

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
"ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ"

№ 4(68), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Владимиров Н. Ф., Ильин А. В., Ларионов А. В., Леонов В. П., Мирошников Б. Л. Изменение механических свойств и хладостойкости металла штрипса и труб из стали категории прочности К60 на различных этапах изготовления. 5

Нестерова Е. В., Золоторевский Н. Ю., Титовец Ю. Ф., Хлусова Е. И. Наследование разориентаций и модель формирования структуры бейнита в низкоуглеродистых сталях под влиянием деформации аустенита. 17

Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Круглова А. А., Хлусова Е. И., Орлов В. В. Влияние размера аустенитного зерна и степени деформации на формирование структуры стали класса прочности К60. 27

Голосиенко С. А., Нестерова Е. В., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Яшина Е. А. Структура и свойства стали класса прочности К70 после закалки с прокатного нагрева. 36

Невский С. А., Иванов Ю. Ф., Коновалов С. В., Громов В. Е. Эволюция дислокационной субструктуры алюминия при релаксации напряжений в условиях слабых электрических воздействий. 45

Ри Хосен, Ри Э. Х., Химухин С. Н., Теслина М. А., Астапов И. А., Гостищев В. В. Влияние внешней обработки расплава АЛ9 при кристаллизации на его структуру и свойства. 52

Лиханский В. В., Алиев Т. Н., Колесник М. Ю., Евдокимов И. А., Зборовский В. Г. Моделирование критериальных условий перелома в кинетике окисления циркониевых сплавов. 57

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Кузнецов П. А., Маннинен С. А., Васильева О. В. Влияние упругих изгибных деформаций на магнитные и экранирующие свойства рулонного магнитного экрана. 67

Перевислов С. Н. Измельчение порошков карбида кремния в планетарной мельнице. 73

Дворник М. И., Зайцев А. В., Ершова Т. Б. Повышение прочности и твердости субмикронного твердого сплава WC-8%Co-1%Cr₃C₂ за счет «докарбидизации» в процессе спекания. 81

Николенко С. В., Гостищев В. В., Лебухова Н. В. Синтез материалов на основе боридов вольфрама и циркония в режиме горения. 89

Гостищев В. В., Комков В. Г. Металлотермический синтез силицидов хрома. 95

Ван Цин Шен, Кольцова Т. С., Васильева Е. С., Попович А. А. Получение наноразмерного порошка γ -Al₂O₃ методом микроволнового синтеза. 100

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Мощенко М. Г., Рубцов В. С., Кораблева С. А. Термомеханический анализ процесса многопроходной сварки соединения Ду300 реактора РБМК методом конечных элементов. 105

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Мальшев В. Н. Особенности наводороживания поверхностных слоев металла при коррозии стали X18H10T в растворе соляной кислоты при комнатной температуре. 116

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Марголин Б. З., Мурашова А. И., Неустроев В. С. Влияние напряжений на радиационное набухание аустенитных сталей. 124

Тихончев М. Ю., Светухин В. В. Расчетное определение пороговых энергий смещения и исследование особенностей развития каскадов атомных смещений вблизи протяженной границы раздела фаз циркония и ниобия: молекулярно-динамическое моделирование. 140

ХРОНИКА

80 лет академику Российской академии наук Олегу Александровичу Банных. 153

Международная научно-техническая конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС»	154
Конференции 2012 года	155
Рефераты публикуемых статей	157
Авторский указатель	167
Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2011 году	168
Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». Оформление статей. Правила для авторов	172

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 669.14.018.295:539.422.22:621.774–418.1

Изменение механических свойств и хладостойкости металла штрипса и труб из стали категории прочности К60 на различных этапах изготовления. Владимиров Н. Ф., Ильин А. В., Ларионов А. В., Леонов В. П., Мирошников Б. Л. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 5–16.

Исследованы неоднородность механических свойств по толщине штрипса и труб большого диаметра и изменение прочностных свойств и хладостойкости стали при изготовлении труб из штрипса. При исследовании штрипса и труб из стали категории прочности К60 толщиной 24, 31 и 40 мм было установлено, что предел текучести и предел прочности металла наружной поверхности несколько повышались, а внутренней – снижались. Снижение уровня свойств связано с наклепом этих слоев при формовке. Оценка хладостойкости по ударной вязкости (KCV , KCT) и по критическим температурам $T_{DWTТ}$ и $T_{КБ}$ показала, что пластическая деформация при формовке и экспандировании трубы приводит к снижению хладостойкости металла, и что металл с ферритно-перлитной структурой по критерию ударной вязкости более склонен к хрупкости, чем металл с ферритно-бейнитной структурой, тогда как по $T_{КБ}$ он имел повышенную хладостойкость.

Ключевые слова: сталь категории прочности К60, штрипс, труба большого диаметра, прочностные свойства, хладостойкость.

УДК 669.15–194.2:669.017.3

Наследование разориентаций и модель формирования структуры бейнита в низкоуглеродистых сталях под влиянием деформации аустенита. [Нестерова Е. В.], Золоторевский Н. Ю., Титовец Ю. Ф., Хлусова Е. И. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 17–26.

Исследованы структура и спектры разориентировок в бескарбидном бейните малоуглеродистой малолегированной трубной стали и показано, что повышение доли малоугловых разориентировок в деформированной стали обусловлено наследованием бейнитом деформационной структуры аустенита. Предложена модель расчета кинетики бейнитного превращения деформированного аустенита, которая позволяет прогнозировать средний размер структурного элемента с заданной разориентацией в зависимости от режима термомеханической обработки.

Ключевые слова: сталь малоуглеродистая малолегированная трубная, деформация аустенита, структура, спектры разориентировок, модель формирования структуры.

УДК 669.14.018.295: 621.789

Влияние размера аустенитного зерна и степени деформации на формирование структуры стали класса прочности К60. Счастливец В. М., Табатчикова Т. И., Яковлева И. Л., Егорова Л. Ю., Круглова А. А., Хлусова Е. И., Орлов В. В. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 27–35.

Изучено влияние горячей деформации и размера аустенитного зерна на формирование структуры стали класса прочности К60 после термической и термомеханической обработки в лабораторных условиях. Структура исследована методами металлографии и просвечивающей электронной микроскопии. Проведен количественный анализ структурных составляющих, определена морфология бейнита. Установлено, что количество бейнита в структуре стали после термомеханической обработки возрастает с увеличением размера аустенитного зерна. Подтверждено стимулирующее влияние деформации аустенита на развитие аустенитно-ферритного превращения. Показано, что бейнит нереечного субзеренного строения образуется преимущественно из крупнозернистого деформированного аустенита в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, протекающего при охлаждении.

Ключевые слова: аустенитная сталь класса прочности К60, горячая деформация, размер зерна, формирование структуры, бейнит, $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение.

УДК 669.14.018.295: 621.771:621.785.6

Структура и свойства стали класса прочности К70 после закалки с прокатного нагрева. Голосиенко С. А., Нестерова Е. В., Хлусова Е. И., Мотовилина Г. Д., Яшина Е. А. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 36–44.

Методами оптической металлографии, ПЭМ и РЭМ с применением анализа дифракционных картин обратного рассеяния электронов (EBSD) проведено исследование структуры листового проката стали для труб магистральных трубопроводов класса прочности К70, полученной с использованием технологии прокатки с закалкой с прокатного нагрева и последующим отпуском.

Показано, что уровень прочности стали при применении данной технологии производства обеспечивается за счет формирования при закалке с прокатного нагрева гранулярного и реечного бейнита. Повышению предела текучести способствует увеличение доли реечного бейнита за счет вклада в упрочнение большеугловых границ раздела, увеличение доли малоугловых границ и повышение плотности равномерно распределенных дислокаций.

Ключевые слова: сталь класса прочности К70, листовая прокат, структура и свойства.

УДК 669.71:537.315

Эволюция дислокационной субструктуры алюминия при релаксации напряжений в условиях слабых электрических воздействий. Невский С. А., Иванов Ю. Ф., Коновалов С. В., Громов В. Е. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 45–51.

Исследовано влияние слабого электрического потенциала на эволюцию дислокационной субструктуры алюминия при релаксации напряжений. Установлено, что при увеличении электрического потенциала объемные доли хаотической и полосовой субструктуры увеличиваются, но снижается линейная плотность изгибных экстинкционных контуров. Последнее свидетельствует о том, что подведение электрического потенциала способствует стимулированию процесса релаксации напряжений.

Ключевые слова: алюминий, релаксация напряжений, электрический потенциал, дислокационная субструктура.

УДК 669.71:621.745.5

Влияние внешней обработки расплава АЛ9 при кристаллизации на его структуру и свойства. Ри Хосен, Ри Э. Х., Химухин С. Н., Теслина М. А., Астапов И. А., Гостищев В. В. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 52–56.

Исследовали влияние обработки расплава АЛ9 вибрацией при различных температурах на размер зерен, длину осей первого порядка дендритов и распределение твердости по поперечному сечению отливок. Наибольшее измельчение зерен и дендритов достигается при температуре 660°C. Вибрационная обработка приводит к более равномерному распределению структурных составляющих и твердости по сечению отливки. Изучено влияние температуры нагрева металла, подвергающегося вибрационной обработке, на доминирующее формирование дефекта определенного типа на поверхности отливки.

Ключевые слова: вибрационная обработка расплава, размер зерен, длина осей дендритов, распределение твердости.

УДК 669.296: 620.193.2

Моделирование критериальных условий перелома в кинетике окисления циркониевых сплавов. Лиханский В. В., Алиев Т. Н., Колесник М. Ю., Евдокимов И. А., Зборовский В. Г. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 57–66.

С помощью энергетического подхода определены условия перелома в кинетике роста оксидной пленки на поверхности сплавов из циркония. Проведенный на основе энергетического подхода теоретический анализ по установлению параметрических условий перелома в кинетике роста оксидной пленки показал качественное соответствие с экспериментальными данными. Выполненный анализ свидетельствует также о том, что явление перелома обусловлено эволюцией механических напряжений в оксидном слое при коррозии и прилегающем слое металла и связано с формированием волнообразной структуры на границе раздела оксид/металл.

Ключевые слова: циркониевые сплавы, кинетика окисления, моделирование критериальных условий.

УДК 537.621:539.371

Влияние упругих изгибных деформаций на магнитные и экранирующие свойства рулонного магнитного экрана. Кузнецов П. А., Маннинен С. А., Васильева О. В. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 67–72.

Представлены результаты исследований влияния упругих деформаций на магнитные и экранирующие свойства магнитных экранов, изготовленных из лент аморфного сплава АМАГ-172. Показано, что кривые намагничивания ленточных тороидов существенно видоизменяются при изгибных деформациях образцов. Проведенные измерения и расчеты методом конечных элементов эффективности экранирования постоянного магнитного поля однослойными экранами с разной величиной упругих деформаций показали удовлетворительное их совпадение.

Ключевые слова: аморфный сплав АМАГ-172, магнитные экраны, эффективность экранирования, упругая деформация.

УДК 666.792.32:621.762

Измельчение порошков карбида кремния в планетарной мельнице. Перевислов С.Н. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 73–80.

Исследованы особенности получения высокодисперсного порошка карбида кремния ($d_{0,5} \leq 0,5$ мкм) методом планетарного измельчения. Определены оптимальные условия помола: 30 об. % мелющих тел при диаметре их $d = 10–11$ мм; 10 об. % порошка, 20 об. % воды. Благодаря высокой дисперсности планетарно измельченного SiC-порошка удается добиться получения значительного уровня механических свойств жидкофазно спеченной SiC-керамики.

Ключевые слова: карбид кремния, планетарное измельчение, жидкофазное спекание

УДК 669.018.25:621.762.5

Повышение прочности и твердости субмикронного твердого сплава WC–8%Co–1%Cr₃C₂ за счет «докарбидизации» в процессе спекания. Дворник М. И., Зайцев А. В., Ершова Т. Б. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 81–88.

При традиционном спекании нанодисперсного порошка WC–8%Co–1%Cr₃C₂ формируется субмикронный твердый сплав, в котором из-за потери углерода присутствует η-фаза (6,5 об. %), снижающая прочность до 850 МПа. Предложена методика управляемого науглероживания сплава в атмосфере СО в процессе нагрева при спекании. Установлено, что при проведении «докарбидизации» СО разлагается неравномерно, что приводит к формированию включений свободного углерода в верхних слоях спеченных образцов. Дополнительный процесс гомогенизации в газовой атмосфере позволил добиться равномерного распределения углерода и уменьшить содержание η-фазы и свободного углерода. Прочность и твердость данных образцов составила 1640 МПа и 90,5 HRA соответственно.

Ключевые слова: субмикронный твердый сплав, карбидизация, спекание, дефект, прочность

УДК 621.762:621.763:536.46

Синтез материалов на основе боридов вольфрама и циркония в режиме горения. Николенко С. В., Гостищев В. В., Лебухова Н. В. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 89–94.

Показана возможность получения порошковых композитов на основе W₂B₅ и ZrB₂ в процессе горения, развивающемся при алюмотермическом восстановлении реакционных смесей. Рассчитаны адиабатические температуры, обеспечивающие распространение волны горения в смесях, включающих различные исходные реагенты и при изменении их соотношения. Оптимизированы режимы электроискровой наплавки на сталь 45 синтезированных порошков на основе боридов вольфрама (W₂B₅ от 42 до 55 мас. %, остальное – Al₂O₃) и боридов циркония (ZrB₂ от 62 до 66 мас. %, остальное – Al₂O₃ и SiO₂). Показано, что электроискровая наплавка из композита на основе W₂B₅ до 18 раз повышает износостойкость стальной поверхности в условиях трения без смазки.

Ключевые слова: алюмотермический синтез, борид вольфрама, борид циркония.

УДК 661.685:621.762

Металлотермический синтез силицидов хрома. Гостищев В. В., Комков В. Г. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 95–99.

Рассмотрены условия алюминотермического синтеза литого силицида хрома, содержащего фазы Cr_3Si и CrSi_2 . Микротвердость силицидного сплава составляет 7450 МПа. Показано, что переход к магниотермическому синтезу в среде расплава Na_2CO_3 приводит к получению силицида хрома CrSi_2 в виде порошка, удельная поверхность которого составляет $7,28 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$. Химическое диспергирование порошка повышает удельную поверхность до $24,8 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$.

Ключевые слова: металлотермия, силициды хрома, удельная поверхность, микротвердость.

УДК 661.862'002:621.762.2

Получение наноразмерного порошка $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ методом микроволнового синтеза. Ван Цин Шен, Кольцова Т. С., Васильева Е. С., Попович А. А. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 100–104.

Исследована возможность получения нанопорошков гамма-алюминия методом микроволнового синтеза в растворе соли нитратогидрата алюминия в полиэтиленгликоле под действием микроволнового излучения. В результате была получена аморфная нанодисперсная фаза, которая отжигалась в интервале температур от 850 до 1000°C. Установлены зависимости гранулометрического и фазового состава порошка от температуры отжига и концентрации исходных реагентов.

Ключевые слова: микроволновый синтез, нанопорошки, гамма-оксид алюминия.

УДК 621.791.754'293:621.039.536.4

Термомеханический анализ процесса многопроходной сварки соединения Ду300 реактора РБМК методом конечных элементов Мощенко М. Г., Рубцов В. С., Кораблева С. А. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 105–115.

Моделируется процесс автоматической аргонодуговой многопроходной сварки – одного из основных видов сварки аустенитных трубопроводов Ду300 реакторов РБМК. Расчет температурных полей и остаточных напряжений, возникающих при многопроходной автоматической сварке был выполнен методом конечных элементов с помощью программного комплекса Ansys 11.0. В результате решения термической и механических задач было получено удовлетворительное совпадение с экспериментом, которое указывает на применимость предложенной методики. Результаты расчета могут быть использованы в качестве начальных условий для оценки мероприятий по уменьшению или инвертированию растягивающих напряжений, а также оптимизации технологии сварки.

Ключевые слова: трубопровод реактора РБМК, автоматическая аргонодуговая многопроходная сварка, температурные поля, остаточные напряжения, моделирование методом конечных элементов.

УДК 669.14.018.8:620.193.4

Особенности наводороживания поверхностных слоев металла при коррозии стали X18H10T в растворе соляной кислоты при комнатной температуре. Малышев В. Н. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 116–123.

С использованием образцов малых толщин (0,025–0,185 мм) определяли количество водорода, поглощаемого металлом в расчете на 1 см^2 поверхности при общей коррозии стали X18H10T в 1 N растворе HCl.

Показано, что насыщение водородом поверхностных слоев в несколько сотых миллиметра происходит в начальный период коррозии (до ~50 ч), а затем содержание его в стали практически не изменяется на протяжении более 1000 ч коррозионного воздействия. Оценка кинетики наводороживания может быть сделана по предлагаемому в статье уравнению.

Ключевые слова: сталь X18H10T, коррозионное воздействие, кинетика насыщения водородом.

УДК 669.15–194.56:621.039.548.34

Влияние напряжений на радиационное распухание аустенитных сталей. Марголин Б. З., Мурашова А. И., Неустроев В. С. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 124–139.

Представлены результаты анализа экспериментальных данных по влиянию вида напряженного состояния на радиационное распухание аустенитных сталей. Сформулировано определяющее уравнение, позволяющее описывать влияние объемного напряженного состояния на распухание аустенитных сталей с учетом различных вкладов шаровой и девиаторной компонент напряжений. Предложена физическая интерпретация полученной зависимости радиационного распухания от напряженного состояния. Для расчета напряженно-деформированного состояния элементов внутрикорпусного устройства реакторов предложено использовать уравнение радиационной ползучести, включающее распухание с учетом напряжений. Определены значения коэффициентов, входящих в сформулированное определяющее уравнение распухания и в уравнение радиационной ползучести.

Ключевые слова: элементы внутрикорпусного устройства ядерных реакторов, аустенитная сталь, радиационное распухание, радиационная ползучесть, определяющее уравнение, напряжения, напряженное состояние, шаровая и девиаторная компоненты напряжений, гидростатическое напряжение, интенсивность напряжений, эффективное напряжение.

УДК 669.296'293:621.039.531

Расчетное определение пороговых энергий смещения и исследование особенностей развития каскадов атомных смещений вблизи протяженной границы раздела фаз циркония и ниобия: молекулярно-динамическое моделирование. Тихончев М. Ю., Светухин В. В. – Вопросы материаловедения, 2011, № 4(68), с. 140–152.

Подготовлены многотельные потенциалы для системы Zr–Nb, при этом потенциалы для чистых Zr и Nb взяты из литературы. Рассчитаны пороговые энергии атомных смещений для однокомпонентных кристаллов ГПУ-Zr и ОЦК-Nb, а также для атомов Zr и Nb как атомов замещения в матрицах Nb и Zr соответственно. Предложена модель протяженной границы раздела фаз ГПУ-Zr и ОЦК-Nb. Межфазная область рассматриваемой границы охватывает 6 атомных слоев Zr и 2 атомных слоя Nb. При этом часть кристаллита Nb, попадающая в межфазную область, сохраняет структуру, близкую к ОЦК, в то время как структура циркониевой части в межфазной области заметно искажается. Получены количественные оценки величины средней пороговой энергии смещения в области фазового раздела. Проведено моделирование прохождения каскада смещений через границу фазового раздела. Согласно полученным результатам, при развитии таких каскадов значительная часть произведенных точечных дефектов хорошо захватывается межфазной областью.

Ключевые слова: цирконийниобиевые сплавы, метод молекулярной динамики, пороговая энергия смещения, каскад атомных смещений.