Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов. Энергоиздат 1982 г. 352с.
8. Wovk V., A brief tutorial on machine vibration by Victor Wovk, Machine dynamics inc., [www.machinedyn.com/revise/tutorial.pdf](http://www.machinedyn.com/revise/tutorial.pdf), 08.04.2008, 10 p.
9. Шанявский А.А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов. Научный вестник МГТУ ГА, 2012, с.32-44

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ИЗ СПЕЦИАЛЬНОГО ЧУГУНА МАРКИ ВЧТГ И СТАЛИ

В.В. Комиссаров<sup>1</sup>, Е.С. Таранова<sup>1</sup>, В.О. Замятнин<sup>2</sup>, Н.В. Псырков<sup>2</sup>, Л.А. Сосновский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Гомсельмаш», Гомель, Беларусь

<sup>3</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь

**Аннотация.** Представлены сравнительные результаты натурных испытаний работоспособности зубчатых колес диаметром до 0,5 м, изготовленных из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ и стали 25ХГТ в составе бортовых редукторов сельскохозяйственной техники производства ПО «Гомсельмаш».

**Ключевые слова:** зубчатые колеса, высокопрочный чугун, сталь, бортовой редуктор, комбайн.

В 2012 – 2013 гг. в опытную эксплуатацию было запущено 11 бортовых редукторов (в составе 6 машин КВК-800 и КЗС-1218), укомплектованных зубчатыми колесами из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ. С целью сравнительного эксплуатационного исследования на одну из машин одновременно были установлены чугунная (левый бортовой редуктор, рисунок 1, а) и стальная (правый, рисунок 1, б) шестерни. После наработки 444 моточаса (1 сезон) экспериментальные редуктора были сняты для анализа. Обнаружено, что в условиях эксплуатации шестерня из чугуна ВЧТГ была повреждена в меньшей степени чем стальная (рисунок 1, в и з), о чем также свидетельствуют лабораторные исследования отработавшей в редукторах смазки (таблица на рисунке 1). При этом значительная часть стальных зубьев повреждена ямками выкрашивания, которые в отдельных случаях достигают длины до 2–3 мм и глубины до 1 мм; некоторые из них сливаются, образуя сплошные зоны повреждения (рисунок 1, з). Это свидетельствует о начале прогрессирующего выкрашивания. А на рабочих поверхностях только некоторых чугунных зубьев наблюдаются локальные ямки выкрашивания около 1 мм в диаметре, что соответствует начальному выкрашиванию (рисунок 1, в).

Анализ степени поврежденности поверхностей также показал, что, в отличие от чугунной шестерни, у стальной наблюдаются следы пластической деформации кромки зуба – происходит выдавливание материала за пределы контактной рабочей поверхности (рисунок 1, в и з).

Проведенные исследования в ЦЗЛ ОАО «Гомсельмаш» (см. таблицу на рисунке 1) отработанных масел из рассматриваемых редукторов показали, что у масла из редуктора с чугунной шестерней после наработки число механических примесей в 3,5 раза меньше в сравнении с маслом из редуктора со стальной шестерней, что также косвенно свидетельствует о меньшей степени поврежденности рабочей поверхности зубьев чугунной шестерни.

По работоспособности бортовых редукторов с чугунными шестернями остальных экспериментальных машин нареканий не имелось; посторонних шумов в редукторах за время их эксплуатации не отмечено.

Оценка ресурса шестерни из чугуна ВЧТГ (срок службы ~ 3,58 · 10<sup>8</sup> км) говорит о том, что ресурс бор-

тового редуктора практически не ограничен, при этом стоимость чугунных колес на 20 % ниже стальных.



Рис. 1. Общий вид комбайна КВК 800 (№751) и эксплуатационные повреждения зубьев колес из чугуна (а, в) и стали (б, з)

Проведенные испытания показали, что шестерни из чугуна ВЧТГ в составе бортовых редукторов принципиально работоспособны. При этом в одинаковых эксплуатационных условиях их поверхности повреждены в меньшей степени, чем стальных шестерен.

В 2014 году ПО «Гомсельмаш» запустило в эксплуатацию 10 машин, на которые попарно установлены и чугунные и стальные шестерни.

## НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ

Л.А. Сосновский<sup>1</sup>, В.В. Комиссаров<sup>2</sup>, Е.С. Таранова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

**Аннотация.** Предложен и практически апробирован обобщенный критерий достижения предельного состояния при контактной усталости в виде критической величины  $\delta_c^{\text{lim}}$  сближения осей. Применительно к зубчатым колесам дано обоснование такого критерия ( $\delta_c^{\text{lim}} = 100$  мкм). С использованием предложенного критерия разработана методика построения и получена полная кривая контактной усталости в диапазоне долговечности от 1 до  $2 \cdot 10^8$  циклов.

**Ключевые слова:** контактная усталость, контактная пара, критерий предельного состояния, сближение осей.

Как показал анализ известных критериев оценки предельного состояния контактных пар, однозначный и общепринятый критерий предельного состояния в области долговечности от 1 до  $2 \cdot 10^8$  циклов в литературе отсутствует. В работе исследован интегральный параметр  $\delta_c$  (рис. 1,а) сближения осей образца и контролбразца. Его величина оказывается обобщенной характеристикой повреждаемости, так как определяется упругой ( $\delta_c^{(e)}$ ) и остаточной ( $\delta_c^{(pl)}$ ) деформациями [при статическом (рис. 1,б) нагружении], а также дополнительно учитывает износ обоих элементов ( $\delta_c^{(i)}$ ) [при регулярном (рис. 2,а) и ступенчатом (рис. 2,в) динамических нагружениях], обусловленный различными механизмами (путем отслаивания, выкрашивания и т.д.), т.е.  $\delta_c = \delta_c^{(e)} + \delta_c^{(pl)} + \delta_c^{(i)}$  [1].

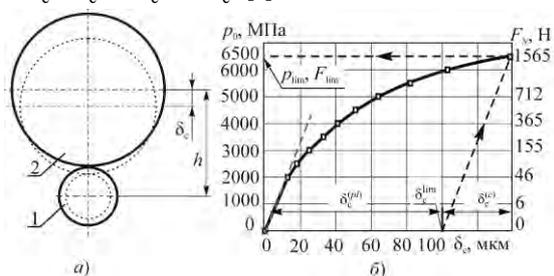


Рис. 1. Схема измерения величины  $\delta_c$  при трении качения (а): 1 – образец; 2 – контролбразец (сплошные линии – контуры элементов контактной пары до испытаний, пунктирные – после или в процессе испытаний); диаграмма контактного взаимодействия ( $p_0 - \delta_c$ ) при статическом нагружении контактной пары (б)

Именно это свойство параметра  $\delta_c$  делает возможным принять его определенное значение как обобщенный критерий достижения предельного состояния при контактной усталости независимо от механизмов поверхностного повреждения и разрушения, т.е. при любом виде нагружения и во всем возможном интервале изменения действующей нагрузки. Экспериментально установлено (рис. 1,б, рис. 2,а,б), что для таких массовых и ответственных компонент общемашиностроительного применения, как зубчатые зацепления, можно в первом приближении принять  $\delta_c^{\text{lim}} \approx 100$  мкм. В других условиях испытаний может быть принята и другая (обоснованная) величина  $\delta_c^{\text{lim}}$  (рис. 2,б).

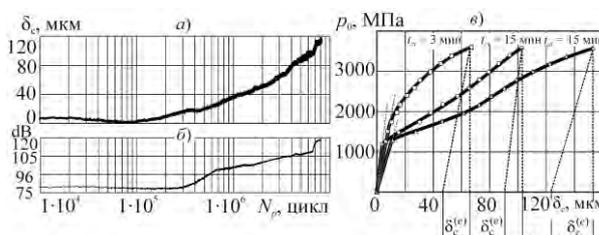


Рис.2 Регистрируемое в процессе испытаний на контактную усталость (регулярное динамическое нагружение) изменение сближения осей (а) и уровня шума (б); диаграмма контактного взаимодействия ( $p_0 - \delta_c$ ) при ступенчатом динамическом нагружении контактной пары (в)

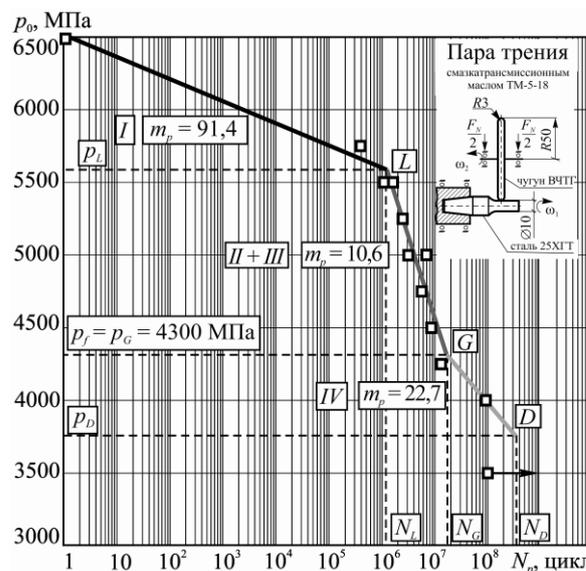


Рис. 3. Полная кривая контактной усталости

Используя принятый критерий достижения предельного состояния, разработана методика и построена полная кривая контактной усталости в диапазоне долговечностей от  $N_p = 1$  до  $10^8$  циклов (рис. 3). Установлены ее характерные параметры, определяемые в точках пересечения прямых, а также параметры их наклона к оси абсцисс.

1. Сосновский Л.А., Комиссаров В.В., Таранова Е.С., Тюрин С.А. Экспериментальное построение полной кривой контактной усталости пары «высокопрочный чугун ВЧГТ / сталь 18ХГТ» и ее анализ // Механика машин, механизмов и материалов. –2014. –№ 1 (26). –С.32-39.

## О ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ МОДЕЛИ АСФАЛЬТОБЕТОН/ШИНА ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Л.А. Сосновский<sup>1</sup>, Е.А. Темников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

**Аннотация.** Дан анализ предельных состояний модели системы асфальтобетон/шина при ускоренных лабораторных испытаниях, приведены некоторые результаты.

**Ключевые слова:** система асфальтобетон/шина, предельное состояние, методика испытания.

Объектом исследования является система асфальтобетон/шина. Изготовление образцов из асфальтобетона производилось поперечным нарезанием керна толщиной 18 мм и просверливанием посадочного отверстия диаметром 33 мм для закрепления на оси прижимного устройства. Образцы из резины изготавливались из протектора шины Белшина ИД-304М У-4 диаметром 26 мм, и закреплялись на стальную оправку диаметром 10 мм (рис. 1).

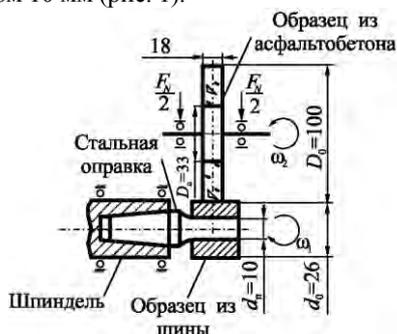


Рис. 1. Схема испытания системы асфальтобетон/шина

Метод ускоренных испытаний заключается в ступенчатом нагружении системы до достижения ею предельного состояния (приращение контактной нагрузки  $\Delta F = \text{const} = 12,5$  Н, продолжительность нагружения на каждой ступени  $n_i = \text{const} = 15000$  цикл) [1,2].

Таблица 1. Предельные состояния системы асфальтобетон/шина

Исследуемый материал	Предельное состояние	Характеристики
Асфальтобетон	Разрушение образца	$T_{\text{lim}} = 67^\circ\text{C}; F_N^{\text{lim}} = 100$ Н; $N_{\text{lim}} = 31,2 \cdot 10^3$ цикл; $L_T^{\text{lim}} = 9,8$ км.
Шина	Термодеструкция образца	$T_{\text{lim}} = 160^\circ\text{C}; F_N^{\text{lim}} = 100$ Н; $N_{\text{lim}} = 12 \cdot 10^3$ цикл; $L_T^{\text{lim}} = 9,8$ км.
	Критический износ	$T_c = 80^\circ\text{C}; F_N^c = 87,5$ Н; $N_c = 9,87 \cdot 10^3$ цикл; $L_T^c = 8,057$ км.

При испытаниях на стенде СКИ-01 проводились измерения температуры на поверхности обоих образцов (из резины и из асфальтобетона) при помощи тепловизора Infrared Solution Snap Shot (рис. 2, 3).

Испытуемая система достигает предельное состояние (ПС) по одному из двух критериев: разрушение образца из асфальтобетона (рис. 2) либо термодеструкция образца из шины (рис. 3).

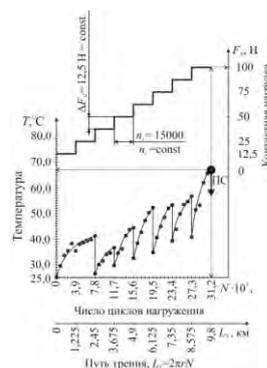


Рис. 2. Изменение температуры на поверхности образца из асфальтобетона

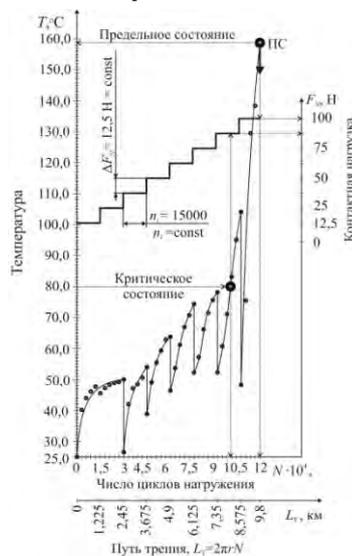


Рис. 3. Изменение температуры на поверхности образца из шины

При этом характеристики предельного состояния существенно различны (табл. 1, рис. 2, 3). При испытании образца из шины обнаруживается не только предельное состояние, но и критическое. На образцах из асфальтобетона последнее не обнаруживается.

В докладе более подробно излагается методика и результаты испытаний; дается анализ последних.

- Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость. СТБ 1233-2000. – Мн.: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации. 2000. 8 с.
- Темников Е.А. Методы испытания системы «асфальтобетон/шина» // Сборник научных трудов. Актуальные вопросы машиноведения. Выпуск 2. 2013. Мн. С. 270 – 273

## СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ С ТОКОМ

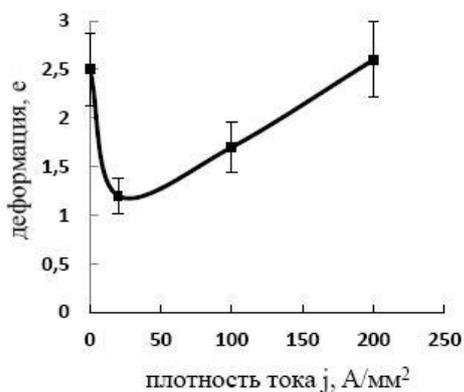
В.В. Столяров

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [vlstol@mail.ru](mailto:vlstol@mail.ru)

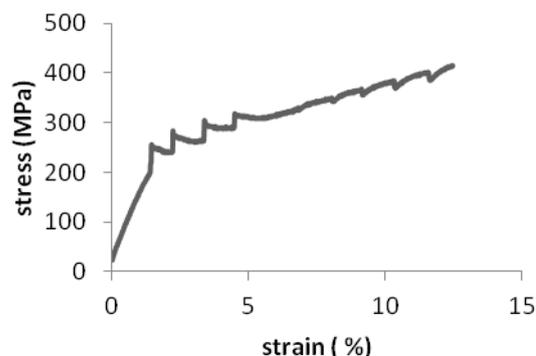
Многие физико-механические свойства сплавов являются структурно-чувствительными и потому зависимыми от различных по природе внешних воздействий – температуры, деформации, напряжения. В работе рассматривается роль интенсивной пластической деформации с импульсным током в формировании ультрамелкозернистых и наноструктур.

Исследованы титановые (TiNi, ВТ6, ВТ1-0), алюминиевые (Д16, АВЕ) и сверхпроводящие (NbTi) сплавы. Холодная прокатка с импульсным током выполнена на полосах и прутках сечением около 20 мм<sup>2</sup> в интервале деформаций  $\epsilon = 0.2-2.5$  при наложении импульсного тока плотностью  $\geq 50$  А/мм<sup>2</sup> и длительностью импульса 10<sup>-4</sup>с. Деформируемость оценивалась по достижению максимальной степени деформации до разрушения при прокатке, а проявление электропластического эффекта – при растяжении образцов с током. Введение импульсного тока для всех титановых

сплавов повышает технологическую пластичность в 2-5 раз по сравнению с холодной прокаткой. Эффект тока тем выше, чем ниже пластичность исходного сплава, что позволяет достичь высоких степеней деформации ( $\epsilon \geq 2$ ) и сформировать сильно фрагментированную микроструктуру. Влияние тока на деформируемость в алюминиевых сплавах зависит от наличия в них эвтектической составляющей и может снижать деформацию до разрушения (рис.1). Использование последующей электроимпульсной обработки или отжига приводит к созданию объемной субмикро- или нанокристаллической микроструктуры, размер зерен в которой определяется режимами деформации, тока и отжига. Анализ деформационного поведения при растяжении с током свидетельствует о наличии разнонаправленных скачков напряжения, связанных с фазовым превращением или электропластическим эффектом.



а



б

Рис.1. Зависимость деформируемости от плотности тока в алюминиевом сплаве (а) и проявление ЭПЭ и ЭПФ в сплаве с памятью формы (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-12222\_a)

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНАМИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

П.В. Тараканов<sup>1</sup>, Г.В. Шашурин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [pashabeetle@yandex.ru](mailto:pashabeetle@yandex.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** В работе приведен инженерный подход для оценки влияния воздействия водородсодержащей среды на развитие трещин в элементах конструкции при циклическом нагружении. В результате применения подхода, на диаграмме роста трещин получены особые области, границы которых характеризуют смену преобладающего механизма разрушения.

### Введение

Водород, в большинстве случаев, негативно влияет на скорость развития трещин. Повышение надежности, ресурса и безопасности элементов конструкций при циклическом нагружении, находящихся в условиях воздействия водородсодержащих сред определяет необходимость разработки соответствующих инженерных моделей.

### Методика оценки влияния среды на долговечность элементов конструкций с трещинами при циклическом нагружении

Разработанная инженерная модель оценки долговечности элементов конструкций в условиях водородсодержащей среды и циклического нагружения основана на предположении о том, что скорость роста трещины определяется действием одного из двух независимых механизмов [1]:

- накопление пластической деформации вблизи вершины трещины при циклическом нагружении;
- водородное охрупчивание материала вблизи вершины растущей трещины за счет действия агрессивной водородсодержащей среды.

Для оценки скорости роста трещины по усталостному механизму разрушения используется закон Париса:

$$\dot{l}_f = A Y \Delta \tilde{\sigma}^\infty \sqrt{\pi l}^n, \quad (1)$$

где  $A, n$  – константы;  $Y$  – К-тарировка;  $\Delta \tilde{\sigma}^\infty$  – размах напряжений вдали от трещины;  $l_f$  – длина трещины.

Скорость роста трещины по механизму водородного растрескивания определяется с помощью специальной инженерной модели [2]. Введен двухпараметрический критерий прочности:

$$\left( \frac{\tilde{K}_{Ic} - \tilde{K}_{Ic}^*}{\tilde{K}_{Ic}^0 - \tilde{K}_{Ic}^*} \right)^{\alpha_1} + \left( \frac{\bar{C}_a}{C^0} \right)^{\beta_1} = 1, \quad (2)$$

где  $\tilde{K}_{Ic}^*$  – условная трещиностойкость материала при средней концентрации водорода в области предразрушения  $a^d$  равной  $C^0 / \Omega$ ,  $\Omega = C^0 / C^*$ ;  $\tilde{K}_{Ic}^0$  –

условная трещиностойкость материала в случае ненаводороженного материала;  $C^*$  – растворимость водорода в материале;  $\bar{C}_a$  – средняя концентрация водорода в области предразрушения  $a^d$ ;  $\tilde{\sigma}^\infty$  – условные номинальные напряжения, возникающие вдали от трещины и полученные без учета влияния водорода на конструкционный материал;  $\alpha_1, \beta_1$  – константы.

Страгивание трещины происходит при условии [3]:

$$\tilde{K}_I \tilde{\sigma}^\infty l \geq \tilde{K}_{Ic} \bar{C}_a. \quad (3)$$

В рамках разработанной модели принято, что трещина начинает расти лавинообразно в том случае, если  $L \geq L_{fr}^*$ . Величина  $L_{fr}^*$  – предельно-допустимая длина трещины, которая описывается

$$L_{fr}^* = l^* (1 - \delta), \quad (4)$$

где  $\delta$  – параметр;  $l^* = \tilde{K}_{Ic}^0{}^2 / \pi \cdot Y^2 \cdot \tilde{\sigma}^{\infty 2}$ .

Лавинообразный характер роста трещины в разработанной модели не рассматривается.

Разработанная на базе приведенных выше положений методика позволила определить особые области на диаграмме  $L(t)$ , границы которых определяют смену преобладающего механизма разрушения элементов конструкций при одновременном воздействии водородсодержащей среды и циклического нагружения. Разделение диаграммы  $L(t)$  на указанные области позволяет выявить диапазон начальных длин трещин, для которого наличие водородсодержащей среды не приводит к ускорению их развития при действии циклического нагружения.

1. Tarakanov P., Romanov A., Shashurin G. Numerical life estimation of structure components subjected to hydrogen embrittlement and cycling // Key Engineering Materials. 2014. V. 592-593, P. 117-120.
2. Tarakanov P., Shashurin G., Romanov A. Empirically-specified environmental assisted cracking model // Procedia Engineering. 2014. V. 74. P. 339-342.
3. Shashurin G.V., Tarakanov P.V., Rezchikova L.A. Crack growth features in hydrogenating high-strength steel AISI 4340 under cycling // Advanced Materials Research. 2014. V. 960-961, P. 22-26.

## ПРОФИЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ, КАК СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВЫХ РЕССОР

Н.А.Татусь, А.Н.Полилов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [nikalet@mail.ru](mailto:nikalet@mail.ru)

**Рессора из композита** наиболее полно удовлетворяет эксплуатационным требованиям, если в ней реализована однонаправленная укладка волокон, при которой волокна располагаются вдоль линий наибольших напряжений. Профилирование рессоры позволяет снизить вес и уменьшить число листов (до одного), если при этом удовлетворить условию постоянства площади поперечного сечения, то получится рессора без перерезанных волокон, что очень важно для сохранения прочности.

Примем закон изменения высоты и ширины балки:

$$b(z) = b_0 \left( \frac{z}{l} \right)^\alpha, h(z) = h_0 \left( \frac{z}{l} \right)^\beta,$$

где  $b_0$  и  $h_0$  – ширина и высота балки в корневом сечении;

$\alpha$  и  $\beta$  – параметры формы балки;

$l$  – длина балки.

Из условия равнопрочности ( $\sigma(z) = \sigma_{\max} = \text{const}$ ):

следует, что

$$\alpha + 2 \cdot \beta = 1. \quad (1)$$

Принимая один из параметров формы равным нулю, т.е. постоянство ширины или высоты сечений по длине балки, получаем две, наиболее распространенные, балки равно сопротивления изгибу – треугольную и параболическую (рис. 1, а и б). Для КМ перерезывание волокон, которое неизбежно при получении данных профилей, является нежелательным, поэтому введем дополнительное условие – постоянство площади поперечного сечения, подразумевающее неизменное объемное содержание армирующих волокон на всей длине балки:

$F(z) = b(z) \cdot h(z) = \text{const}$  или

$$\alpha + \beta = 0. \quad (2)$$

Из решения системы уравнений (1)-(2) вытекает еще одна равнопрочная форма:  $\alpha = -1$ ,  $\beta = 1$  – константа (от англ. «constant area» - постоянная площадь, рис. 1, в).

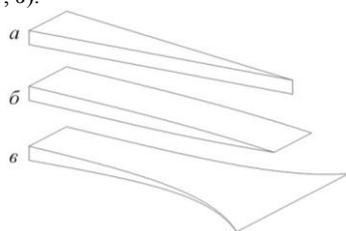


Рис. 1. Равнопрочные формы:  
а - треугольная,  
б - параболическая,  
в - константа

Теперь, используя принятый ранее закон изменения формы балки, получим соотношения: **1) для максимального прогиба**

$$v = \int_0^l \frac{P \cdot z^2 dz}{E \cdot J} = \int_0^l \frac{12 \cdot P \cdot z^2 dz}{E \cdot b(z) \cdot h^3(z)} = v_0 K_v$$

где  $v_0 = \frac{4 \cdot P \cdot l^3}{E \cdot b_0 \cdot h_0^3}$  – прогиб прямоугольной балки с

размерами  $b_0 \times h_0$  в корневом сечении,

$$K_v = \frac{3}{3 - \alpha - 3\beta} \text{ – коэффициент формы по прогибу,}$$

равный отношению прогиба профилированной балки к прогибу прямоугольной балки с одинаковыми размерами в корневом сечении;

**и 2) для массы равнопрочной балки**

$$Q = \int_0^l \rho \cdot b(z) \cdot h(z) dz = \int_0^l \rho \cdot b_0 \cdot h_0 \left( \frac{z}{l} \right)^{\alpha+\beta} dz = Q_0 \cdot K_M$$

где  $Q_0 = \rho b_0 h_0 l$  – масса прямоугольной балки;

$$K_M = \frac{1}{1 + \alpha + \beta} \text{ – коэффициент формы по массе,}$$

равный отношению массы профилированной балки к массе прямоугольной балки.

Дальнейшее изучение равнопрочных балок привело к более удивительной закономерности. В отношении рессор, или любых других упругих элементов, прочность является не единственным определяющим фактором формы и размеров проектируемого изделия. Требуется также обеспечить определенную упругую характеристику конструкции. В связи с чем, необходимо совместно рассматривать условия прочности и жесткости. В таком случае соотношение для массы балки:

$$M = \frac{9 \cdot \rho \cdot P^2 \cdot E \cdot K_M}{C \cdot [\sigma]^2 \cdot K_v},$$

где  $\rho$  – плотность материала балки.

Полученный коэффициент снижения массы  $K = K_M / K_v$  на можно записать в виде:

$$K = \frac{3 - \alpha - 3\beta}{3(1 + \alpha + \beta)}$$

С учетом (1) получим, что

$$K = \frac{3 - (1 - 2\beta) - 3\beta}{3(1 + (1 - 2\beta) + \beta)} = \frac{1}{3} = \text{const},$$

т.е. при одинаковых условиях по прочности и жесткости равнопрочная балка в три раза легче прямоугольной. Независимость, в конечном счете, коэффициента  $K$  от  $\alpha$  и  $\beta$  говорит о том, что последнее утверждение справедливо для равнопрочных балок любой формы. Троекратное снижение веса – это наилучший предельный случай! Большого снижения веса достигнуть нельзя. Можно подтвердить общность этого утверждения и на балках с другими формами сплошного сечения, в том числе и для трехслойных панелей.

Все вышесказанное справедливо лишь для «идеальных» балок. В действительности же необходимо учитывать различные механизмы потери несущей способности и влияние крепления. Но, тем не менее, очевидно, что профиль для более легкой рессоры следует искать в классе равнопрочных балок.

## ГЕНЕРАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ КАК МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ УСКОРЕННЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

О.А.Троицкий<sup>1</sup>, В.И.Стащенко<sup>1</sup>, Е.А.Правоторова<sup>1</sup>, О.Б.Скворцов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

<sup>2</sup>ООО «Диамех 2000», Москва, Россия; [skv@diamrch.ru](mailto:skv@diamrch.ru)

**Аннотация.** Исследование динамических деформаций в металлических образцах при пропускании импульсных токов обеспечивает возможность регулирования в широких пределах внутренних деформаций без использования внешних механизмов задания циклического нагружения, что позволяет существенно упростить процесс испытаний. Возможность высокочастотных нагрузок позволяет значительно ускорить проведение испытаний. Особенно эффективно использование данного метода при прочностных испытаниях реальных токопроводящих элементов электро-механического оборудования.

**Ключевые слова:** вибрация, стационарность, эргодичность, циклическая прочность.

Оценка устойчивости мощного энергетического оборудования к механическим нагрузкам имеет важное значение при проектировании и, особенно, при продлении сроков эксплуатации. Элементы обмоток испытывают наиболее значительные непрерывные динамические нагрузки с числом циклов, как правило, превосходящие те, которые используются при испытаниях. Кроме того, такие элементы кроме значительных электромеханических нагрузок подвергаются длительным температурным воздействиям и коррозионным воздействиям. При таких условиях необходимы испытания на гигацикловую усталость. Проведение подобных испытаний на стандартном оборудовании требует значительных затрат времени и имеет высокую стоимость. При этом следует учитывать ряд несопадений в требованиях к испытаниям, изложенных в нормативных документах [1-4].

Использование масштабных моделей электропроводящих шин и явления пинч-эффекта в металлах [5,6], позволяет провести оценку комплексного воздействия механических, температурных и токовых нагрузках, близких к действующим на элементы при их эксплуатации. Использование коротких по длительности импульсов тока позволяет получить высокую частоту механических колебаний и за короткое время провести исследование на воздействие очень большого числа циклов.

Контроль механических воздействий выполняется по сигналам трехкомпонентного акселерометра, установленного на образце. При воздействии коротких импульсов осевые (вдоль образца) и радиальные ускорения асимметричны, а при увеличении длительности импульсов распределение ускорений становится близким к симметричному. Даже при относительно низкой плотности тока, обеспечиваемой переносной системой формирования импульсов можно обеспечить ускорения на образце несколько десятков g. Как показали эксперименты с комбинированным статическим нагружением и динамическими си-

лами от действия импульсных токов на образце формируются динамические силы величиной в до 1000 Н при средней плотности токов практически не приводящей к разогреванию образцов.

- 1.ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования
- 2.ГОСТ 28841-90. Машины для испытания материалов на усталость. Общие технические требования
- 3.ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия. 2000 г., 52 с.
- 4.РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РАО "ЕЭС РОССИИ", 1997 г., 153 с.
- 5.Троицкий О.А., и др. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства), том 1 и том 11 Изд-во АНО ИКИ (Москва - Ижевск) 2004 г., 563 стр и 467 с.
- 6.Троицкий О.А., Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом. Изв. АН СССР, сер. № 6, 1977, с.118 – 122.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЖРД

С.М. Усов<sup>1</sup>, Г.Н. Устинов<sup>2</sup>, И.Н. Одинцев<sup>1</sup>, А.А. Апальков<sup>1</sup>, А.И. Соколов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [sm\\_usov@mail.ru](mailto:sm_usov@mail.ru)

<sup>2</sup> ГНФ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Москва, Россия

**Аннотация.** В работе приводится исследование локального напряжённо-деформированного состояния паяных соединений с использованием метода корреляции цифровых изображений – оптического бесконтактного метода определения полей перемещений и деформаций. Рассматриваются технические и методологические аспекты применения метода КЦИ для решения экспериментально-расчётных задач, связанных с паяными соединениями.

**Ключевые слова:** паяные соединения, поля перемещений и деформаций, оптические методы измерений, корреляция цифровых изображений.

### Цель работы

Целью работы являлось изучение локального напряжённо-деформированного состояния (НДС) паяных соединений с использованием метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) [1-2]. Значимость работы состоит в том, что при использовании предлагаемых подходов ожидается получение более адекватных данных, характеризующих деформационно-прочностные свойства паяных соединений.

### Объект исследования

Объектами исследования являлись два одинаковых образца из спаянных стальных пластин с креплениями под оснастку испытательной машины. Методика испытания заключалась в регистрации полей перемещений и деформаций на поверхностях спаянных пластин в области паяного соединения при нагрузке объекта заданной растягивающей силой. Одна плоская поверхность регистрировалась полностью с помощью системы КЦИ VIC-3D, осуществляющую макросъёмку, а обратная – с помощью системы со стереомикроскопом VIC-Micro, осуществляющую микросъёмку.

### Проведение эксперимента

В ходе эксперимента использовалось следующее оборудование:

- Универсальная механическая испытательная машина Instron 5966 с нагрузкой до 10 кН;
- Оптико-цифровая система Correlated Solutions VIC-3D, состоящая из двух цифровых камер с разрешением 1624×1224 пикселей;
- Оптико-цифровая система Correlated Solutions VIC-Micro, состоящая из цифрового стереомикроскопа, снабжённого двумя цифровыми камерами разрешением 2448 × 2048 пикселей, устройства опволоконной подсветки исследуемой поверхности и трёхосевого манипулятора для перемещения и фокусировки стереомикроскопа.

Каждое нагружение выполнялось ступенчато с выдержкой пять секунд на определённых значениях нагрузки для осуществления регистрации объекта оптическими системами.

На рисунке 1 представлены полихроматические картины распределения продольных перемещений на крае образца в зоне наличия дефекта паяного слоя, зарегистрированные системой VIC-Micro, выражающие раскрытие берегов паяного слоя. На этом участке максимальное раскрытие берегов отставило примерно 1,5 мкм.

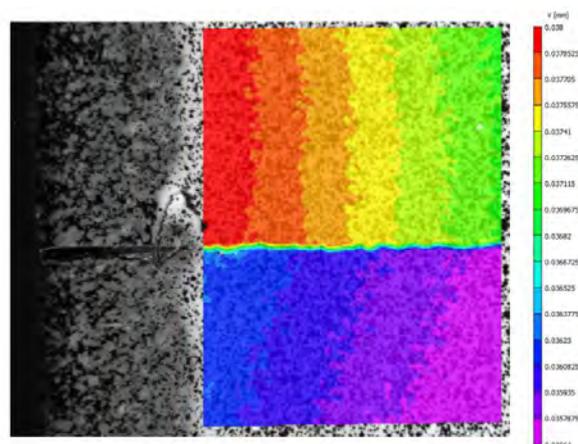


Рис. 1. Картина продольных перемещений на поверхности края образца № 1 в области дефекта (система VIC-Micro)

### Выводы

Работа показала потенциал метода КЦИ по исследованию характеристик НДС паяных соединений, обозначила первые технические аспекты подготовки подобных испытаний, их проведения и анализа получаемых результатов. В рамках работы было установлено, что для детального анализа возможностей применения метода КЦИ для решения экспериментально-расчётных задач, связанных с паяными соединениями, требуются как дополнительная углубленные исследования, так и решения некоторых методологических и технических вопросов.

1. Sutton M.A., Orteu J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications // Springer. 2009. – 321 p.
2. Pan B., Qian K., Xie Y., Asundi A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review // Measurement Science and Technology – 2009. – V.20. – P. 1-17.

## РАССЕИВАНИЕ ЭНЕРГИИ В КОНЧИКЕ ТРЕЩИНЫ В КОМПОЗИТАХ ИЗ ХРУПКИХ КОМПОНЕНТОВ СО СЛАБОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА

К.А. Хвостунков<sup>1</sup>, А.Б. Недбайло<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мех-мат МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия; khvostunkov@gmail.com

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

**Аннотация.** Дается оценка предельной величины рассеивания энергии при вытаскивании волокна в зависимости от плоскости и деградации зоны контакта волокно-матрица.

Волокнистые композиты из оксидной матрицы и оксидных волокон предназначены для работы в условиях высоких температур порядка 1000°C. Необходимо оценить возможность использования в плане рассеивания энергии таких существующих механизмов как разрушение области контакта волокно-матрица (интерфейса), отслаивание и вытягивание.

Рассмотрим однонаправленный волокнистый композит в условиях одноосного растяжения. Нагрузка прикладывается в направлении укладки волокон (вдоль оси  $y$ ). Магистральная трещина длиной  $c$  расположена ортогонально оси волокон (вдоль оси  $x$ ). Композит состоит из хрупких компонент. Упругая энергия при продвижении трещины расходуется не только на создание новой поверхности ( $\gamma$ ), но и на работу по вытягиванию оборванных волокон и отслоение волокон от матрицы ( $\gamma_p$ ).

В качестве критерия разрушения рассмотрим критерий квазихрупкого разрушения

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E(\gamma + \gamma_p)}{\lambda c}},$$

полученный на основе

критерия Гриффитса. Здесь  $\sigma_{th}$  - предел прочности при указанной схеме нагружения,  $E$  - модуль Юнга. В нашем случае  $\gamma_p$  - слагаемое, характеризующее затраты энергии на вытягивание волокон из матрицы.

Введем в рассмотрение процесс износа (истирания) в зоне контакта волокно-матрица как одного из процессов деградации интерфейса [1].

Пусть  $L$  средняя длина обрыва волокна радиуса  $r$ .

Работа по вытягиванию оборванного волокна с учетом распределений Вейбулла прочности пучка

$$\text{волокон: } A(x) = \int_0^{u_a} F(u) du.$$

Если мы не будем учитывать истирание покрытия, то подынтегральное выражение в зависимости для работы вытягивания будет иметь классический вид:  $F(u) = \tau 2\pi R(L - u)$ . При учете эффекта истирания

$$F(u) = \tau 2\pi R(L - u)e^{-Ku}, \quad K = \frac{E_m l_i \mu / R}{\frac{E_m}{E_f} + 1 + 2 \frac{V_f}{V_m}},$$

$l_i$  - коэффициент истирания интерфейса,  $\mu$  - коэффициент трения Кулона,  $u_a$  - величина раскрытия трещины,  $u$  - перемещение волокна,  $\tau$  - касательное напряжение в зоне проскальзывания,  $E_m$ ,  $E_f$  - Модули Юнга матрицы и волокна,  $V_f$  и  $V_m$  объемные доли волокна и матрицы, соответственно.

В предположении, что и средняя длина обрыва  $L$  и касательное напряжение при скольжении  $\tau$  зависят коэффициента плоскости покрытия  $\alpha$ , получаем:

$$A(\alpha) = \tau(\alpha)(C_1 + C_2 L(\alpha)),$$

$$C_1 = \frac{2V_f}{RK^2} [Ke^{-Ku_a} u_a + (e^{-Ku_a} - 1)],$$

$$C_2 = \frac{2V_f}{RK} [1 - e^{-Ku_a}]$$

Тогда из условия максимума работы вытягивания при некоем оптимальном уровне плоскости  $\alpha_1$  покрытия, удовлетворяющему условию

$$\frac{dA(\alpha)}{d\alpha} = \tau'(\alpha)(C_1 + C_2 L(\alpha)) + \tau(\alpha)C_2 L'(\alpha) = 0$$

, находим:  $A(\alpha_1) = C_2 C_3$ , где

$$C_3 = \tau \left( L + \frac{C_1}{C_2} \right)$$

### Выводы.

При любом разбросе прочностных свойств пучка волокон, выбирая оптимальную плоскость покрытия волокна для достижения максимума энергозатрат при его вытягивании матрицы, мы получаем один и ту же величину работы вытягивания.

1. К.А.Khvostunkov, A.G.Shpenev Fatigue fracture model for weak fiber/matrix interface composite within three point bending test // Key Engineering Materials, Volume 465, p161-164, 2011.

## СВЯЗЬ НАНОКОМПОЗИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА И ЕГО ФАЗ С ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

М.М.Хрущов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [michel\\_x@mail.ru](mailto:michel_x@mail.ru)

**Аннотация.** Изучены особенности химического и фазового состава, микроструктуры и трибологического поведения покрытий хрома, полученных в реактивном вакуумным напылением в среде кислорода, ацетилен и смеси ацетилен-азот. Обсуждаются корреляции между трибологическими свойствами покрытий, исследованных в широком диапазоне температур при трении в условиях несмазанного контакта и их композитной структурой на основе наноразмерных включений хрома и его оксидных, нитридных и карбидных фаз.

**Ключевые слова:** вакуумные ионно-плазменные покрытия, реактивное напыление, композитная структура, нанокompозиты, трибологические свойства.

Как показали исследования фазового состава, микромеханических и трибологических свойств, покрытия систем Cr-O, Cr-C-O, Cr-C-N и Cr-C-N-H обладают высокими трибохарактеристиками. Эти покрытия содержат оксидные, карбидные, нитридные фазы хрома, и общим для них является наличие композитной структуры на основе ультрадисперсных включений хрома и его фаз внедрения, обеспечивающей высокий уровень трибологических свойств. Так, в электронно-плазменных покрытиях (ЭПП) Cr-O обнаружена корреляция между условиями нанесения (парциальным давлением O<sub>2</sub> и температурой подложки), фазовым составом и структурой [1]. Покрытия, полученные в активных смесях кислород-азот и кислород-аргон, также показывают наличие подобных корреляций [2,3]. Результатами исследования ЭПП, нанесенных в N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> и их двойных смесях [4,5], показана возможность образования в ряде случаев микрообластей свободного углерода или твердых углеводородных продуктов, антифрикционным действием которых можно объяснить достаточно высокие трибологические свойства. Например, некоторые подобные ЭПП в ряде случаев обладают износостойкостью, превышающей износостойкость покрытий нитрида титана в пять и более раз. Это означает, в частности, что, контролируя содержание углевода или углеводородов в активной атмосфере, можно получить покрытия, обладающие включениями углерода в алмазоподобном состоянии, что обеспечит сочетание высоких механических и антифрикционных свойств. Подобные покрытия были получены нами методом реактивного магнетронного распыления хрома в смеси Ar+C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> при различных содержаниях азота и C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. В них аморфный углерод имеет алмазоподобную структуру. Покрытия являются нанокompозитными и содержат помимо аморфного углерода наноразмерные включения металлического хрома и его карбидных и нитридных фаз [6]. При этом образование дополнительно к наноструктурированным карбидам включений нитрида хрома позволило повысить твердость и трибологические свойства ( $f < 0,1$ ).

Выполненные нами высокотемпературные

трибологические испытания на воздухе показали, что использование атмосфер CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> при реактивном напылении покрытий способствует значительному повышению износостойкости в диапазоне температур от комнатной до 1023 К. При этом учет особенностей структуры и фазового состава покрытий позволил объяснить некоторые особенности их трибологического поведения, наблюдавшиеся при повышении температуры.

В заключение отметим, что создание покрытий хрома с нанокompозитной структурой является перспективным при получении покрытий с высокими противозносными и антифрикционными свойствами в широком интервале температур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-00802) и Программы ОЭММПУ РАН «Многоуровневое исследование свойств и поведения перспективных материалов для современных узлов трения» (проект № 12).

1. Семенов А.П., Сорокко А.А., Хрущов М.М. Влияние режимов нанесения реактивным электронно-плазменным методом покрытий системы Cr-O на их состав, механические и трибологические свойства // Трение и износ. 1990. Т.11. № 6. С.1094-1102.
2. Хрущов М.М., Сорокко А.А. Состав активной атмосферы и особенности структурных и трибологических характеристик реактивных электронно-плазменных покрытий системы хром-кислород // Трение и износ. 1994. Т.15. № 5. С.830-837.
3. Хрущов М.М. Структурные характеристики и триботехнические свойства покрытий хрома, полученных реактивным напылением в кислородосодержащих смесях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 1. С.11-18.
4. Хрущов М.М., Сорокко А.А., Семенов А.П. Об особенностях фазового состава титановых и хромовых покрытий, получаемых реактивным напылением в среде активных газов // Металлы. 2007. № 3. С.85-93.
5. Хрущов М.М., Семенов А.П. Фазовый состав, микроструктура и трибологические свойства электронно-плазменных покрытий на основе хрома // Трение и износ. 2013. Т.34. № 1. С.72-81.
6. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А., Петрижик М.И., Левин И.С. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия а-C:H:Cr – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН. Сер. физ.-матем. науки. 2014. Т.78. № 10. С.1257-1265.

## ЛЕГИРОВАННЫЕ АЛМАЗОПОДОБНЫЕ ПОКРЫТИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПОВЕДЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ

М.М.Хрущов<sup>1</sup>, Е.А.Марченко<sup>1</sup>, М.В.Атаманов<sup>2</sup>, А.А.Дубравина<sup>1</sup>, И.С.Левин<sup>1,3</sup>,  
Ю.А.Тарелкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия, [michel\\_x@mail.ru](mailto:michel_x@mail.ru);  
<sup>2</sup> ЗАО «ИНАКОТЕК», Москва, Россия; <sup>3</sup> Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

**Аннотация.** Изучали легированные алмазоподобные пленки, полученные путем плазмохимического осаждения из паровой фазы (РА CVD) и магнетронного напыления в углеводородсодержащей активной атмосфере. Проведен сравнительный анализ особенностей структуры, микромеханических и трибологических характеристик.

**Ключевые слова:** алмазоподобные углеродные покрытия, твердость, трение, работоспособность, трение, нанокомпозитная структура.

Одним из способов повысить износостойкость алмазоподобных углеродных покрытий (а-С и а-С:Н), не снижая их антифрикционных свойств, является легирование и создание нанокомпозитов на основе фаз, образующих ультрадисперсные включения. В работе изучали легированные алмазоподобные пленки, полученные путем плазмохимического осаждения из паровой фазы (РА CVD) и магнетронного напыления в смесях ацетилена с азотом различного состава.

При комплексном исследовании порывитий, нанесенных на подложки из ряда конструкционных сталей использовали рентгеновскую дифрактометрию, оптическую и электронную микроскопию, зондовый микроанализ, рамановскую спектроскопию, методы микро- и наноиндентирования. Трибологические испытания проводили на шариковом трибометре в паре с нитридом кремния по схеме сфера-плоскость.

Результаты трибологических испытаний покрытий, легированных кремнием и кремнием-молибденом, показали, что при трении в паре с Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> покрытия обладают низкой работоспособностью и высоким коэффициентом трения. Исключение составили покрытия а-С:Н:Si на стали 95X18, долговечность которых, несмотря на коэффициент трения  $\geq 0,5$  при сухом трении составила более 6000 циклов, и которые были работоспособны при давлениях на контакте до  $\sim 400$  МПа [1]. Эти покрытия показали низкую твердость при наноиндентировании. Легирование а-С:Н:Si молибденом привело к значительному, на треть, уменьшению содержания углерода и к более, чем двукратному, увеличению содержания кремния (рост  $\sim 20$  ат.%), и была высока вероятность того, что вместо карбидов в покрытиях а-С:Н:Si:Mo могли образовываться силициды молибдена, а доля алмазоподобной углеродной фазы в них могла резко понизиться по сравнению с а-С:Н:Si.

Кроме того, электронно-микроскопическое исследование дорожек трения CVD покрытий обоих типов показало наличие значительного количества являющихся продуктами трения микрочастиц с химическим составом, близким SiO<sub>2</sub>.

Фазовый состав покрытий, легированных хромом, по данным РСА представлен в таблице.

Зависимость фазового состава покрытий а-С:Н:Cr:N от состава активной атмосферы

C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : N <sub>2</sub>	Фазовый состав
100 : 0	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> + Cr + а-С:Н
80 : 20	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + Cr + а-С:Н
60 : 40	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> + CrN + Cr + а-С:Н
40 : 60	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + Cr <sub>2</sub> N + Cr + а-С:Н
20 : 80	Cr <sub>3</sub> C + Cr <sub>2</sub> N (искаж.) + Cr + а-С:Н

Из этих данных видно что хром в покрытиях присутствует в виде включений хрома, его карбидных и нитридных фаз. Размер ОКР хрома, порядка 8 нм в чистом ацетиле, и имеет тенденцию увеличиваться при увеличении доли азота в смеси. Размер ОКР нитридных и карбидов был существенно ниже, порядка 1-2 нм. Измерения нанотвердости и модуля упругости показывают, что образование и рост доли нитридных фаз в покрытиях а-С:Н:Cr:N способствуют росту их микромеханических свойств.

Измерения коэффициента трения  $f$  покрытий на шариковом трибометре показали, что у покрытий, нанесенных в C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>,  $f$  меняется в диапазоне от 0.15 до 0.35, причем изменение  $f$  с нагрузкой  $P$  носит немонотонный характер. С увеличением доли азота  $f$ , в целом, уменьшается. Так, при содержаниях N<sub>2</sub> в смеси 60 и 80 об.%  $f$  незначительно колеблется вблизи 0.1. При этом в смеси с 80 % азота коэффициент трения остается на уровне  $\sim 0.08$  практически во всем диапазоне нагрузок. Нанесение покрытий а-С:Н:Cr:N также способствовало значительному росту работоспособности поверхностей трения.

1. Хрущов М.М., Марченко Е.А., Семенов А.П. Трибологические характеристики алмазоподобных покрытий, легированных молибденом и кремнием // Изв. СамНЦ РАН. 2011. Т.13. № 4. С.1248—1251

2. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А. и др. Алмазоподобные нанокомпозитные покрытия а-С:Н:Cr – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН. Сер. физич. 2014. Т.78. № 10. С.1257-1265.

## ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛИВАНИЯ В ЖИДКОМ АЗОТЕ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ АНТИФРИКЦИОННОГО СПЛАВА Б-83

П.Д.Чхетиани, Ю.И.Щербаков, О.В.Бармина, Н.Н.Новикова

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [Pavelnew1@yandex.ru](mailto:Pavelnew1@yandex.ru)

**Аннотация.** Путём интенсивного охлаждения расплавленного антифрикционного сплава Б-83 в жидком азоте удалось уменьшить объём единичного кристалла SbSn при одновременном увеличении их количества, что привело к уменьшению параметров шероховатости  $R_z$  и  $R_{max}$  после шлифовки на 7-9%. Различными методами определены модули Юнга Б-83, как охлаждённых на воздухе, так и в жидком азоте. Показано, что механические характеристики антифрикционных материалов с твёрдыми кристаллами в мягкой матрице должны определяться при испытаниях на сжатие.

**Ключевые слова:** модуль Юнга, антифрикционный сплав Б-83, жидкий азот, кубические кристаллы SbSn, микротвёрдость, ресурс узлов трения.

Баббиты известны как антифрикционные сплавы и успешно используются в узлах трения в течение последних 170 лет.

Согласно одной из гипотез «работы» баббита Б-83 в качестве антифрикционного сплава кубические кристаллы SbSn (50%+50%) частично выступающие над матрицей SnSb (93%+7%) первыми воспринимают нормальные и касательные силы в зоне трения. При этом они, погружаясь в матрицу и перекатываясь в ней, периодически вступают в контакт с контртелом очередными своими гранями. В предположении, что большее количество синхронно вступающих в контакт с контртелом кубических кристаллов SbSn потенциально обеспечить большую несущую способность зоны трения, была поставлена задача уменьшения объёма единичного кристалла при одновременном увеличении их количества.

Предполагалось также, что наличие выступающих над поверхностью матрицы граней кристаллов меньших, чем штатный, размеров, будет способствовать повышению качества трущихся поверхностей после их механической обработки, являющегося одним из важных условий возникновения сплошной гидродинамической смазочной плёнки – гаранта кардинального увеличения ресурса узлов трения и существенного снижения энергетических потерь в них.

Поставленная задача решалась путём интенсивного охлаждения расплавленного Б-83 в жидком азоте с т-ры 693К до т-ры 77К (с 420°C до -196°C).

Важность точного знания величины модуля упругости материала хорошо известна специалистам, однако, до настоящего времени у них был ограниченный выбор. Например, трибологические матери-

алы которых работают на сжатие не могли, из-за почти полного отсутствия, воспользоваться величинами модуля Юнга, полученными при испытаниях на сжатие.

Модуль упругости традиционно определяется при испытаниях на растяжение, являющихся одними из наиболее распространённых и технически наименее сложных. Ещё менее технически сложным является радиотехнический метод определения модуля Юнга. Тем не менее, исходя из функционального назначения Б-83-узлы трения, в настоящем исследовании используется метод определения модуля упругости путём испытаний цилиндрических образцов на сжатие, требующий высококлассного испытательного оборудования и технически более точно изготовленных образцов, чем в испытаниях других типов.

Выбор метода испытаний на сжатие продиктован ещё и структурой исследуемого материала, представляющей собой относительно мягкую матрицу SnSb (микротвёрдость – 28кгс/мм<sup>2</sup>), в которой в большом количестве имеются существенно более твёрдые, чем матрица кристаллы SbSn (микротвёрдость – 80кгс/мм<sup>2</sup>). Само собой разумеется, что в отличие от испытаний на растяжение, при испытаниях на сжатие в зависимости от величины деформации образца и расстояний между кристаллами в нём последние могут взаимодействовать, вплоть до соприкосновения друг с другом, повышая тем самым, величину сопротивления деформации образца.

**Результаты экспериментальных исследований:** образцы, охлаждённые в жидком азоте, имели после шлифовки в среднем на 6-9% меньшие величины шероховатости поверхностей -  $R_z$  и  $R_{max}$ , чем образцы охлаждённые на воздухе.

Способ	Испытательное устройство	$E_B$ МПа, (кгс/мм <sup>2</sup> )	$E_A$ МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )
Растяжение $\sigma_B=6,30\text{кгс/мм}^2$ $:\sigma_A=7,25\text{кгс/мм}^2$	«Instron» Модели 1115	55000 (5600)	58000 (5900)
Изгиб	Маятниковый эластиметр Роллан-Сорена	52000 (5300)	53000... (5400)
Динамический	Ультразвуковой прибор ДУК-20	56000 (5700)	53000... (5400)
Сжатие Интервал напряжений	«Zwick» модель Universalprufmaschine тип «1454»	63500 (6470)	77100 (7860)

$E_B$  – модули Юнга Б-83, охлаждённого на воздухе при 293К (20°C)

$E_A$  – модули Юнга Б-83, охлаждённого в жидком азоте при 77К (-196°C)

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ СОЗДАНИИ АВТОБАЛАНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Л. Н. Шаталов

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; [shatlev37@mail.ru](mailto:shatlev37@mail.ru)

**Аннотация.** Работа посвящена решению задачи по созданию автобалансирующих устройств на основе управляемой энергии импульсного магнитного поля. Балансировка осуществляется путем нанесения дискретных порций балансирующего вещества на поверхность балансируемого ротора. Проведены исследования балансирующих веществ и динамики наносимых порций.

**Ключевые слова:** ротор, балансировка, автобалансирующее устройство, балансирующее вещество, импульсное магнитное поле

Современная концепция развития методов и средств балансировки направлена на повышение точности, производительности и полную автоматизацию балансирующего процесса.

В ИМАШ РАН были разработаны и проведены экспериментальные исследования опытных образцов автобалансирующих устройств (АБУ) на основе управляемой энергии импульсного магнитного поля (ИМП).

Управляемая энергия ИМП используется для получения ударных импульсов в исполнительном органе (ИО) АБУ, под действием которых происходит выброс дискретных порций балансирующего вещества. На рис. 1 представлена принципиальная схема генератора импульсных токов (ГИТ) АБУ с ИО с плоским индуктором

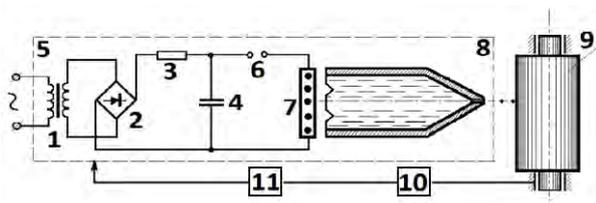


Рис.1. Принципиальная схема генератора импульсных токов с плоским индуктором

Трансформатор 1, выпрямитель 2, сопротивление 3 и емкость 4 образуют зарядный контур 5, а емкость 4, коммутирующее устройство 6 и индуктор 7 образуют разрядный контур ГИТ 8.

Величина электромагнитных (пндеромоторных) сил при допущениях о поверхностном эффекте распространения электромагнитного поля на глубину проникновения  $\Delta t$  (скиновая глубина)

$$\Delta t = \frac{1}{B_0(t)} \int_0^s B_0(t, x) dx,$$

где  $B_0(t)$  - индукция магнитного поля,  $x$  - эйлера координата; может быть определена в виде

$$P = \mu_0 \frac{N^2 W}{L} \exp(-2\beta t) \sin^2 \omega t,$$

где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость,  $N$  - число витков на единицу длины индуктора,  $W = 0,5 E_0 C^2$  - энергия разряда,  $\beta$  - коэффициент скорости затухания,

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \beta^2},$$

где  $\omega$  - угловая частота,  $t$  - время.

Импульс этого давления, передаваемый камере с балансирующим веществом, описывается уравнением

$$P_B \approx P_0 K_2 + P_0 \sin^2 \omega t,$$

где

$$P_0 = \frac{N^2 W}{L} \exp\left(-\frac{\pi \beta}{\omega}\right),$$

а  $K_2$  коэффициент сопротивления тракта передачи импульса давления.

Выброс дискретных порций через сопло рабочей камеры ИО осуществляется под действием управляемых ударных импульсов.

В общем виде давление в камере, необходимое для выброса дискретных порций можно представить в виде

$$P = \frac{\rho V^2}{2} + \frac{K \rho v^2}{2} + \frac{32 \rho v^2 l}{d^2} + \frac{2 \alpha_d}{d},$$

где  $P$  - давление в рабочей камере;  $\rho$ ,  $v$  - плотность и кинематический коэффициент вязкости вещества;  $K$  - коэффициент. Учитывающий гидравлические потери на входе в сопло;  $d$  - диаметр сопла;  $\alpha_d$  - динамический коэффициент поверхностного натяжения вещества.

Высокая точность и производительность балансировки достигаются за счет одновременного измерения и устранения дисбаланса, а также пропорциональности наносимых дискретных порций корректирующих масс величине дисбаланса.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили перспективность выбранного научного направления при создании высокоэффективной инновационной технологии и конкурентоспособной продукции на мировом рынке.

1. Гусаров А.А. и др. Автоматическая балансировка роторов машин. М.: Наука. 1979. 152 с.

## ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА КОМБАЙНА

С.С. Щербаков, О.А. Насань

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь; [sherbakovss@mail.ru](mailto:sherbakovss@mail.ru)

**Аннотация.** Проведено компьютерное моделирование системы противорезущий брус / нож / прижим / основание / болты режущего барабана комбайна КВК 800 производства ПО «ГОМСЕЛЬМАШ» в динамической постановке. Оценка объемной повреждаемости системы основанна на модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

**Ключевые слова:** трибофатическая система, удар, чугуи ВЧТГ, повреждаемость, опасный объем

### Постановка задачи

Объект исследования – многоэлементная трибофатическая система противорезущий брус / нож / прижим / основание / болты, являющаяся одним из наиболее ответственных узлов режущего барабана комбайна КВК 800 производства ПО «ГОМСЕЛЬМАШ». В данной системе реализуется как динамическое ударное контактное взаимодействие с трением между ее различными элементами, так и динамический неконтактный изгиб ножа.

В пакете ANSYS проведено компьютерное моделирование данной системы при ее ударном нагружении в условиях резания зеленой массы с учетом волновых эффектов. Разработана методика расчета состояний объемной повреждаемости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ в условиях динамического нагружения, основанная на модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

Система движется со скоростью 125,664 рад/с, вращаясь вокруг центра режущего барабана в соответствии с рисунком 1.



Рис. 1. Схема работы режущего барабана комбайна

Зеленая масса и противорезущий брус находятся в условиях жесткой сцепки. Усилие затяжки болтовых соединений равно 60 кН для каждого болта. Нижняя поверхность основания жестко закреплена (моделируется жесткая сцепка с внешней поверхностью барабана). Задняя стенка противорезущего бруса также жестко закреплена.

### Напряженное состояние и состояние повреждаемости

Из рисунка 2 видно, что напряженно-деформированное состояние системы вследствие удара представляет собой сложную картину интерференции волновых пакетов и их отражений от геометрически неоднородных поверхностей, ограни-

чивающих нож.

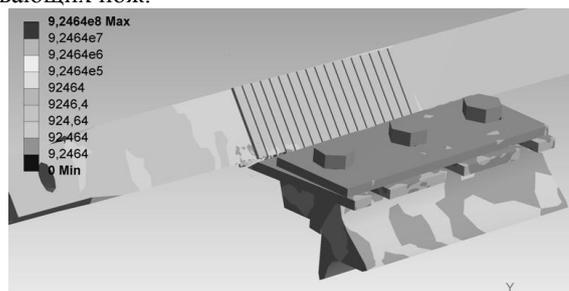


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений в момент времени 0,00033 с

В ноже  $V$  (опасные объемы) и  $\Psi$  (повреждаемость) рассчитывались и анализировались для различных эквивалентных напряжений.

Например, для интенсивности напряжений  $\sigma_{int}$   $V$  и  $\Psi$  будут следующими:

$$V_{int} = \int_{\Psi_{int} \geq 1} dV, \quad \Psi_{int} = \int_{\Psi_{int} \geq 1} \Psi_{int} dV,$$

где  $\Psi_{int} = \sigma_{int} / \sigma_{int}^{lim}$ ,  $\sigma_{int}$  – предельная интенсивность напряжений.

$V$  и  $\Psi$  принимают наибольшие значения в начале и в конце процесса резания (см. рис. 3). Это может объясняться тем, что в данные моменты времени напряжения в ноже распределяются в меньшем объеме материала (в углах ножа) по сравнению с основным процессом резания, когда работает средняя часть ножа.

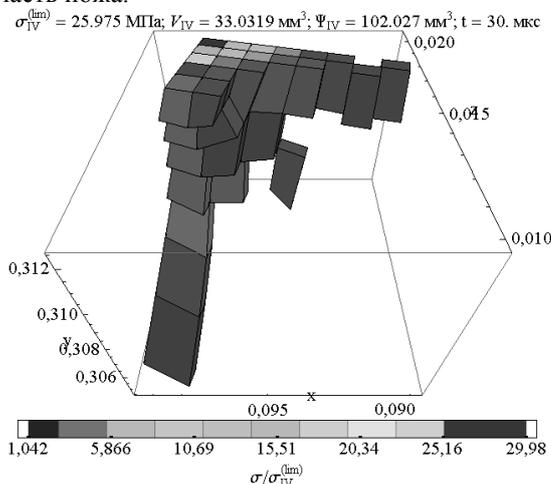


Рис. 3. Опасный объем в ноже в момент времени  $t = 30$  мкс, рассчитанный по  $\sigma_{int}$  при  $\sigma_{int}^{lim} = 25,975$  МПа

## ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТИ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ПММА СТЕКЛА

Н.О. Яковлев

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия; Nick\_62@mail.ru

**Аннотация.** Для полимерного органического ПММА стекла получены кривые, ограничивающие область упруго-высокоэластического поведения – кривые равновесного, квазиупругого, начала вынужденно-эластического деформирования и разрушения. Определены границы области релаксационного поведения ПММА.

**Ключевые слова:** релаксация, кривая равновесного нагружения, полиметилметакрилат, органическое стекло, высокоэластическая деформация, вынужденно-эластическая деформация

Релаксационное поведение термопластичных аморфных полимеров, к которым относятся органические стекла на основе полиметилметакрилата (ПММА), связано с присущей им развивающейся во времени высокоэластической (ВЭ) деформацией.

Исследование закономерностей развития и последующего спада ВЭ деформации позволяет получить границы области релаксационного поведения полимера «рис. 1».

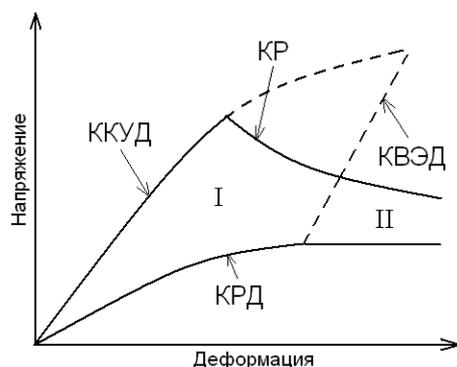


Рис. 1. Область упруго-высокоэластического поведения (I) и развития вынужденно-эластической деформации (II)

Область I упруго-высокоэластического поведения ПММА органического стекла в плоскости «напряжение – деформация», ограничена:

– кривой равновесного деформирования (КРД), получаемой при деформировании полимера с такой скоростью, при которой протекает полное развитие ВЭ деформация, т.е. при нагрузке-разгрузке по которой отсутствует гистерезис;

– кривой квазиупругого деформирования (ККУД), получаемой при деформировании полимера с такой скоростью, при которой ВЭ деформация не успевает развиваться, при этом петля гистерезиса также должна отсутствовать;

– кривой вынужденно-эластической деформации (КВЭД), после которой в полимере начинается развитие вынужденно-эластической деформации, сопровождающейся чаще всего образованием шейки.

Область II развития вынужденно-эластической деформации в полимере ограничена кривыми КВЭД, КРД и кривой разрушения (КР).

В данной работе на основе экспериментальных данных для авиационного органического стекла

марки СО-120 на основе ПММА и литературных данных для ПММА определены границы области релаксационного поведения полимера при комнатной температуре «рис. 2» [1].

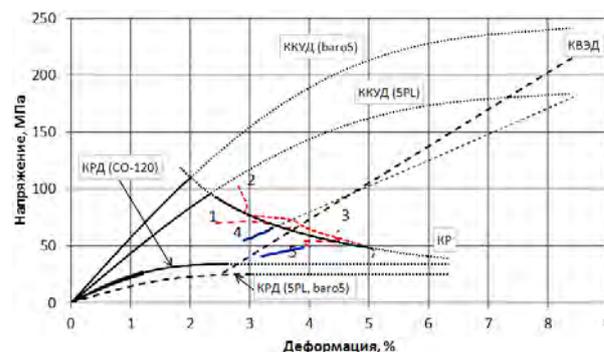


Рис. 2. Область упруго-высокоэластического поведения ПММА органического стекла: (1) – КР для СО-120, (2) и (3) – КР по литературным данным, (4) и (5) – КВЭД по литературным данным.

ККУД и КРД были получены с использованием концепции обобщенной деформационной кривой (ОДК) для полимерных стекол [2], согласно которой соотношение основных механических параметров полимерных стекол является константой независимо от химической структуры стекол, скорости, температуры и режима деформирования, а также с использованием при обработке экспериментальных данных логистических многопараметрических несимметричных функции *baro5* и *5PL*.

КР и КВЭД были получены аппроксимацией экспериментальных данных.

По результатам работы была показана возможность построения ККУД и КРД вплоть до предела вынужденно-эластичности, в т. ч. по ограниченными экспериментальными данными (начальным участкам диаграмм деформирования) с использованием концепции ОДК для полимерных стекол.

Работа проведена при использовании оборудования ЦКП «Климатические испытания» ФГУП «ВИАМ».

1. Яковлев Н.О. Оценка границ области релаксационного поведения органического стекла на основе полиметилметакрилата // Пластические массы. 2014. №7
2. Луковкин Г.М., Аржаков, М.С., Салько А.Е., Аржаков С.А. О природе обобщенного физико-механического поведения полимерных стекол // Деформация и разрушение материалов. 2006. №6. С. 18–24.



<b>П</b>										Торская Е.В.	37
Панов А.Н.	54	55								Троицкий О.А.	74
Петржик М.И.	56									<b>У</b>	
Петрова И.М.	20	57								С.М. Усов,	75
Петухов А.Н.	58									Г.Н. Устинов	75
Плитов И.С.	59									<b>Ф</b>	
Полилов А.Н.	59	60	73							Франгулов С.В.	40 41
Правоторова Е.А.	61	74								<b>Х</b>	
Прищепов С.В.	40									Хвостунков К.А.	76
Псырков Н.В.	32	36								Хрущов М.М.	38 77 78
Пугачев М.С.	15	50								<b>Ц</b>	
<b>Р</b>										Цвик Л.Б.	33
Резников Д.О.	47	62								<b>Ч</b>	
Ризаханов Р.Н.	40	41								Чиркунова С.В.	37
Романов А.Н.	63	64								Чхетиани П.Д.	79
Руденко В.А.	65									<b>Ш</b>	
Русинов П.О.	21									Шальнов С.А.	38
Рябкова В.В.	13									Шаталов Л.Н.	80
<b>С</b>										Шашурин Г.В.	72
Северов П.Б.	66									<b>Щ</b>	
Серёгин С.В.	67									Щербаков С.С.	81
Сигалаев С.К.	40	41								Щербаков Ю.И.	79
Скворцов О.Б.	61	68	74							Щербакова Г.И.	26
Соколов А.И.	75									<b>Э</b>	
Сосновский Л.А.	32	36	39	42	69	70				Эрлих Б.М.	34
Сташенко В.И.	74									<b>Я</b>	
Степаненко М.А.	21									Яковлев Н.О.	82
Столяров В.В.	71										
Сысоев О.Е.	67										
<b>Т</b>											
Тараканов П.В.	72										
Таранова Е.С.	36	69									
Татусь Н.А.	73										
Тарелкин Ю.А.	78										
Темников Е.А.	70										
Толстогузов А.Б.	19										