

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
"ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ"**

**№ 1(53), 2008**

**СОДЕРЖАНИЕ**

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Ватутин К. А., Круглова А. А., Орлов В. В., Хлусова Е. И.* Исследование структуры и свойств низколегированной хладостойкой стали 10ГНБ, произведенной по различным технологическим схемам ..... 7
- Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Ватутин К. А., Голосиенко С. А., Круглова А. А., Хлусова Е. И.* Влияние термомеханической обработки на структуру и механические свойства судостроительной стали типа 09ХН2МДФ ..... 20
- Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И.* Влияние структуры, сформированной при закалке, на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска ..... 32
- Калинин Г. Ю., Ямпольский В. Д.* Влияние режимов горячей прокатки на структуру и упрочнение высокоазотистой коррозионно-стойкой маломагнитной стали 05Х19АГ10Н6МФБ ..... 45
- Чжао Фучэнь, Чжао Луюй.* Бейнитные стали с ультранизким содержанием углерода и перспективы их применения (обзор) ..... 52

**РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Светухин В. В., Козлов Д. В., Голованов В. Н.* Микроструктурные механизмы и модель радиационного охрупчивания стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после облучения в исследовательских реакторах ..... 62
- Светухин В. В., Сидоренко О. Г., Голованов В. Н., Суслов Д. Н.* Моделирование радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-440 ..... 69

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

- Алеутдинова М. И., Фадин В. В.* Морфологические изменения поверхностных слоев композитов с медной матрицей в условиях скользящего токосъема ..... 80
- Орданьян С. С., Пономаренко В. А., Синани А. Б., Смирнов К. А.* Особенности некоторых механических свойств композиций систем твердый сплав – высокотвердый наполнитель ..... 89
- Севостьянова И. Н., Молчунова Л. М., Гнусов С. Ф., Анисимов В. Ж., Кульков С. Н.* Влияние порообразующих добавок на морфологическое строение и свойства пористого материала  $Al_2TiO_5$  ..... 97
- Бойко В. Ф., Власова Н. М.* Оценка дисперсного магнийсодержащего минерального сырья по критерию измельчаемости ..... 104

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ  
И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ**

- Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Федорова В. А., Кохонов В. И., Козлов А. В., Евсеев М. В., Козманов Е. А.* Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали ..... 111
- Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Фоменко В. Н.* Прогнозирование статической трещиностойкости аустенитных материалов в условиях нейтронного облучения ..... 123
- Филатов В. М., Комаров А. В.* Кривые коррозионной усталости аустенитных коррозионно-стойких сталей ..... 139

**ИСПЫТАНИЯ, ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ**

- Козырев Ю. П., Седакова Е. Б.* Определение оптимальной частоты спектра сигналов акустической эмиссии для диагностики износа наполненного политетрафторэтилена ..... 156

**ФИЗИКА И МЕХАНИКА БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

<i>Лотков А. И., Гришков В. Н., Дударев Е. Ф., Гирсова Н. В., Табаченко А. Н.</i> Формирование ультрамелкозернистого состояния, мартенситные превращения и неупругие свойства никелида титана после «abc»-прессования.....	161
<i>Батурин А. А., Лотков А. И., Гришков В. Н.</i> Эволюция дефектов кристаллического строения в никелиде титана после интенсивной пластической деформации .....	166
<i>Лысак В. И., Кузьмин С. В., Рыбин В. В.</i> Критерии формирования сверхвысоких пластических деформаций в условиях косоугольного соударения металлических тел при сварке взрывом.....	172
<i>Абакумов А. И., Большаков А. П., Гушанов А. Р., Карпенко И. И., Сеницын В. В.</i> Расчетно-экспериментальное исследование деформирования энергетических материалов в условиях низкоскоростного нагружения в опытах с составными стержнями Гопкинсона.....	184
<i>Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Панин А. В.</i> Полевая теория дефектной подсистемы в шейке деформируемого твердого тела .....	197

## **ХРОНИКА**

Памяти главного редактора журнала «МиТОМ» профессора Б. А. Прусакова .....	213
<b>Рефераты публикуемых статей</b> .....	215
<b>Перечень статей, опубликованных в журнале «Вопросы материаловедения» в 2007 г.</b> .....	231
<b>Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Рекомендации</b> .....	234

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 669.14.018.41:621.789

**Исследование структуры и свойств низколегированной хладостойкой стали 10ГНБ, произведенной по различным технологическим схемам.** Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Ватулин К. А., Круглова А. А., Орлов В. В., Хлусова Е. И. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 7–20.

Исследованы механические свойства и структура листового проката из стали типа 10ГНБ после закалки и отпуска и термомеханической обработки по двум технологическим схемам. Высокий уровень прочности и хладостойкости стали, подвергнутой термомеханической обработке, определяется формированием в стали дисперсной ферритно-бейнитной структуры с субзернами с высокой плотностью дислокаций. Показано, что в структуре стали, подвергнутой закалке и высокому отпуску, а также закалке с прокатного нагрева и последующему отпуску, плотность дислокаций в  $\alpha$ -фазе ниже, чем в структуре стали, подвергнутой двухстадийной термомеханической обработке.

*Ключевые слова:* сталь низколегированная хладостойкая, листовый прокат, термомеханическая обработка, прочность, хладостойкость.

УДК 669.14.018.293:621.789

**Влияние термомеханической обработки на структуру и механические свойства судостроительной стали типа 09ХН2МДФ.** Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Ватулин К. А., Голосиенко С. А., Круглова А. А., Хлусова Е. И. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 20–32.

Исследованы механические свойства листового проката толщиной до 30 мм из низкоуглеродистой низколегированной стали, подвергнутой термомеханической обработке по различным режимам в лабораторных и промышленных условиях. Методами металлографии и электронной микроскопии исследована структура стали после термомеханической обработки, а также после дополнительного высокого отпуска. Выявлены структурные факторы, влияющие на повышение механических свойств. Установлено, что термомеханическая обработка способствует торможению разупрочнения при отпуске. Показана перспективность использования такого проката при изготовлении крупногабаритных сварных конструкций, применяемых в судостроении.

*Ключевые слова:* сталь низкоуглеродистая низколегированная, термомеханическая обработка.

УДК 669.14.018.41:621.785.6

**Влияние структуры, сформированной при закалке, на свойства высокопрочной хладостойкой стали после отпуска.** Голосиенко С. А., Мотовилина Г. Д., Хлусова Е. И. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 32–44.

Исследовано влияние структуры, сформированной при охлаждении с различными скоростями от температур аустенитизации, на механические свойства высокопрочной хладостойкой стали после последующего отпуска.

*Ключевые слова:* сталь высокопрочная хладостойкая, листовый прокат, аустенитизация, скорость охлаждения, структура, прочность, хладостойкость.

УДК 669.14.018.8:621.771

**Влияние режимов горячей прокатки на структуру и упрочнение высокоазотистой коррозионно-стойкой маломагнитной стали 05Х19АГ10Н6МФБ.** Калинин Г. Ю., Ямпольский В. Д. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 45–52.

Исследовано влияние образующихся в процессе пластической деформации прокаткой в температурном интервале 1200–900°C мелкодисперсных выделений на предел текучести высокопрочной коррозионно-стойкой стали, легированной азотом. Установлено, что с понижением температуры деформации происходит линейное возрастание предела текучести в связи с увеличением количества выделений и дефектности аустенита. Возрастание предела текучести

при увеличении концентрации ванадия от 0,18 до 0,32% и ниобия от 0,09 до 0,18% обусловлено образованием большего количества этих нитридов.

*Ключевые слова:* сталь высокопрочная хладостойкая, листовой прокат, аустенитизация, скорость охлаждения, структура, прочность, хладостойкость.

УДК 669.15–194.591

**Бейнитные стали с ультранизким содержанием углерода и перспективы их применения (обзор).** Чжао Фучэнь, Чжао Луюй. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 52–61.

Обзор посвящен сталям с ультранизким содержанием углерода, обладающим высокой прочностью, повышенной ударной вязкостью и хорошей свариваемостью, благодаря чему обеспечиваются высокие служебные характеристики и сравнительно малая себестоимость производства конструкций. Они имеют большой потенциал и широкие перспективы использования.

*Ключевые слова:* сталь высокопрочная с ультранизким содержанием углерода, прочность, свариваемость, перспективы применения.

УДК 621.039.531

**Микроструктурные механизмы и модель радиационного охрупчивания стали 15X2НМФАА и ее сварных соединений после облучения в исследовательских реакторах.** Светухин В. В., Козлов Д. В., Голованов В. Н. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 62–69.

Рассматриваются вопросы, связанные с радиационным охрупчиванием стали 15X2НМФАА, применяемой для изготовления корпусов ВВЭР-1000. Исследуется роль примесных и легирующих элементов. Предпринята попытка построения модели радиационного охрупчивания в зависимости от температуры облучения и концентрации никеля.

*Ключевые слова:* реактор ВВЭР-1000, сталь 15X2НМФАА, сварные соединения, облучение, примесные и легирующие элементы, модель радиационного охрупчивания.

УДК 621.039.531

**Моделирование радиационного охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-440.** Светухин В. В., Сидоренко О. Г., Голованов В. Н., Суслов Д. Н. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 69–79.

Предложена кинетическая модель радиационно-ускоренной кластеризации и преципитации примесей в металлах и сплавах. Предложенная модель использована для расчета сдвига температуры хрупко-вязкого перехода стали корпусов реакторов ВВЭР-440. Получены математические выражения, описывающие влияние плотности потока нейтронов на радиационное охрупчивание.

*Ключевые слова:* твердое тело, преципитация и кластеризация примесей, кинетическая модель, сталь, реактор ВВЭР-440, радиационное охрупчивание.

УДК 621.763:621.891

**Морфологические изменения поверхностных слоев композитов с медной матрицей в условиях скользящего токосъема.** Алеутдинова М. И., Фадин В. В. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 80–88.

Определены вольт-амперные характеристики и интенсивность изнашивания модельных матрично-наполненных композитов на основе стали Г13 и стали ШХ15 при скольжении с плотностью тока выше 100 А/см<sup>2</sup> по контртелу из стали 45 (50 HRC). Показано, что композит на основе стали Г13 имеет низкую износостойкость при плотности тока выше 80 А/см<sup>2</sup>. Материал на основе стали ШХ15 формирует высокопластичные вторичные структуры и интенсивность изнашивания его менее 30 мкм/км при плотности тока до 220 А/см<sup>2</sup>. Отмечено, что поверхность трения стали 45 окисляется при трении в условиях скользящего токосъема.

*Ключевые слова:* скользящий электроконтакт, спеченный композит, интенсивность изнашивания, трение, микроструктура, вторичные структуры.

УДК 621.763:621.891

**Особенности некоторых механических свойств композиций систем твердый сплав – высокотвердый наполнитель.** Орданьян С. С., Пономаренко В. А., Синани А. Б., Смирнов К. А. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 89–97.

Подтверждена принципиальная возможность создания композиционных материалов с регулируемой твердостью и износостойкостью систем матрица ВК-8 – наполнитель ( $\beta$ -BN, SiC, алмаз,  $Al_2O_3$ ), в которых негативные эффекты изменения фазового состояния компонентов минимизируются за счет применения «импульсных» технологий. Показано, что при соответствующем подборе параметров  $P$ ,  $T$ ,  $\tau$  возможно получение группы композиционных керамических материалов для экстремальных условий эксплуатации.

*Ключевые слова:* композиционные керамические материалы, регулируемые твердость и износостойкость, «импульсные» технологии, твердый сплав – высокотвердый наполнитель.

УДК 621.762.5

**Влияние порообразующих добавок на морфологическое строение и свойства пористого материала  $Al_2TiO_5$ .** Севостьянова И. Н., Молчунова Л. М., Гнусов С. Ф., Анисимов В. Ж., Кульков С. Н. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 97–103.

Изучено влияние порообразующих добавок на формирование поровой структуры, фазового состава и предела прочности при изгибе высокопористого материала в процессе его реакционного спекания. Показано, что введение порообразователя в исходную смесь порошков приводит к формированию бимодальной поровой структуры, а прочность при изгибе изменяется по экспоненциальному закону.

*Ключевые слова:* поровая структура, порообразующая добавка, реакционное спекание.

УДК 549.522.1:621.762.222

**Оценка дисперсного магнийсодержащего минерального сырья по критерию измельчаемости.** Бойко В. Ф., Власова Н. М. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 104–110.

С использованием средств математической статистики и положений коллоидной химии исследована кинетика измельчения до состояния порошков минерального сырья – брусита до и после термической обработки.

*Ключевые слова:* магнийсодержащее минеральное сырье, брусит, термическая обработка, гранулометрические характеристики, измельчение гранул.

УДК 669.15`26`24–194.56:621.039.531:539.219.2

**Исследование влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали.** Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Федорова В. А., Кохонов В. И., Козлов А. В., Евсеев М. В., Козманов Е. А. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 111–122.

Проведены исследования в диапазоне температур 20–400°C влияния нейтронного облучения на статическую и циклическую трещиностойкость хромоникелевой аустенитной стали 10X18H9, облученной в течение более чем 5,5 тыс. эфф. сут в реакторе БН-600. Определены характеристики статической трещиностойкости этой стали при изменении повреждающей дозы и температуры испытаний. Показано, что нейтронное облучение дозой до 20 сна не приводит к снижению ее циклической трещиностойкости.

*Ключевые слова:* хромоникелевая аустенитная сталь, облучение, трещиностойкость.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:539.219.2

**Прогнозирование статической трещиностойкости аустенитных материалов в условиях нейтронного облучения.** Марголин Б. З., Минкин А. И., Смирнов В. И., Фоменко В. Н. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 123–138.

Выполнен анализ литературных и оригинальных данных по влиянию на статическую трещиностойкость аустенитных материалов нейтронного облучения и температуры испытаний. Предложена зависимость для прогнозирования зависимости статической трещиностойкости

аустенитных материалов от флюенса нейтронов, температуры облучения и температуры испытаний.

*Ключевые слова:* аустенитные материалы, облучение, прогноз, трещиностойкость.

УДК 669.15–194.56:621.039.531:620.194.23

**Кривые коррозионной усталости аустенитных коррозионно-стойких сталей.** Филатов В. М., Комаров А. В. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 139–155.

Сопротивление усталостному разрушению аустенитных коррозионно-стойких сталей снижается в контакте с водным теплоносителем ядерных реакторов. Степень снижения числа циклов, определяемая экспериментально, зависит от температуры, скорости деформаций в полцикле растяжения. Нейтронное облучение повышает предел текучести и прочности, но снижает пластичность сталей, что при циклическом нагружении уменьшает долговечность в области малоциклового усталости.

По эмпирическим уравнениям кривых усталости, включающим механические характеристики сталей с учетом влияния облучения (для облученных сталей) и коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности, рассчитаны кривые усталости, согласующиеся с результатами испытаний на усталость на воздухе и в реакторной воде. При использовании гарантированных (спецификационных) механических характеристик в уравнениях кривых усталости необходимо корректировать коэффициенты приведения условий лабораторных испытаний образцов на усталость к условиям нагружения натуральных элементов. Расчетные кривые усталости, определенные по эмпирическим уравнениям, согласуются с новыми предлагаемыми в код ASME расчетными кривыми усталости.

*Ключевые слова:* аустенитные стали, уравнение кривой усталости, реакторная вода, нейтронное облучение.

УДК 621.891:620.179.17

**Определение оптимальной частоты спектра сигналов акустической эмиссии для диагностики износа наполненного политетрафторэтилена.** Козырев Ю. П., Седакова Е. Б. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 156–160.

Проведены триботехнические испытания наполненного политетрафторэтилена при изменении скорости скольжения в широком диапазоне с регистрацией сигналов акустической эмиссии. Для диагностики износа материала используется спектральный анализ последовательности среднеквадратичных отклонений сигналов акустической эмиссии с применением дискретного преобразования Фурье, а величина износа определяется по амплитуде высокочастотной составляющей энергетического спектра. Приведено сравнение расчетных величин массового износа наполненного политетрафторэтилена с экспериментальными данными, показывающее, что предложенный метод диагностики износа обеспечивает достаточную точность.

*Ключевые слова:* износ, триботехнические испытания, акустическая эмиссия, спектральный анализ, политетрафторэтилен.

УДК 669.295`245:539.2:539.374

**Формирование ультрамелкозернистого состояния, мартенситные превращения и неупругие свойства никелида титана после «abc»-прессования.** Лотков А. И., Гришков В. Н., Дударев Е. Ф., Гирсова Н. В., Табаченко А. Н. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 161–165.

Исследовано влияние больших пластических деформаций при «abc»-прессовании в интервале температур 873–573 К на микроструктуру и мартенситные превращения в никелиде титана. Показано, что при пониженных температурах деформирования формируется смешанное ультрамелкозернистое состояние сплава на основе субмикроструктурной и наноструктурной фракций. Построена диаграмма мартенситных превращений при охлаждении и нагреве деформированных образцов. Изучено влияние температуры «abc»-прессования на эффект памяти формы в никелиде титана.

*Ключевые слова:* никелид титана, «abc»-прессование, ультрамелкозернистая структура, мартенситные превращения, эффект памяти формы.

УДК 669.295“245:548.4:539.374

**Эволюция дефектов кристаллического строения в никелиде титана после интенсивной пластической деформации.** Батулин А. А., Лотков А. И., Гришков В. Н. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 166–171.

Исследованы закономерности влияния интенсивной пластической деформации (ИПД) при ультразвуковой обработке на эволюцию дефектов кристаллического строения в поверхностных слоях никелида титана со структурой моноклинного мартенсита В19'. Установлено, что при возрастании степени ИПД резко увеличиваются как концентрация вакансионных, так и плотность дислокационных дефектов и одновременно происходит сильная фрагментация зеренно-субзеренной структуры. В наноструктурном состоянии преимущественно наблюдаются дефекты вакансионного типа на границах зерен, средний объем которых меньше объема равновесных вакансий в TiNi и сравним с величиной свободных объемов в аморфизированных сплавах на основе никелида титана. Обсуждается роль дефектов кристаллического строения в механизмах формирования наноструктурного состояния при ИПД.

*Ключевые слова:* никелид титана, пластическая деформация, дислокации, вакансии, фрагментация, позитронная аннигиляционная спектроскопия.

УДК 621.791.13:539.374

**Критерии формирования сверхвысоких пластических деформаций в условиях косоугольного соударения металлических тел при сварке взрывом.** Лысак В. И., Кузьмин С. В., Рыбин В. В. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 172–183.

Исследованы степень и принципиальный характер распределения пластических деформаций в сварных соединениях в условиях косоугольного соударения металлических тел при сварке взрывом, а также взаимосвязь их с параметрами сварки и прочностными свойствами биметаллических образцов.

*Ключевые слова:* металлические композиционные материалы, сварка взрывом, пластическая деформация.

УДК 539.411:620.173

**Расчетно-экспериментальное исследование деформирования энергетических материалов в условиях низкоскоростного нагружения в опытах с составными стержнями Гопкинсона.** Абакумов А. И., Большаков А. П., Гушанов А. Р., Карпенко И. И., Сеницын В. В. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 184–196.

При использовании статических и динамических экспериментов на сжатие образцов из энергетических материалов делается попытка построения численной модели их деформирования в условиях статического и низкоскоростного нагружения. Динамические эксперименты проводились на установке, в основу конструкции которой положена методика составного стержня Гопкинсона.

*Ключевые слова:* энергетические материалы, статическое низкоскоростное нагружение, деформирование, численная модель.

УДК 539.374:548.4

**Полевая теория дефектной подсистемы в шейке деформируемого твердого тела.** Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Панин А. В. – Вопросы материаловедения, 2008, № 1(53), с. 197–212.

Предложено описание многоуровневой дефектной подсистемы в шейке деформируемого твердого тела на основе полевой теории дефектов. Ведущий механизм пластической деформации в шейке связан с самоорганизацией двух макрополос локализованных сдвигов, ориентированных по сопряженным направлениям максимальных касательных напряжений. Их материальные повороты компенсируются на мезомасштабном уровне фрагментацией материала в шейке как аккомодационный механизм кристаллографических поворотов. Дислокационная деформация на микромасштабном уровне описывается калибровочной теорией дефектов. Полевая теория дефектов позволяет описать известные механизмы пластической деформации в шейке на различных масштабных уровнях.

*Ключевые слова:* полевая теория дефектов, пластическая деформация, твердое тело.