

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Бережко Б. И., Оленин М. И., Горынин В. И., Стольный В. И. *Повышение сопротивления хрупкому разрушению высокохромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритного классов за счет гомогенизирующего отжига* ..... 7
- Милюц В. Г., Цуканов В. В., Петров С. Н., Ефимов С. В. *Повышение чистоты корпусной стали, обработанной комплексными модификаторами* ..... 14
- Каблов Е. Н., Ночовная Н. А., Грибков Ю. А., Ширяев А. А. *Разработка высокопрочного титанового псевдо-β-сплава и технологий получения полуфабрикатов из него* ..... 23
- Леонов В. П., Счастливая И. А., Рогожкин С. В., Никитин А. А., Орлов Н. Н., Козодаев М. А., Васильев А. А., Орехов А. С. *Исследование наноструктуры опытного титанового сплава композиции Ti-5Al-4V-2Zr* ..... 32
- Бондаренко Ю. А.; Ечин А. Б. *Направленная кристаллизация жаропрочного сплава с переменным управляемым градиентом* ..... 50
- Аргинбаева Э. Г., Оспенникова О. Г., Базылева О. А., Туренко Е. Ю., Шестаков А. В. *Расчет параметров монокристаллического интерметаллидного сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al* ..... 59

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Пугачева Н. Б., Задворкин С. М., Быкова Т. М. *Влияние диффузионных боридных покрытий на электромагнитные свойства штамповой стали* ..... 66
- Щербак А. Г., Беляев С. Н., Логинов Б. А. *Исследование процесса формирования тонкопленочных функциональных хромовых покрытий на сферических прецизионных узлах гиросприборов* ..... 74
- Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Васильева О. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Ешмететьева Е. Н., Мухамедзянова Л. В., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А. *Биотехнологические исследования, проводимые в научном нанотехнологическом центре ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»* ..... 82
- Марков М. А., Снимщиков Д. В., Красиков А. В. *Трибологические экспресс-исследования износостойкой керамики на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с волокнами SiC в паре трения со сталью* ..... 97

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Железина Г. Ф. *Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба* ..... 104

**СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

- Ерофеев В. А., Пьянков И. Б. *Физико-математическая модель процесса стыковой контактной сварки оплавлением* ..... 115

**КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ**

- Луценко А. Н., Курс М. Г., Лаптев А. Б. *Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор* 126
- Лось И. С. *Оценка коррозионной стойкости многослойных металлических материалов* ..... 138

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

- Виленский О. Ю., Лапшин Д. А., Малыгин М. Г. *Расчетный анализ и оценка последствий падения контейнера с теплообменником на надреакторное перекрытие РУ БН-1200* ..... 145

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Марголин Б. З., Сорокин А. А., Швецова В. А., Минкин А. И., Потапова В. А., Смирнов В. И. *Влияние радиационного набухания и особенностей деформирования на процессы разрушения*

<i>облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 1. Пластичность и трещиностойкость</i> .....	159
Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Швецова В. А., Потапова В. А. <i>Влияние радиационного распухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 2. Скорость роста усталостных трещин</i> .....	192
Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Потапова В. А. <i>К вопросу о моделировании теплового старения посредством нейтронного облучения и отжига</i> .....	211
<b>ХРОНИКА</b>	
<i>Памяти выдающегося ученого-металлофизика Эдуарда Викторовича Козлова</i> .....	220
<i>Информационное сообщение</i> .....	222
<b>Рефераты публикуемых статей</b> .....	223
<b>Авторский указатель</b> .....	233
<b>Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов</b> .....	235

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 669.15–194/55:621.785.3

### **Повышение сопротивления хрупкому разрушению высокохромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритного классов за счет гомогенизирующего отжига.**

Бережко Б. И., Оленин М. И., Горынин В. И., Стольный В. И. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 7–13.

На основе исследований структурных превращений при гомогенизации и последующем термическом улучшении конструкционной стали марки 15X11МФБ установлено, что введение гомогенизации перед окончательной термической обработкой обеспечивает повышение сопротивляемости хрупкому разрушению стали без снижения ее прочностных свойств.

*Ключевые слова:* мартенситные и мартенситно-ферритные стали, гомогенизирующий отжиг, структурные превращения, сопротивляемость хрупкому разрушению.

УДК 621.14.018.293:669.046.516

### **Повышение чистоты корпусной стали, обработанной комплексными модификаторами.**

Милюц В. Г., Цуканов В. В., Петров С. Н., Ефимов С. В. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 14–22.

Исследовано влияние количества вводимого комплексного модификатора с РЗМ при внепечной обработке высокопрочной корпусной стали на загрязненность неметаллическими включениями. Использование оптимального количества РЗМ наряду с применением базовой технологии модифицирования феррокальцием позволяет получить сталь, чистую по включениям, с обеспечением высокого уровня ударной вязкости и пластичности в Z-направлении. Исследование морфологии и элементного состава включений методом рентгеноспектрального микроанализа показало, что крупные неметаллические включения представляют собой многофазные конгломераты оксидов разного состава с небольшим количеством сульфидной фазы.

*Ключевые слова:* корпусная сталь, РЗМ, рентгеноспектральный микроанализ, феррокальций, модифицирование, неметаллические включения.

УДК 669.295

### **Разработка высокопрочного титанового псевдо-β-сплава и технологий получения полуфабрикатов из него.** Каблов Е. Н., Ночовная Н. А., Грибков Ю. А., Ширяев А. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 23–31.

Разработан высокопрочный титановый псевдо-β-сплав марки VT47, легированный редкоземельными металлами, предназначенный для изготовления сложнопрофильных листовых конструкций летательных аппаратов. Приведен комплекс механических и технологических свойств сплава VT47 после его термической обработки по различным режимам. Показаны возможности создания новых материалов с регламентированной β-структурой.

*Ключевые слова:* титановые псевдо-β-сплавы, легирование, редкоземельные металлы, термическая обработка, регламентированная β-структура.

УДК 669.295:621.039.531:620.187

### **Исследование наноструктуры опытного титанового сплава композиции Ti–5Al–4V–2Zr.**

Леонов В. П., Счастливая И. А., Рогожкин С. В., Никитин А. А., Орлов Н. Н., Козодаев М. А., Васильев А. А., Орехов А. С. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 32–49.

Исследованы микроструктура и химический состав фаз и включений в образцах из титановых сплавов Ti–5Al–4V–2Zr в исходном состоянии, после облучения ионами титана до дозы радиационного повреждения ~1 сна при температуре 260°C и термического старения при 450°C в течение 1000 ч. Микроструктурные исследования выполнены методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии. Анализ фаз выполнен с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Представлены результаты элементного анализа зерен матричной фазы и включений β-фазы. Методами атомно-зондовой томографии

проанализировано пространственное распределение химических элементов в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах. В облученном материале обнаружено образование наноразмерных сегрегаций ванадия в переходной зоне  $\alpha$ -фазы.

*Ключевые слова:* титановый сплав, фазовый состав, химический состав, доза облучения, радиационное повреждение, наноразмерные сегрегации.

УДК 669.245:621.746.6

**Направленная кристаллизация жаропрочного сплава с переменным управляемым градиентом.** Бондаренко Ю. А., Ечин А. Б. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 50–58.

Представлены результаты исследований условий направленной кристаллизации с переменным управляемым градиентом на особенности структуры образцов никелевого жаропрочного сплава с монокристаллической структурой с КГО  $\langle 001 \rangle$ . Результаты исследования микроструктуры полученных образцов свидетельствуют, что с ростом температурного градиента от 20 до 200°C/см междендритное расстояние уменьшается в  $\sim 2$  раза, размер частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы в осях и межосном пространстве дендритов – в 2,5–3 раза, размер частиц  $\gamma/\gamma'$ -эвтектики – в 2,5 раза, объемная доля микропористости – в  $\sim 10$  раз. При повышении температурного градиента также уменьшается дендритная ликвация, а на монокристаллических образцах исследуемого сплава в литом состоянии наблюдается повышение уровня механических свойств.

*Ключевые слова:* направленная кристаллизация, жаропрочный сплав, температурный градиент, упрочняющая  $\gamma'$ -фаза,  $\gamma/\gamma'$ -эвтектика, дендритная ликвация, микропористость, кратковременная прочность, длительная прочность.

УДК 669.24'71

**Расчет параметров монокристаллического интерметаллидного сплава на основе  $Ni_3Al$ .** Аргинбаева Э. Г., Оспенникова О. Г., Базылева О. А., Туренко Е. Ю., Шестаков А. В. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 59–65.

При разработке новых интерметаллидных сплавов возникает необходимость применения расчетов, позволяющих уменьшить количество экспериментов при поиске оптимального состава. Представлена методика расчета интерметаллидного монокристаллического  $Ni_3Al$  на основе регрессионного анализа имеющихся статистических данных с учетом сбалансированности химического и фазового составов по электронной концентрации и атомной массе.

*Ключевые слова:* интерметаллид никеля, монокристалл, жаропрочность, структура, кристаллографическая ориентация, период кристаллической решетки, мисфит, методика расчета.

УДК 621.793.6:669.14.018.258: 537.622

**Влияние диффузионных боридных покрытий на электромагнитные свойства штамповой стали.** Пугачева Н. Б., Задворкин С. М., Быкова Т. М. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 66–73.

Исследованы фазовый и химический составы диффузионного боридного покрытия на штамповой стали 4Х5МФС. Определены значения электромагнитных свойств образцов без покрытия и с диффузионными боридными покрытиями разной толщины. Показано, что борирование стали изменяет параметры петли магнитного гистерезиса, увеличивая значения коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и уменьшая магнитную проницаемость. С увеличением толщины боридного покрытия магнитные характеристики изменяются незначительно, а значения удельного электросопротивления возрастают. Измерение значений максимальной дифференциальной магнитной проницаемости может быть использовано при контроле наличия боридного покрытия толщиной не менее 100 мкм на штампах после эксплуатации при решении вопроса о продлении ресурса, а значений электросопротивления – для контроля толщины покрытия.

*Ключевые слова:* сталь, штамп, покрытие, бориды, диффузия, петля гистерезиса, коэрцитивная сила, магнитная индукция, максимальная дифференциальная магнитная проницаемость, удельное электросопротивление.

УДК 621.793.7:669.26:539.23

**Исследование процесса формирования тонкопленочных функциональных хромовых покрытий на сферических прецизионных узлах гироскопов.** Щербак А. Г., Беляев С. Н., Логинов Б. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 74–81.

Представлены результаты исследований по напылению пленок хрома толщиной от десяти нанометров до единиц микрометра на сферические поверхности прецизионных изделий. Предложены технические решения по разработке средств оснащения и методике контроля толщины покрытий непосредственно в процессе напыления. Приведены зависимости электропроводности пленок от их толщины и условий напыления, а также данные по влиянию покрытий на рабочие параметры изделий на примере сплошного бериллиевого ротора электростатического гироскопа. Определены перспективы использования разработанной технологии для решения конкретных задач улучшения рабочих характеристик узлов гироскопов.

*Ключевые слова:* сферический ротор, хромовые покрытия, магнетронное напыление, электрическое сопротивление, гранулометрический состав, растровый рисунок, контрастность.

УДК 621.793:615.4

**Биотехнологические исследования, проводимые в научном нанотехнологическом центре ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей».** Горынин И. В., Орыщенко А. С., Фармаковский Б. В., Васильева О. В., Васильев А. Ф., Виноградова Т. С., Ешметьева Е. Н., Мухамедзянова Л. В., Самоделкин Е. А., Кузнецов П. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 82–96.

Приведены результаты экспериментальных исследований в области биотехнологий, выполненных в научном нанотехнологическом центре ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», таких как создание функционально-градиентных бактерицидных, антикоррозионных и каталитически активных покрытий, систем защиты биологических объектов от негативного воздействия магнитного и электромагнитного излучений, высокоскоростная ударно-волновая обработка лекарственных препаратов и фитоматериалов, продуктов пищевого, кормового и медицинского назначений, лазерные технологии создания гибридных биомиметических композиций.

*Ключевые слова:* биотехнологии, функционально-градиентные бактерицидные, антикоррозионные и каталитически активные покрытия, ударно-волновая обработка, лекарственные препараты, фитоматериалы, гибридные биомиметические композиции.

УДК 666.3/.7:620.178.16

**Трибологические экспресс-исследования износостойкой керамики на основе  $Al_2O_3$  с волокнами SiC в паре трения со сталью.** Марков М. А., Снимщиков Д. В., Красиков А. В. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 97–103.

Проведены трибологические экспресс-исследования перспективной износостойкой алюмооксидной керамики, армированной волокнами SiC, в паре трения со стальным стержнем.

*Ключевые слова:* алюмооксидная керамика, волокна SiC, армирование, пара трения, трибологические экспресс-исследования.

УДК 678.067:620.174:620.193.21

**Влияние длительного климатического старения на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба.** Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Железина Г. Ф. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 104–114.

Исследовано влияние длительного (до 5 лет) старения в различных климатических зонах России на микроструктуру поверхности эпоксидных органопластиков и характер ее разрушения в условиях изгиба. Проведены анализ и систематизация полученных микроструктурных и фрактографических данных с учетом продолжительности воздействия климатических факторов, установлены основные типы разрушения поверхности органопластиков при старении и последующих испытаниях на статический изгиб. Показано, что наиболее значительные изменения макро- и микроструктуры поверхности исследованных материалов наблюдаются при воздействии атмосферных факторов в условиях теплого влажного климата Сочи (Государственный научно-испытательный полигон РАН).

*Ключевые слова:* органопластики, длительное климатическое старение, макро- и микроструктура, сканирующая электронная микроскопия, прочность при изгибе.

УДК 621.791.762.5

**Физико-математическая модель процесса стыковой контактной сварки оплавлением.** Ерофеев В. А., Пьянков И. Б. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 115–125.

Основным источником теплоты при стыковой сварке оплавлением являются взрыво-искровой процесс возникновения и выброса жидких перемычек, возникающий при постепенном сближении свариваемых деталей. Это явление математически не описано, что затрудняет компьютерный инженерный анализ технологии этого вида сварки. В работе предложено определить энергетические параметры этого источника теплоты на основе энергетического баланса условий оплавления при допущении, что температура капель, выбрасываемых из стыка, постоянна. Показано, что модель, основой которой являются уравнение теплопроводности и энергетические соотношения, описывающие взаимодействие стыка со сварочной машиной, воспроизводит процессы тепловыделения с учетом выброса части металла в виде брызг, а также влияние скорости оплавления на сварочный ток и напряжение на стыке при температуре капель 1700–1800°С.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка оплавлением, скорость оплавления, сварочный ток, тепловыделение в стыке, физико-математическая модель.

УДК 620.193.21

**Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор.** Луценко А. Н., Курс М. Г., Лаптев А. Б. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 126–137.

Для металлических конструкций, применяемых в изделиях авиационного назначения, наиболее агрессивными климатическими условиями являются одновременное воздействие повышенной температуры, влажности и хлоридов, что соответствует климатическим условиям от субтропического до экваториального поясов приморских районов. Данные, полученные по результатам длительной экспозиции в жестких климатических условиях, в том числе при натурно-ускоренных и циклических испытаниях, позволяют оценить уровень деградации свойств и обосновать ресурс работы материалов в изделии. Приведены результаты исследований коррозионного разрушения металлических материалов (алюминиевых, магниевых, титановых сплавов и сталей) без покрытий и с защитными покрытиями при испытаниях в условиях теплого влажного и влажного морского субтропического климата на приморских климатических станциях Геленджика и Батуми соответственно.

*Ключевые слова:* натурные климатические испытания, коррозия, алюминиевые сплавы, стали.

УДК 669–419:620.193

**Оценка коррозионной стойкости многослойных металлических материалов.** Лось И. С. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 138–144.

Объектом исследования является многослойный коррозионно-стойкий материал, полученный сваркой взрывом. Предмет исследований – процесс коррозионного разрушения в испытательной среде. Разработана оригинальная методика коррозионных испытаний многослойных материалов. Показано, что внутренний протектор замедляет образование и рост питтингов. Рассчитан показатель коррозионной стойкости многослойного материала. Установлено, что коррозионная стойкость многослойного материала в 2,2 раза выше, чем монометалла.

*Ключевые слова:* многослойный материал, питтинговая коррозия, сварка взрывом, коррозионные испытания, протектор.

УДК 621.039.534.25:539.375

**Расчетный анализ и оценка последствий падения контейнера с теплообменником на надреакторное перекрытие РУ БН-1200.** Виленский О. Ю., Лапшин Д. А., Малыгин М. Г. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 145–158.

Приведены основные результаты расчетного анализа и оценки последствий падения контейнера с теплообменником на платформу поворотного надреакторного перекрытия реактора БН-1200. Представлены результаты экспериментальных исследований деформирования стали Ст3 при статическом и динамическом нагружениях. По результатам исследований определены

параметры модели деформирования Johnson–Cook из библиотеки LS-DYNA, использованной для выполнения расчетного анализа. Приведены основные результаты расчета напряженно-деформированного состояния поворотного надреакторного перекрытия в упругопластической постановке, а также оценки его прочности и работоспособности.

*Ключевые слова:* реактор, поворотное надреакторное перекрытие, контейнер, упругопластическое деформирование, скорость деформации, модель деформирования, предельная деформация разрушения.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:539.376

**Влияние радиационного распухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 1. Пластичность и трещиностойкость.** Марголин Б. З., Сорокин А. А., Швецова В. А., Минкин А. И., Потапова В. А., Смирнов В. И. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 159–191.

Исследованы особенности разрушения облученных аустенитных сталей при статическом нагружении и влияние радиационного распухания на пластичность и трещиностойкость материала. Рассмотрено также влияние температуры испытаний и предварительного циклического деформирования.

*Ключевые слова:* облученные аустенитные стали, нейтронное облучение, радиационное распухание, пластичность, трещиностойкость, усталостные трещины

УДК 669.15–194.56:621.039.531:539.376

**Влияние радиационного распухания и особенностей деформирования на процессы разрушения облученных аустенитных сталей при статическом и циклическом нагружении. Часть 2. Скорость роста усталостных трещин.** Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Сорокин А. А., Швецова В. А., Потапова В. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 192–210.

Рассмотрены особенности разрушения облученных аустенитных сталей при циклическом нагружении и исследовано влияние радиационного распухания на скорость роста усталостных трещин.

*Ключевые слова:* облученные аустенитные стали, нейтронное облучение, радиационное распухание, скорость роста усталостной трещины.

УДК 669.15–194:621.039.531:539.422.22

**К вопросу о моделировании теплового старения посредством нейтронного облучения и отжига.** Марголин Б. З., Юрченко Е. В., Потапова В. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 3(87), с. 211–219.

Выполнена верификация нового метода прогнозирования длительного теплового охрупчивания стали, вызванного сегрегацией фосфора. Метод базируется на результатах испытаний на ударную вязкость или трещиностойкость образцов после их относительно краткосрочного нейтронного облучения и последующего отжига. Рассмотрены особенности хрупкого разрушения материала в различных состояниях. Представлены экспериментальные доказательства сильного ускорения диффузии фосфора под воздействием нейтронного облучения.

*Ключевые слова:* сталь, длительное тепловое старение, сегрегация фосфора, нейтронное облучение, хрупкое разрушение, метод прогнозирования.