

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ

Панин П. В., Манохин С. С., Дзунович Д. А. *Получение и исследование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах при обратимом легировании водородом и пластической деформации* 7

Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Кубаткин В. С., Сапронов И. Ю. *Влияние режима термической обработки на жаростойкость сплава на основе хрома при высокотемпературном окислении на воздухе* 18

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Марков М. А., Манина И. В., Шпотаковский И. Д., Орданьян С. С., Вихман С. В., Снимщиков Д. В., Красиков А. В. *Износостойкие керамические материалы на основе Al_2O_3 с различным размером зерна для опор гироскопов* 29

Горынин И. В., Фармаковский Б. В. *Высокопрочные литые микропровода системы Ni–Cr–Mo, полученные высокоскоростной закалкой расплава* 35

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Шульдешова П. М., Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Шульдешов Е. М. *Арамидные органопластики для звукопоглощающих конструкций* 42

Курносое А. О., Раскутин А. Е., Мухаметов Р. Р., Мельников Д. А. *Полимерные композиционные материалы на основе терморезистивных полиимидных связующих для авиакосмической техники*.

Обзор 50

Гончаров В. А., Раскутин А. Е. *Исследование спектральных свойств оптоволоконных сенсоров в панели из углепластика* 63

Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Железина Г. Ф. *Влияние длительного климатического старения на микроструктуру и характер разрушения в объеме эпоксидных органопластиков в условиях силового воздействия (изгиба и сжатия)* 72

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Ерофеев В. А., Пьянков И. Б. *Критерии оценки условий эксплуатации электродов при контактной точечной сварке* 83

Верхотуров А. Д., Гордиенко П. С., Андрианова Н. С. *Разработка и исследование электродных материалов, полученных с использованием концентратов и отходов минерального сырья* 93

Сизова О. В., Заикина А. А., Рубцов В. Е. *Влияние технологических режимов сварки трением с перемешиванием на механические свойства и характер разрушения алюминиево-магниевого сплава* 101

КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА МЕТАЛЛОВ

Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю. *Влияние рутения на структуру, коррозионно-механические свойства и усталостные характеристики титановых α -сплавов в коррозионной среде* 109

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. *Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Прометей*.. 120

Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. *Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve* 151

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Леонов В. П., Счастливая И. А., Ханжин А. В., Кудрин Ю. С., Обухов А. В., Макаров О. Ю. *Исследование радиационной стойкости и структурной стабильности титановых α - и псевдо- α -сплавов*..... 179

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Носов В. К., Нестеров П. А., Ермаков Е. И. *Формализация 3D моделирования равновесного полиэдрического структурного строения титановых сплавов в системе «трехмерного материаловедения (3D-MS)»* 189

Колесник М. Ю., Алиев Т. Н., Лиханский В. В. *Моделирование переориентации гидридов в оболочках твэлов отработавших ТВС в условиях сухого хранения* 198

Кикинов К. И., Леонов В. П., Счастливая И. А., Иголкина Т. Н. *Моделирование технологического процесса изготовления макета цилиндрической обечайки из нового термически стабильного титанового сплава с использованием ПК DEFORM-3D* 211

Перечень статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вопросы материаловедения» в 2016 году 222

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 669.295:621.77.016.2

Получение и исследование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах при обратимом легировании водородом и пластической деформации. Панин П. В., Манохин С. С., Дзунович Д. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 7–17.

Исследовано влияние термоводородной обработки, совмещенной с горячей прокаткой, на структурообразование в титановых α - и псевдо- α сплавах. Показана возможность создания в листовых полуфабрикатах сплавов VT5 и VT20 субмикроструктурной структуры, что позволяет осуществлять пластическую деформацию в условиях проявления эффекта сверхпластичности при пониженных на 100–200°C температурах.

Ключевые слова: титановые сплавы, водородная технология, субмикроструктурная структура, сверхпластичность, напряжение течения, электронная микроскопия, тонкая структура.

УДК 669.018.44:620.193.5

Влияние режима термической обработки на жаростойкость сплава на основе хрома при высокотемпературном окислении на воздухе. Адашкин А. М., Бутрим В. Н., Кубаткин В. С., Сапронов И. Ю. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 18–29.

Установлена зависимость жаростойкости сплава X65HВФТ на основе хрома от исходной (до окисления) структуры. Показано влияние подслоя и пористости оксида Cr₂O₃ на кинетику окисления. Минимальное количество окалины в первоначальный период окисления, развивающегося по параболическому закону, обеспечивается мелкозернистой структурой сплава за счет ускоренного образования подслоя – γ -фазы. На стадии окисления, развивающегося по линейной зависимости, при 1100°C минимальная скорость окисления сплава достигается, если образовавшийся оксид обладает минимальной пористостью, т. е. наибольшей плотностью за счет замедления диффузии кислорода. Показан механизм образования подслоя – γ -фазы – твердого раствора хрома в никеле.

Ключевые слова: сплав на основе хрома; жаростойкость; окисление жаропрочных сплавов Cr–Ni; диффузия хрома и кислорода; структура оксидного слоя.

УДК 666.3/.7:531.43

Износостойкие керамические материалы на основе Al₂O₃ с различным размером зерна для опор гироскопов. Марков М. А., Манина И. В., Шпотаковский И. Д., Орданьян С. С., Вихман С. В., Снимщиков Д. В., Красиков А. В. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 30–34.

Получены износостойкие керамические материалы на основе Al₂O₃ с диаметром зерна 3 и 15 мкм, приведена схема технологии их изготовления. Исследованы структурные и физико-механические свойства керамических материалов в сопоставлении со свойствами монокристалла Al₂O₃. Проведены трибологические испытания керамических материалов, установлена корреляционная связь между износом керамики, ее структурными особенностями и определяющим параметром – отношением твердости к модулю Юнга.

Ключевые слова: керамические материалы на основе Al₂O₃, износостойкость, структурные особенности, физико-механические свойства.

УДК 621.74:621.315.3

Высокопрочные литые микропровода системы Ni–Cr–Mo, полученные высокоскоростной закалкой расплава. Горынин И. В., Фармаковский Б. В. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 35–41.

Разработан сплав системы Ni–Cr–Mo и технология литья из него высокопрочных длинномерных микропроводов методом высокоскоростной закалки расплава. Полученные микропровода имеют прочность на разрыв более 4000 МПа, что делает их весьма перспективным армирующим материалом при получении композитов широкого спектра применения.

Ключевые слова: литой микропровод, закалка расплава, прочность, стеклянная изоляция, сплав.

УДК 678.046.5:534.855.532

Арамидные органопластики для звукопоглощающих конструкций. Шульдешова П. М., Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Шульдешов Е. М. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 42–49.

Современные звукопоглощающие конструкции должны иметь сложную многоуровневую структуру, обеспечивающую снижение шума авиационных двигателей в широком диапазоне частот, повышение акустического комфорта пассажиров и экипажа, а также снижение шума на местности. Для создания звукопоглощающих конструкций необходимы материалы с определенным комплексом акустических, механических и технологических свойств. Рассмотрены арамидные органопластики, разработанные для усовершенствованных звукопоглощающих конструкций (многослойных и градиентных) с расширенной полосой звукопоглощения.

Ключевые слова: органопластик, арамидные волокна, звукопоглощающая конструкция, коэффициент звукопоглощения.

УДК 678.067:536.495

Полимерные композиционные материалы на основе термореактивных полиимидных связующих для авиакосмической техники. Обзор. Курносое А. О., Раскутин А. Е., Мухаметов Р. Р., Мельников Д. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 50–62.

Статья посвящена анализу работ в области термостойких композиционных материалов на основе волокнистых наполнителей и полиимидных связующих. Представлены сведения о композиционных материалах на основе сетчатых полиимидов. Рассмотрены основные физико-механические характеристики стекло- и углепластиков на основе полиимидных связующих и приведены области их применения. Показаны перспективные полиимиды со структурой полувзаимопроникающих сеток и свойства композитов на их основе. Приведены основные направления развития высокотемпературных композитов.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, полиимид, связующее, полимеризация, термостойкость.

УДК 678.067.7:681.785.5

Исследование спектральных свойств оптоволоконных сенсоров в панели из углепластика. Гончаров В. А., Раскутин А. Е. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 63–71.

Представлены результаты исследований панели из углепластика с оптоволоконными сенсорами. Показана эффективность использования подобных чувствительных систем для контроля напряженно-деформированного состояния конструкции. Исследованы спектральные характеристики после формования панели в процессе механических испытаний.

Ключевые слова: углепластик, крупногабаритная панель, оптоволоконный сенсор, волоконная брэгговская решетка, трехточечный изгиб.

УДК 678.686:620.174:539.375.5

Влияние длительного климатического старения на микроструктуру и характер разрушения в объеме эпоксидных органопластиков в условиях силового воздействия (изгиба и сжатия). Деев И. С., Куршев Е. В., Лонский С. Л., Железина Г. Ф. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 72–82.

Исследованы микроструктура и характер разрушения в объеме эпоксидных органопластиков в условиях изгиба и сжатия, подвергнутых длительному (до 5 лет) старению на открытых стендах в различных климатических зонах России (в условиях промышленной зоны умеренного климата Москвы, умеренного теплого климата Геленджика и теплого влажного климата Сочи). Показано, что разрушение органопластиков при механическом нагружении проходит как по волокнам, так и по матрице и представляет собой сложный многостадийный процесс, который наблюдается на различных структурных уровнях.

Ключевые слова: органопластики, длительное климатическое старение, макро- и микроструктура, фрактография, сканирующая электронная микроскопия.

УДК 621.791.763.1.042

Критерии оценки условий эксплуатации электродов при контактной точечной сварке. Ерофеев В. А., Пьянков И. Б. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 83–92.

При контактной точечной сварке необходимо обеспечить износостойкость электродов, которая определяется термомеханическими процессами, протекающими на их рабочей поверхности. Для исследования влияния конструкции электродов и параметров сварки на эти процессы использовали физико-математическую модель, основанную на определении электрического потенциала, теплопроводности и пластической деформации, а также на соотношениях, определяющих термомеханические процессы. Предложены критерии оценки стойкости электродов при выборе их геометрии и режима сварки (отношение давления в зоне контакта между электродом и свариваемыми листами и твердости рабочих поверхностей, а также их температура), которые определяются в ходе компьютерного моделирования сварочного процесса.

Ключевые слова: контактная точечная сварка, износостойкость электродов, термомеханические процессы, физико-математическая модель.

УДК 669.187.56:621.791.042

Разработка и исследование электродных материалов, полученных с использованием концентратов и отходов минерального сырья. Верхотуров А. Д., Гордиенко П. С., Андрианова Н. С. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 93–100.

Представлены данные об использовании новых электродных материалов для электроискрового легирования металлических поверхностей. Электроды изготовлены из минерального сырья Дальневосточного региона в результате переработки отходов горного производства. Приведены данные о формировании поверхностного слоя и его свойств. Установлено, что при электроискровом легировании новыми электродными материалами повышается жаростойкость и износостойкость стали.

Ключевые слова: переработка отходов горного производства, электрошлаковый переплав, сплавы, электроды, электроискровое легирование.

УДК 669.71'721:621.791.14

Влияние технологических режимов сварки трением с перемешиванием на механические свойства и характер разрушения алюминиево-магниевого сплава. Сизова О. В., Заикина А. А., Рубцов В. Е. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 101–108.

Исследованы микроструктура и физико-механические свойства сварных соединений, выполненных способом сварки трением с перемешиванием, пластин из алюминиево-магниевого сплава АМг5М. Для выбора оптимального режима сварки варьировались основные технологические параметры процесса: скорость вращения инструмента и скорость подачи. Экспериментально показана возможность получения качественных сварных соединений.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиево-магниевый сплав, микроструктура, физико-механические свойства, дефекты сварочного происхождения.

УДК 669.295:620.194.23

Влияние рутения на структуру, коррозионно-механические свойства и усталостные характеристики титановых α -сплавов в коррозионной среде. Леонов В. П., Чудаков Е. В., Малинкина Ю. Ю. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 109–119.

Приведены результаты исследований коррозионно-механических свойств и усталостных характеристик деформированных полуфабрикатов (поковок и труб) из титановых сплавов ПТ-7М и ПТ-7М с добавками рутения. Определены основные механические свойства титановых сплавов, структура и распределение рутения в структуре. Рассмотрены результаты испытаний на статический трехточечный изгиб образцов с трещиной для определения коррозионно-

механической прочности и циклической усталостной прочности поковок и труб из этих сплавов в коррозионной среде.

Ключевые слова: титановые сплавы, циклическая усталость, коррозионное растрескивание, поковка, труба.

УДК 620.178.2.001.891.572

Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Прометей. Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г., Костылев В. И., Швецова В. А. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 120–150.

В работе решаются две задачи, возникающие при использовании локальных подходов для моделирования хрупкого разрушения: возможность использования одних и тех же параметров модели для описания хрупкого разрушения образцов разного типа и моделирование хрупкого разрушения при сложном нагружении. Для решения этих задач была модернизирована вероятностная модель хрупкого разрушения, известная как модель Прометей. Модифицированная модель (названная модель М-Прометей) была верифицирована путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при испытаниях гладких цилиндрических образцов на растяжение, цилиндрических образцов с круговым надрезом и образцов с трещиной, изготовленных из корпусной реакторной стали в исходном и охрупченном состояниях. Модель М-Прометей позволяет рассчитать вероятность хрупкого разрушения образцов разных типов при разных температурах испытания и одних и тех же параметрах модели. Получены значения параметров модели М-Прометей для моделирования хрупкого разрушения корпусных реакторных сталей в исходном и охрупченном состояниях.

Ключевые слова: корпусные реакторные стали, модифицированная модель М-Прометей, моделирование хрупкого разрушения, прогнозирование трещиностойкости.

УДК 620.178.2.001.891.572

Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Фоменко В. Н., Костылев В. И. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 151–178.

Рассматриваются преимущества и недостатки инженерного метода Unified Curve (UC) для прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости $K_{Jc}(T)$. На основе модернизированной модели хрупкого разрушения (модель Прометей-М), рассмотренной в первой части настоящей работы, проведено усовершенствование метода UC. Этот метод назван Advanced Unified Curve (AUC). На базе обширной базы данных по трещиностойкости материалов с различной степенью охрупчивания проведено сравнение метода AUC с UC, а также с наиболее распространенным инженерным методом – методом Master Curve (MC).

Ключевые слова: корпусные реакторные стали, моделирование хрупкого разрушения, метод Advanced Unified Curve (AUC), прогнозирование трещиностойкости.

УДК 669.295:621.039.531

Исследование радиационной стойкости и структурной стабильности титановых α - и псевдо- α -сплавов. Леонов В. П., Счастливая И. А., Ханжин А. В., Кудрин Ю. С., Обухов А. В., Макаров О. Ю. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 179–188.

Исследована радиационная стойкость опытных титановых сплавов композиций Ti–5Al–4V–2Zr, Ti–5Al–2Mo–2Zr и Ti–4Al–Mo–20Zr после нейтронного облучения с повреждающей дозой 0,29 сна при температуре облучения 260°C. Представлены результаты механических испытаний и микроструктурных исследований образцов методами просвечивающей электронной микроскопии, исследованы также профили распределения легирующих элементов, полученные методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Ключевые слова: титан, радиационная стойкость, флюенс.

УДК 669.295.017

Формализация 3D моделирования равновесного поли-эдрического структурного строения титановых сплавов в системе «трехмерного материаловедения (3D-MS)». Носов В. К., Нестеров П. А., Ермаков Е. И. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 189–197.

Приводятся подходы и результаты структурно-геометрического 3D моделирования поликристаллической структуры титана, титановых α -сплавов, титанового псевдо- α -сплава ВТ20 и титанового $\alpha+\beta$ -сплава ВТ6, которое представляет собой формальное преобразование информации о реальном структурном строении сплавов в структурно геометрическую пространственную модель на основе представлений о равновесной гомогенной структуре как о регулярной упаковке кристаллитов (зерен) в форме многогранников.

Ключевые слова: титановые сплавы, 3D моделирование структурного строения.

УДК 621.039.546

Моделирование переориентации гидридов в оболочках твэлов отработавших ТВС в условиях сухого хранения. Колесник М. Ю., Алиев Т. Н., Лиханский В. В. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 198–210.

Гидриды в циркониевых оболочках твэлов водоохлаждаемых ядерных реакторов являются одним из факторов деградации отработавшего ядерного топлива в условиях «сухого» хранения. Ориентация гидридов в структуре зависит от внешних напряжений, температуры, истории изменения температуры и других факторов. Наибольшую опасность представляют гидриды, ориентированные радиально, поскольку они приводят к образованию сквозных трещин в оболочке твэлов. Эксперименты показали, что гидриды выпадают упорядоченными скоплениями, или стеками, которые растут за счет выпадения новых гидридов. На основании этих данных в настоящей работе было сделано предположение, что при выпадении гидридов ориентация стеков определяется соотношением частот зарождения радиальных и тангенциальных (окружных) гидридов. С учетом этого предположения была разработана кинетическая модель, позволяющая оценивать долю радиальных гидридов в оболочке твэлов при различных сценариях изменения температуры и нагружения. Проведено сравнение результатов расчета по предложенной модели и экспериментальных данных при исследовании сплавов Э110, Э635, Э635М, Циркалой-4 и Zr–2,5Nb.

Ключевые слова: водоохлаждаемые ядерные реакторы, оболочки тепловыделяющих элементов (твэлов), циркониевые сплавы, гидриды, «сухое» хранение.

УДК 669.295:621.039.536.2

Моделирование технологического процесса изготовления макета цилиндрической обечайки из нового термически стабильного титанового сплава с использованием ПК DEFORM-3D. Кикинов К. И., Леонов В. П., Счастливая И. А., Иголкина Т. Н. – Вопросы материаловедения, 2016, № 4(88), с. 211–221.

Представлены результаты моделирования технологического процесса изготовления макета цилиндрической обечайки из нового термически стабильного и радиационно-стойкого титанового сплава композиции Ti–5Al–4V–2Zr. Приведены результаты решения задачи с помощью программного комплекса (ПК) DEFORM-3D с использованием физических свойств сплава и механических характеристик течения материала. Дана оценка моделирования процессаковки применительно к оборудованию ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Ключевые слова: титановый сплав, моделирование, ПК DEFORM-3D.