

Научно-технический журнал  
"Вопросы материаловедения"

№ 3(47), 2006

СОДЕРЖАНИЕ

**МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ**

<i>Титовец Ю. Ф., Золоторевский Н. Ю., Самойлов А. Н., Hribernig G., Pichler A.</i> Исследование влияния хрома на микроструктуру и кинетику бейнитного превращения в низколегированных сталях .....	5
<i>Титовец Ю. Ф., Золоторевский Н. Ю., Самойлов А. Н., Hribernig G., Pichler A.</i> Моделирование бейнитного превращения в низколегированных сталях .....	13
<i>Мальцев И. М., Гаврилов Г. Н., Климашев Ю. А., Мазульников И. В., Ошурина Л. А.</i> Обработка инструментальных сталей токами высокой плотности при нагреве под термическую обработку .....	22
<i>Бровер А. В., Бровер Г. И., Дьяченко Л. Д.</i> Особенности проявления структурной наследственности в процессе скоростной лазерной обработки сталей .....	31

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

<i>Соколов Г. Н., Зорин И. В., Лысак В. И., Арисова В. Н.</i> Влияние режима электрошлаковой наплавки на термокинетические процессы получения легированного сплава на основе алюминидов $\gamma'$ -Ni <sub>3</sub> Al. ....	41
<i>Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А., Гордиенко П. С., Панин Е. С., Метлицкая Л. П.</i> Исследование поверхностных слоев вольфрамсодержащих твердых сплавов при электроискровом легировании алюминием. ....	52
<i>Куимов С. Д., Малафеев А. С., Бычков Н. А., Ростовщиков В. А.</i> Многослойные осесимметричные полуфабрикаты и изделия из композиционных материалов.....	63
<i>Кулик В. И., Борковских В. А., Борковских Н. Н., Савин В. В.</i> Структурные и физико-механические характеристики уплотненных пироуглеродом углерод-углеродных композиционных материалов на основе тканевых наполнителей.....	70

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ  
МАТЕРИАЛОВ**

<i>Марголин Б. З., Минкин А. И., Костылев В. И., Пиминов В. А.</i> Инженерный метод оценки вязкого подраста трещины при неизотермическом термосиловом нагружении.....	78
<i>Минкин А. И., Марголин Б. З., Костылев В. И., Смирнов В. И.</i> Прогнозирование консервативных $J_R$ -кривых для материала антикоррозионной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР с учетом влияния нейтронного облучения.....	91
<i>Демидов А. В., Макаров А. Г., Сталевич А. М.</i> Вариант математического моделирования деформационных процессов полимерных материалов.....	101

**ХРОНИКА**

Итоги научно-практической конференции по результатам работы по важнейшему инновационному проекту государственного значения «Создание технологий и освоение промышленного производства конструкционных металлических материалов с двукратным повышением важнейших эксплуатационных свойств» (проект «Металл») .....	111
9-я международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» .....	117
Памяти Юлия Семеновича Золоторевского .....	120
<b>Рефераты публикуемых статей</b> .....	122

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 669.15–194.2:620.187:621.785.4

**Исследование влияния хрома на микроструктуру и кинетику бейнитного превращения в низколегированных сталях.** Титовец Ю. Ф., Золоторевский Н. Ю., Самойлов А. Н., Hribernig G., Pichler A. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 5–12.

Представлены результаты систематических исследований структуры и кинетики бейнитного изотермического превращения в низколегированных сталях Fe–Mn–Cr методами электронной микроскопии. При температурах выше 520°C на начальных стадиях превращения образуется преимущественно бескарбидный бейнит, а завершается распад аустенита реакцией эвтектоидного типа. Показано, что даже небольшое увеличение содержания хрома от 0,8 до 1,1% приводит в указанной температурной области к существенному торможению и незавершенности бейнитного превращения.

*Ключевые слова:* низколегированная сталь, электронная микроскопия, изотермическое превращение, бескарбидный бейнит.

УДК 669.15–194.2:621.785.4

**Моделирование бейнитного превращения в низколегированных сталях.** Титовец Ю. Ф., Золоторевский Н., Самойлов А. Н., Hribernig G., Pichler A. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 13–22.

Кинетика бейнитного  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в низкоуглеродистых низколегированных сталях часто имеет характерную особенность: относительно быстрая начальная стадия сменяется медленной (при определенных условиях — до полной остановки) второй стадией, а завершается распад аустенита реакцией эвтектоидного типа. Экспериментально показано, что наличие такой кинетики и ее конкретные параметры сильно зависят от содержания некоторых легирующих элементов, в частности, хрома. В настоящей работе на основе сложившихся в последние годы теоретических представлений о зарождении и росте бейнита предложена физическая модель бейнитного превращения в низкоуглеродистых сталях, включающая в себя, в частности, описание примесного торможения роста бейнита и упрощенное описание эвтектоидной реакции. Показано, что компьютерная версия модели в комплексе с ранее развитой моделью ферритного превращения адекватно описывает основные закономерности распада аустенита в исследуемых сплавах.

*Ключевые слова:* низкоуглеродистая низколегированная сталь, бейнитное  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, эвтектоидная реакция, физическая модель, закономерности распада аустенита.

УДК 669.14.018.25:621.785.545

**Обработка инструментальных сталей токами высокой плотности при нагреве под термическую обработку.** Мальцев И. М., Гаврилов Г. Н., Климашев Ю. А., Мазульников И. В., Ошурина Л. А. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 22–31.

Исследованы структура и свойства сталей 6ХС, 9ХФ, ШХ15, 8Х6НФТ после нагрева импульсным током высокой плотности  $10^8$ – $10^9$  А/м<sup>2</sup> (электронным ветром) под закалку и отпуск. Рассмотрено влияние скорости охлаждения и низкого отпуска на стабильность твердости сталей после скоростной электротермической обработки.

*Ключевые слова:* инструментальные стали, ток высокой плотности (электронный ветер), обработка под закалку и отпуск, стабильность твердости.

УДК 669.15–621.785.6

**Особенности проявления структурной наследственности в процессе скоростной лазерной обработки сталей.** Бровер А. В., Бровер Г. И., Дьяченко Л. Д. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 31–40.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования особенностей проявления структурной наследственности в процессе гипернеравновесных фазовых переходов. Определяли средний размер зерна аустенита после различных вариантов объемной и поверхностной термообработки быстрорежущих сталей, по которому оценивали температурный интервал нагрева стали под закалку. Установлено, что в зоне лазерной закалки из твердого аустенитного состояния

размер аустенитных зерен в легированных сталях на 15–35% больше, чем в основном металле, подвергнутом объемной закалке от оптимальных температур нагрева. Этот эффект объясняется двумя возможными механизмами перекристаллизации в условиях скоростной лазерной обработки.

*Ключевые слова:* легированные стали, лазерная закалка, структурная наследственность, гипернеравновесные фазовые переходы.

УДК 621.791.92:669.24`715

**Влияние режима электрошлаковой наплавки на термокинетические процессы получения легированного сплава на основе алюминиды  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al.** Соколов Г. Н., Зорин И. В., Лысак В. И., Арисова В. Н. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 41–52.

Исследован режим электрошлаковой наплавки в секционном токоведущем кристаллизаторе композиционной порошковой проволокой. Установлена совокупность параметров, позволяющих управлять тепловой ситуацией в шлаковой ванне. Показано, что теплофизические условия для качественного расплавления разнородных компонентов порошковой проволоки и легирования образующегося расплава алюминиды обеспечиваются в высокотемпературной области шлаковой ванны. На основании совместного анализа теплового режима наплавки и результатов моделирования разработана термокинетическая модель расплавления порошковой проволоки, позволяющая прогнозировать образование легированного алюминиды никеля  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, секционный токоведущий кристаллизатор, полый неплавящийся электрод, композиционная порошковая проволока, тепловой режим наплавки, легкоплавкая модель, термокинетическая модель расплавления, расплав алюминиды никеля  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al, поверхностное натяжение.

УДК 621.785.048.4:669.15`27–194

**Исследование поверхностных слоев вольфрамсодержащих твердых сплавов при электроискровом легировании алюминием.** Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А., Гордиенко П. С., Панин Е. С., Метлицкая Л. П. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 52–62.

Электроискровое легирование до сих пор не находило промышленного применения для упрочнения исполнительных поверхностей режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов. Повышение размерной стойкости такого инструмента достигается при использовании электроискрового легирования, в частности алюминием. Благодаря образованию на поверхности легированного слоя толщиной 12–15 мкм режущий инструмент обладает повышенной размерной стойкостью.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, вольфрамсодержащий твердый сплав, режущий инструмент, металлографический анализ, химический состав, массоперенос, размерная стойкость.

УДК 621.763–419:621.77

**Многослойные осесимметричные полуфабрикаты и изделия из композиционных материалов.** Куимов С. Д., Малафеев А. С., Бычков Н. А., Ростовщиков В. А. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 63–69.

Проведены исследования по созданию многослойных осесимметричных изделий (валы, оси, трубы, цилиндры) из различных композиционных материалов с использованием горячего газостатического прессования и современных радиально-ковочных машин с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий специального и общего машиностроения.

*Ключевые слова:* композиционные материалы, многослойные осесимметричные изделия, горячее газостатическое прессование, радиальная ковка.

УДК 678.067:661.66

**Структурные и физико-механические характеристики уплотненных пироуглеродом углерод-углеродных композиционных материалов на основе тканевых наполнителей.** Кулик В. И., Борковских В. А., Борковских Н. Н., Савин В. В. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 70–77.

Исследованы структурные и физико-механические свойства углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) на основе тканевых армирующих наполнителей с комбинированной матрицей, получаемой методом газозафазного уплотнения пироуглеродом карбонизированного углепластика. Механические свойства (прочность на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг), а также открытую пористость уплотненного пироуглеродом УУКМ исследовали при испытаниях плоских образцов, вырезанных из слоистых прессованных пластин углепластика на основе графитированных вискозных тканей («Урал» Т-22 и ТГН-2МБ) и фенолоформальдегидного связующего СФ-010. Установлено, что все исследованные характеристики возрастают практически линейно с увеличением плотности тканевых УУКМ. Причем уровень прочности на сжатие, изгиб и сдвиг не зависит от типа ткани и структуры армирования, а определяется только плотностью материала (пористостью матрицы), тогда как прочность на растяжение зависит как от типа ткани, так и от структуры армирования и плотности УУКМ.

Особенности газозафазного насыщения пористой заготовки исследовали с помощью численного подхода, в основе которого были расчетный код процесса и одномерная модель, включающая описание эволюции пористой среды, массоперенос многокомпонентной газовой смеси в пористой среде и кинетику осаждения пироуглерода при разложении метана. В результате численных исследований получено распределение конечной плотности и остаточной пористости по толщине уплотненного пироуглеродом УУКМ. Показано, что в исходной поровой среде карбонизированной заготовки можно выделить три группы разномасштабных пор: 1) поры, по которым определяют уровень закрытой пористости УУКМ, в них процесс лимитируется скоростью массопереноса; 2) поры, по которым определяют уровень открытой пористости, в них процесс лимитируется скоростью гетерогенных реакций; 3) поры, в которых процессы переноса и осаждения практически согласованы — они вносят минимальный вклад в остаточную пористость УУКМ.

*Ключевые слова:* углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ); тканевые композиты, карбонизация, газозафазное уплотнение пористых сред, механические свойства, пористость, численное исследование.

УДК 539.4.012:539.219.2

**Инженерный метод оценки вязкого подраста трещины при неизотермическом термосиловом нагружении.** Марголин Б. З., Минкин А. И., Костылев В. И., Пиминов В. А. — Вопросы материаловедения, 2006, № 3(47), с. 78–90.

Рассмотрены подходы к определению вязкого подраста трещины при неизотермическом термосиловом нагружении. Показано, что в ряде случаев оценка вязкого подраста трещины при использовании изотермических  $J_R$ -кривых может быть неконсервативной. Предложен инженерный метод определения вязкого подраста трещины с учетом реальной истории неизотермического термосилового нагружения. Применимость метода продемонстрирована на примере построения неизотермических  $J_R$ -кривых для материала антикоррозионной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР. Выполнено прогнозирование неизотермических  $J_R$ -кривых с помощью МКЭ. Показано, что характер неизотермических  $J_R$ -кривых, полученных МКЭ и по предложенному методу, идентичен.

*Ключевые слова:* неизотермическое термосиловое нагружение, вязкий подрост трещины, неизотермические  $J_R$ -кривые, инженерный метод.

УДК 621.791.92:621.039.536.2

**Прогнозирование консервативных  $J_R$ -кривых для материала антикоррозионной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР с учетом влияния нейтронного облучения.** Минкин А. И., Марголин Б. З., Костылев В. И., Смирнов В. И. — Вопросы материаловедения, 2006, № 3 (47), с. 91–100.

Представлен подход, позволяющий получать прогнозные консервативные  $J_R$ -кривые для материала антикоррозионной аустенитной наплавки корпусов реакторов типа ВВЭР при заданном флюенсе нейтронов и температуре испытаний. При таком подходе используются полученные ранее зависимости: зависимость вязкости разрушения от флюенса нейтронов и зависимость предела текучести от флюенса нейтронов и температуры. Получены прогнозные консервативные  $J_R$ -кривые для различных состояний материала и температуры. Проведено сравнение прогнозных  $J_R$ -кривых с экспериментальными данными, полученными на образцах типа SE(B) из материала в исходном и облученном до различного флюенса нейтронов состоянии.

*Ключевые слова:* корпус реактора типа ВВЭР, антикоррозионная аустенитная наплавка, прогнозные консервативные  $J_R$ -кривые, вязкость разрушения.

УДК 678.067:539.37

**Вариант математического моделирования деформационных процессов полимерных материалов.** Демидов А. В., Макаров А. Г., Сталевич А. М. – Вопросы материаловедения, 2006, № 3(47), с. 101–110.

Предлагается вариант математической модели нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов, на основе которого осуществляется прогнозирование деформационных процессов различной сложности — от процессов простой релаксации и простой ползучести до сложных деформационно-восстановительных процессов и процессов обратной релаксации с чередованием нагрузки и разгрузки.

*Ключевые слова:* полимерные материалы, прогнозирование деформационных процессов, нелинейно-наследственная вязкоупругость, математическая модель.