

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**  
**"ВОПРОСЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ"**  
**№ 4(52), 2007**

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ФРАГМЕНТАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ**

<b>Ван Хауттэ П., Канджарла А. К., Зифелдт М., Деланнэ Л.</b> Исследование неоднородности пластической деформации в поликристалле в мезомасштабе.....	7
<b>Пантлеон В.</b> Структура деформации в сопоставлении с зернистой структурой после интенсивной пластической деформации .....	13
<b>Миура Х., Йосида У., Сакаи Т.</b> Микроструктурная эволюция на границе зерна в бикристалле меди при многоосной ковке .....	24
<b>Зифелдт М., Кустерс С., Ван Боксел С., Верлинден Б., Ван Хауттэ П.</b> Исследование зависимости фрагментации зерен от содержания твердого раствора в алюминиевых и медных сплавах .....	30
<b>Зисман А. А., Рыбин В. В., Зифелдт М., Ван Боксел С., Ван Хауттэ П.</b> Обнаружение и микромеханическая реконструкция стыковых дисклинаций в слабдеформированной IF стали на основе данных дифракции электронов обратного рассеяния.....	37

**МЕТОДЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР**

<b>Адамс Б. Л., Ландон С., Качер Дж., Вагонер Р. Х.</b> Экспериментальная методология исследования металлов при больших пластических деформациях с помощью дифракции электронов обратного рассеяния .....	51
<b>Зисман А., Зифелдт М., Ван Боксел С., Ван Хауттэ П.</b> Метод градиентной матрицы для отображения кривизны кристаллической решетки по данным EBSD и пробное детектирование малоугловых границ в IF стали .....	57
<b>Калабушкин А. Е., Титовец Ю. Ф.</b> Исследование больших пластических деформаций кристаллических материалов посредством локальной рентгеновской дифрактометрии. Часть 1: Монокристаллы и крупнозернистые поликристаллы.....	68
<b>Калабушкин А. Е., Титовец Ю. Ф.</b> Исследование больших пластических деформаций кристаллических материалов посредством локальной рентгеновской дифрактометрии. Часть 2: Поликристаллические материалы. ....	75
<b>Нестерова Е. В., Рыбин В. В., Золоторевский Н. Ю., Титовец Ю. Ф.</b> Сравнительное исследование эволюции текстуры и микроструктуры низкоуглеродистой и перлитной сталей в процессе холодного волочения .....	82
<b>Исаенкова М., Перлович Ю., Фесенко В., Грехов М.</b> Исследование однородности субструктуры металла прутков, полученных равноканальным угловым прессованием (ЕСАР), методами рентгеновской дифрактометрии .....	91
<b>Ву Х., Калидинди С. Р.</b> Прогнозирование эволюции кристаллографической текстуры $\alpha$ -титана высокой чистоты и анизотропного деформационного поведения в процессе интенсивной пластической деформации.....	97

**СТАБИЛЬНОСТЬ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СТРУКТУР И ЭФФЕКТЫ ПУТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

<b>Готтштейн Г., Молодова К.</b> Термическая стабильность некоторых металлов с гранецентрированной кубической решеткой, подвергнутых равноканальному угловому прессованию.....	104
<b>Ван Боксел С., Зифелдт М., Верлинден Б., Ван Хауттэ П.</b> Модель скольжения для деформационного упрочнения алюминия, учитывающая переходные явления при изменениях пути деформации.....	111
<b>Перелома Е. В., Чао В. К., Гу К. Ф., Лаповок Р. В., Дэвис К. Х. Дж.</b> Влияние дополнительной деформационной обработки на микроструктуру, текстуру и механические свойства меди, подвергнутой равноканальному угловому прессованию .....	118
<b>Коджаспиров Г. Е., Рудской А. И., Карьялайнен Л. П.</b> Влияние параметров температурно-механического воздействия при высокотемпературной термомеханической обработке на цикл упрочнения–разупрочнения азотсодержащих коррозионно-стойких сталей .....	125

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

<b>Фирстов С. А., Рогоул Т. Г., Даниленко М. И., Горбань В. Ф., Печковский Е. П.</b> Предельное упрочнение и "теоретическая" твердость.....	129
<b>Валиев Р. З.</b> Последние разработки в области технологии интенсивных пластических деформаций для обработки объемных наноструктурных материалов.....	138
<b>Мулюков Р. Р., Назаров А. А., Имаев Р. М.</b> Объемные наноструктурированные материалы: деформационные способы получения, свойства и возможности применения.....	150
<b>Козлов Е. В., Жданов А. Н., Конева Н. А.</b> Физика зернограницного упрочнения в широком диапазоне размеров зерен.....	156
<b>Громова А. В., Иванов Ю. Ф., Козлов Е. В., Коновалов С. В.</b> Закономерности эволюции дислокационной субструктуры при волочении проволоки из сталей с высокой степенью деформации.....	169
<b>Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Соколенко В. И., Чиркина Л. А., Ковтун Г. П., Борисова И. Ф., Калиновский В. В., Малыхин Д. Г., Метолити Е. Н., Оковит В. С.</b> Влияние деформации, производимой ковкой при криогенных температурах, на эволюцию текстуры титана.....	174
<b>Перлович Ю., Исаенкова М., Фесенко В., Грехов М.</b> Текстурные аспекты образования структуры в металлических материалах при равноканальном угловом прессовании.....	180
<b>Мухтаров Ш. Х., Валитов В. А., Дудова Н. Р.</b> Механические свойства сплавов на основе никеля после интенсивной пластической деформации.....	186
<b>Псахье С. Г., Дударев Е. Ф., Кашин О. А., Найдёнкин Е. В., Раточка И. В.</b> Структура и упругопластические свойства ультрамелкозернистых титана ВТ1-0 и сплава ВТ6.....	192
<b>Утяшев Ф. З., Рааб Г. И.</b> Механизмы и модель измельчения зерен в металлах посредством интенсивной низкотемпературной деформации.....	198
<b>Корзникова Г. Ф., Ломаева С. Ф., Корзников А. В.</b> Структура и механические свойства твердого магнитного сплава Fe–Co–Cr после кручения под давлением при комнатной температуре.....	205
<b>Малышева С. П., Салищев Г. А., Якушина Е. Б.</b> Формирование субмикроструктурной структуры в листовом титане холодной прокаткой и механические свойства титана после прокатки.....	211
<b>Маркушев М. В.</b> Сопротивление излому и растрескиванию интенсивно деформированных алюминиевых сплавов с микро- и субмикроструктурной структурой.....	217
<b>Мац А. Б., Соколенко В. И.</b> Наноструктура ниобия после низкотемпературного квазигидростатического экструдирования.....	224
<b>Сафаров И. М., Корзникова Е. А., Корзников А. В.</b> Развитие кристаллографической текстуры и микроструктуры в железе, подвергнутом равноканальному угловому прессованию.....	229
<b>Волчок О. И., Калиновский В. В., Неклюдов И. М., Оковит В. С., Соколенко В. И., Хаймович П. А., Черняк Н. А., Чиркина Л. А.</b> Особенности структуры и механические свойства аустенитной стали после комбинированного интенсивного деформирования посредством волочения и квазигидростатического экструдирования в условиях криогенной температуры.....	234

## ДИСКЛИНАЦИИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

<b>Бу М. С., Жоу К., Назаров А. А., Лим Б. К.</b> Атомистическое моделирование дисклинационных трещин на тройных стыках в нанокристаллических металлах.....	240
<b>Сарафанов Г. Ф., Перевезенцев В. Н.</b> Кинетический подход к описанию образования кристаллических областей разориентированных вблизи дисклинаций.....	246
<b>Перевезенцев В. Н., Сарафанов Г. Ф., Касаткин Д. А.</b> Компьютерное моделирование образования дислокационных границ в упругом поле дисклинаций.....	252
<b>Малыгин Г. А.</b> Механизм деформационного упрочнения и формирования субмикронных дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях.....	260
<b>Назаров А. А., Бу М. С., Жоу К., Мурзаев Р. Т.</b> Атомистическое моделирование зернограницных и стыковых дисклинаций в металлах.....	269

## ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

<b>Гринберг Б. А., Иванов М. А.</b> Супердислокация и ее превращения.....	275
<b>Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Богуслаев А. В., Клочихин В. В.</b> Структура и механические свойства монокристаллов никелевого суперсплава CMSX-4 после пластической деформации.....	281
<b>Казанцева Н. В., Гринберг Б. А.</b> Влияние экстремальных условий на структуру и свойства интерметаллических соединений.....	288

<b>Сергеев В.И., Сафаров И. М.</b> Влияние большой пластической деформации на свойства и фазовые превращения суперсплава на основе никеля.....	294
<b>Антонова О. В., Волков А. Ю.</b> Микроструктура упорядоченных сплавов TiAl и CuPd после деформирования посредством сдвига под давлением .....	298
<b>Корзников А. В., Корзникова Г. Ф.</b> Образование градиентной нанокристаллической структуры в магнитотвердых сплавах системы Fe–Cr–Co в ходе деформирования в горячем состоянии посредством комплексного нагружения .....	304

## СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ ОСОБЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ

<b>Валитов В. А.</b> Образование нанокристаллической структуры после интенсивной термомеханической обработки и влияние обработки на сверхпластические свойства сплавов на основе никеля.....	311
<b>Константинова Т. Е., Токий В. В.</b> Механизмы мезоскопической деформации в условиях высокого давления .....	317

## ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

<b>Коджаспиров Г. Е., Рыбин В. В., Дракатос П. А.</b> Эволюция структуры и механические свойства стали, подвергнутой большим пластическим деформациям в области аустенитно-перлитного превращения.....	323
<b>Рыбин В. В., Хлусова Е. И., Нестерова Е. В., Михайлов М. С.</b> Формирование структуры и свойств низкоуглеродистой низколегированной стали при термомеханической обработке с ускоренным охлаждением .....	329

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И НАГРУЖЕНИЕ

<b>Мещеряков Ю. И., Жигачева Н. И., Диваков А. К., Макаревич И. П., Барахтин Б. К.</b> Ударно-волновое нагружение и диссипативные структуры в меди.....	341
<b>Морозов В. Г.</b> Вихревая модель упругопластического течения при высокоскоростных деформациях. Построение кинетического уравнения, чистый сдвиг .....	348
<b>Атрошенко С. А., Ермолаев В. А., Фроммерт М., Ху В., Наумова Н. С.</b> Условие образования наноструктуры в меди при высокоскоростной деформации.....	353
<b>Скотникова М. А., Крылов Н. А., Мотовилина Г. Д., Ланина А. А., Сорокина С. С.</b> Превращения в двухфазных титановых сплавах в условиях высокоскоростного механического нагружения .....	359

## МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И ВНУТРЕННИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

<b>Арутюнян Р. А.</b> Оценка энергозатрат при деформации и разрушении металлических материалов.....	366
<b>Конева Н. А., Жданов А. Н., Федорищева М. В., Козлов Е. В.</b> Дальнодействующие поля внутренних напряжений в ультрамелкозернистых материалах.....	372
<b>Гречников Ф. В., Михеев В. А., Попов И. П.</b> Регулирование свойств листового материала с учетом динамических процессов формирования структуры проката из алюминиевых сплавов.....	391
<b>Abstracts of published articles</b> .....	399
<b>Рефераты публикуемых статей</b> .....	413
<b>Author index</b> .....	429

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 539.2:539.374

**Исследование неоднородности пластической деформации в поликристалле в мезомасштабе.** Ван Хауттэ П., Канджарла А. К., Зифелдт М., Деланнэ Л. – Вопросы материаловедения, 2007, №4 (52), с. 7–12.

Рассматриваются три статистические многоуровневые модели пластической деформации поликристаллических материалов: модель Тейлора, модели LAMEL и ALAMEL. В двух последних моделях в отношении неоднородности деформации в зернах поликристалла были приняты допущения. Результаты реализации этих моделей сравниваются с результатами обстоятельных исследований CPFEM этого распределения в мультикристалле.

*Ключевые слова:* модель Тейлора, модель ALAMEL, мезомасштабная неоднородность деформации.

УДК 539.2:539.374

**Структура деформации в сопоставлении с зернистой структурой после интенсивной пластической деформации.** Пантлеон В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 13–23.

Дислокационные границы образуются непрерывно во время пластической деформации и делят зерна с исходно однородной ориентацией на более мелкие участки с различными ориентациями. Различия в ориентациях усиливаются с пластической деформацией, и при интенсивной пластической деформации образуются новые большеугольные границы зерен, но значительная часть границ имеет меньшие углы разориентировки, что свидетельствует об их происхождении из исходных однородных зерен; сохраняется взаимосвязь между ориентациями по обеим сторонам границ, образовавшихся во время деформации. Установление взаимосвязей ориентаций возможно по данным пространственной ориентации, полученным, например, дифракцией электронов обратного рассеяния. Структуры деформации с присущими им взаимосвязями ориентаций отличаются от зеренных структур, не имеющих взаимосвязей ориентаций между соседними зернами, зависимостью углов разориентировки от расстояния между точками измерения. Количественный анализ показывает, что микроструктуру сильно деформированных металлов невозможно трактовать без противоречий как зернистую, а необходимо рассматривать как структуру деформации фрагментированных зерен с образовавшимися при деформации границами.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, деформационная структура, зеренная структура, дислокационные границы, разориентировки, взаимосвязь с ориентацией, длина хорды, дифракция электронов обратного рассеяния, ECAE, MODF.

УДК 669.3:539.2:539.374

**Микроструктурная эволюция на границе зерна в бикристалле меди при многоосной ковке.** Миура Х., Йосида У., Сакаи Т. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 24–29.

На бикристалле меди заданной ориентации, имеющем границу кручения [001], исследовано предпочтительное формирование новых мелких зерен на межзеренных границах во время интенсивной пластической деформации. Бикристалл был прокован по разным осям при температуре 523 К до суммарной деформации  $\Sigma\varepsilon = 3,6$  в максимуме. Микросубструктура начинает эволюционировать преимущественно на границах зерен и вокруг них даже в области меньшей деформации, тогда как это не было замечено во внутренней области зерен, в отдалении от границы. С увеличением деформации субструктура на границах зерен и вокруг них постепенно эволюционировала в мелкозернистую структуру. В противоположность этому эволюционировавшая субструктура в исходной внутренней области зерен в отдалении от их границ не преобразовывалась в мелкозернистую даже после многооснойковки до  $\Sigma\varepsilon = 3,6$ . Поэтому очевидно, что граница зерен играет важную роль в образовании мелкозернистой структуры во время интенсивной пластической деформации. Поскольку разориентация между вновь возникшими субзернами и зернами с увеличением суммарной деформации постепенно изменялась от низкой к высокой, механизм эволюции новых зерен при многоосной ковке можно интерпретировать как низкотемпературную непрерывную динамическую рекристаллизацию. Рассмотрены механизмы формирования мелкозернистой структуры на границе зерен при многоосной ковке.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, многонаправленная ковка, горячая деформация, бикристалл, граница зерен, медь.

УДК 548.4:539.2:539.27

**Исследование зависимости фрагментации зерен от содержания твердого раствора в алюминиевых и медных сплавах.** Зифелдт М., Кустерс С., Ван Боксел С., Верлинден Б., Ван Хауттэ П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 30–36.

Предлагается подход к исследованию зависимости ориентационной фрагментации от параметров материала и процесса. Рабочие гипотезы заключаются в том, что можно выделить два по существу разных типа фрагментации зерен – фрагментация вследствие взаимодействия зерно–зерно и фрагментация вследствие запуска новых механизмов в кинетике дислокации – и что последний тип реализуется в процессе зарождения и роста. Приводятся электронограммы последовательного дробления зерен в твердом растворе состава AlMg и AlCu, иллюстрирующие то, каким образом зависимости от разных параметров материала (энергии дефектов укладки, напряжения трения) могут быть отделены друг от друга. Приводится краткое описание модели зарождения границ фрагментов, основанной на двойном поперечном скольжении. Результаты исследований с помощью модели для

сплавов составов CuAl и CuMn удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, в то время как моделирование для составов AlMg и AlCu иллюстрирует важность точных входных параметров, таких как энергия дефектов упаковки и энергия активации двойного поперечного скольжения, а также собственно физической картины элементарных процессов.

*Ключевые слова:* фрагментация зерен, дифракция электронов обратного рассеяния, двойное поперечное скольжение, дисклинации.

УДК 669.141.247:539.2:548.4

**Обнаружение и микромеханическая реконструкция стыковых дисклинаций в слабдеформированной IF стали на основе данных дифракции электронов обратного рассеяния.** Зисман А. А., Рыбин В. В., Зифелдт М., Ван Боксел С., Ван Хауттэ П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 37–50.

Дисклинации, обусловленные полем вращения решетки, что было определено картированием (с помощью структурной электронографии с обратным рассеянием) текстуры вблизи тройного зернограничного стыка в малодеформируемой выплавленной в индукционной печи стали, были обнаружены и количественно оценены на линии стыка и на линии гребня соседней границы. Ответственные за эти линейные дефекты несовместимые пластические деформации реконструированы по межзеренным дезориентациям с помощью простой микромеханической модели, которая предусматривает взаимодействие трех зерен. Рассчитаны соответствующие поля упругого вращения и напряжения. Поле вращения, обуславливающее ту часть дезориентаций, которая вызвана деформацией, как оказывается, удовлетворительно совпадает с данными структурной электронографии с обратным рассеянием и свидетельствует о том, что на рассматриваемых границах зерен наряду с дисклинациями стыков имеются источники вынужденных плоских напряжений (дислокации Сомильяна (Somigliana)). Расчетное поле напряжения определяет местоположение вероятных областей пластической аккомодации, что также хорошо согласуется с соответствующими особенностями текстурной карты.

*Ключевые слова:* поликристалл, зернограничный стык, вызванные деформацией дефекты, дисклинация, вращение кристалла, дифракция электронов обратного рассеяния.

УДК 539.22:539.374:539.27

**Экспериментальная методология исследования металлов при больших пластических деформациях с помощью дифракции электронов обратного рассеяния.** Адамс Б. Л., Ландон К., Качер Дж., Вагонер Р. Х. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 51–56.

Рассматриваются экспериментальные методы выборочного исследования полей кривизны кристаллической решетки, которые образуются пластической деформацией в кристаллических материалах. Эти методы базируются на электронограммах, формирующихся в растровом электронном микроскопе, работающем в режиме пятна. Стандартные методы на основе градиента ориентации строятся на восстановлении ориентации решетки путем деления по окружности каждой локальной электронограммы. Обсуждаются ограничения, связанные с этим методом, и приводятся результаты его применения. Описана новая методология, основанная на взаимной корреляции между смежными изображениями, получаемыми в растровом электронном микроскопе. Предварительные результаты, полученные на образце из хорошо отожженного никеля, позволяют предположить, что разрешение ориентации может быть улучшено по крайней мере на порядок по сравнению с обычным методом на основе градиента ориентации.

*Ключевые слова:* дифракция электронов обратного рассеяния, кривизна кристаллической решетки, пластическая деформация.

УДК 669.141.247:548.4:539.27

**Метод градиентной матрицы для отображения кривизны кристаллической решетки по данным EBSD и пробное детектирование малоугловых границ в IF стали.** Зисман А., Зифелдт М., Ван Боксел С., Ван Хауттэ П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 57–67.

Введена градиентная матрица для определения градиента ориентации кристаллической решетки, являющегося признаком кристаллических субструктур, по данным дифракции электронов обратного рассеяния. Пробное картографирование этого градиента вблизи зернограничного стыка в малодеформированной IF стали выявило отчетливую малоугловую границу, идущую от линии стыка. Однако фоновая дислокационная субструктура отображается значительно хуже из-за шума измерения.

*Ключевые слова:* IF сталь, тройной зернограничный стык, малоугловая граница, кривизна кристаллической решетки, дифракция электронов обратного рассеяния.

УДК 539.374:548.73

**Исследование больших пластических деформаций кристаллических материалов посредством локальной рентгеновской дифрактометрии. Часть 1: Монокристаллы и крупнозернистые поликристаллы.** Калабушкин А. Е., Титовец Ю. Ф. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 68–74.

Приведено краткое описание технологии локальной рентгеновской дифрактометрии. Представлена простая модель для определения ориентации. Рассмотрен уровень погрешностей измерений и расчетов ориентации и разориентировки. Приведены и рассмотрены типичные рентгенограммы монокристаллических областей образцов из алюминия с различными уровнями пластической деформации и зарегистрированный процесс рекристаллизации.

*Ключевые слова:* локальная рентгеновская дифрактометрия, ориентация кристаллической решетки, большая пластическая деформация.

УДК 539.374:548.73

**Исследование больших пластических деформаций кристаллических материалов посредством локальной рентгеновской дифрактометрии. Часть 2: Поликристаллические материалы.** Калабушкин А. Е., Титовец Ю. Ф. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 75–81.

Простая модель для определения ориентации монокристалла, описанная в первой части настоящей работы, была применена к рентгенограммам “мультикристалла”, полученным посредством локальной рентгеновской дифрактометрии. Приведены и рассмотрены решение задачи в отношении мультикристалла и типичный пример такой задачи. Линейный масштаб исследованных предлагаемым методом объектов уменьшился с 300 до 50–70 мкм. Применение предлагаемого метода в исследовании “идеальных” и сильно деформированных кристаллических материалов продемонстрировано на примерах рентгенограмм, полученных с деформированных и рекристаллизованных образцов из алюминия.

*Ключевые слова:* локальная рентгеновская дифрактометрия, ориентация кристаллической решетки, большая пластическая деформация.

УДК 669.15–194.53:621.778:620.187

**Сравнительное исследование эволюции текстуры и микроструктуры низкоуглеродистой и перлитной сталей в процессе холодного волочения.** Нестерова Е. В., Рыбин В. В., Золоторевский Н. Ю., Титовец Ю. Ф. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 82–90.

Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии проведено сравнительное исследование эволюции микроструктуры и текстуры в процессе волочения ферритной и перлитной сталей в интервале истинных деформаций от 0.3 до 2. Показано, что исследованные материалы различаются как характером фрагментации, так и особенностями текстурообразования. В ферритной стали микроструктура начинает эволюционировать путем образования и накопления малоугловых дислокационных границ и эта стадия простирается до  $\varepsilon \sim 1$ . В перлитной стали фрагментированная структура наследует морфологию ламелярной структуры недеформированного перлита и с самого начала развивается путем накопления разориентировок. В результате в перлите значительно быстрее происходит рост разориентировок на границах деформационного происхождения. Текстурированный максимум  $\langle 110 \rangle$  быстрее формируется на начальной стадии волочения ( $\varepsilon < 0.5$ ) в ферритной стали. С ростом степени деформации характеристики текстуры материалов сближаются. Выявленные отличия в развитии фрагментации и текстуры перлита связаны с его ламелярным строением, приводящим к анизотропии упрочнения систем скольжения. Показано, что сохранение в текстуре существенной хаотической компоненты является характерной особенностью волочения ОЦК металлов, а не связано со спецификой материала.

*Ключевые слова:* сталь ферритная и перлитная, холодное волочение, эволюция микроструктуры и текстуры, просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия.

УДК 539.2:620.187:621.77.016.2

**Исследование однородности субструктуры металла прутков, полученных равноканальным угловым прессованием (ЕСАР), методами рентгеновской дифрактометрии.** Исаенкова М., Перлович Ю., Фесенко В., Грехов М. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 91–96.

Развит новый подход к изучению неоднородности субструктуры после равноканального углового прессования, учитывающий взаимосвязь между неоднородностью и анизотропией субструктуры. Для построения распределения по структурным параметрам использован рентгенодифракционный метод IPO. Приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие возможности предлагаемого подхода.

Представлены некоторые экспериментальные данные, иллюстрирующие возможности и эффективность предложенного подхода.

*Ключевые слова:* субструктура, равноканальное угловое прессование (ECAP), электронная микроскопия, обобщенная полюсная фигура GPF.

УДК 539.2:548.4

**Прогнозирование эволюции кристаллографической текстуры  $\alpha$ -титана высокой чистоты и анизотропного деформационного поведения в процессе интенсивной пластической деформации.** Ву Х., Калидинди С. Р. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 97–103.

Разработана новая поликристаллическая модель Тейлоровского типа для моделирования эволюции кристаллографической текстуры  $\alpha$ -титана высокой чистоты и анизотропного деформационного поведения при комнатной температуре в процессе интенсивной пластической деформации. Кристаллографическое скольжение, деформационное двойникование и скольжение внутри областей с двойниковыми кристаллами рассматривались в модели как механизмы, участвующие в пластической деформации. При достижении общей объемной доли двойников заданного насыщения доминирующие системы двойников в отдельном кристалле рассматривались как независимые зерна. Вновь образовавшиеся зерна могли претерпевать дальнейшее скольжение и сопутствующее вращение решетки, но дальнейшее двойникование прекращалось. Были введены новые описания для упрочнения скольжения и двойникования и комплексной взаимосвязи между ними. Для макроскопической анизотропии и эволюции текстуры по трем монотонным путям деформации отожженных исходно текстурированных образцов из высокочистого  $\alpha$ -титана был получен хороший прогноз.

*Ключевые слова:* двойникование, пластическая деформация, упрочнение, анизотропия.

УДК 621.78:621.77.016.2:539.2:620.187

**Термическая стабильность некоторых металлов с гранецентрированной кубической решеткой, подвергнутых равноканальному угловому прессованию.** Готтштейн Г., Молодова К. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 104–110.

Чистая медь, сплав CuZr и алюминиевый сплав были подвергнуты равноканальному угловому прессованию при комнатной температуре по технологии, применяемой для металлов с объемно-центрированной кубической решеткой. Было исследовано влияние термообработки на эволюцию микроструктуры. Для исследования деформированных и отожженных образцов были применены дифракция электронов обратного рассеяния, просвечивающая электронная микроскопия и испытания на микротвердость. Исследования показали, что деформированные равноканальным угловым прессованием образцы из чистой меди обладают весьма низкой термической стабильностью по сравнению с холоднокатаным материалом при одинаковой суммарной деформации. Однако она значительно повысилась при легировании небольшим количеством циркония. Наоборот, деформированный равноканальным угловым прессованием алюминиевый сплав проявил заметное запаздывание прерывистой рекристаллизации при большем числе шагов прессования.

*Ключевые слова:* равноканальное угловое прессование, дифракция электронов обратного рассеяния, просвечивающая электронная микроскопия, рекристаллизация, отжиг.

УДК 669.71:539.374:539.431

**Модель скольжения для деформационного упрочнения алюминия, учитывающая переходные явления при изменениях пути деформации.** Ван Боксел С., Зифелдт М., Верлинден Б., Ван Хауттэ П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 111–117.

Рассматриваются результаты двух типов испытаний для определения изменений контура деформации в образцах из алюминия. В обоих случаях переходный характер объясняется микроструктурными процессами, которые изменяют анизотропию образца. Приведена многомасштабная модель текстурно-деформационного упрочнения, которая способна охватить основные явления.

*Ключевые слова:* изменения пути деформации, деформационное упрочнение, испытания на поперечный изгиб, испытания на знакопеременный изгиб, алюминий.

УДК 669.3:539.22:621.777

**Влияние дополнительной деформационной обработки на микроструктуру, текстуру и механические свойства меди, подвергнутой равноканальному угловому прессованию.**

Перелома Е. В., Чао В. К., Гу К. Ф., Лаповок Р. В., Дэвис К. Х. Дж. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 118–124.

Бескислородная медь с высокой электропроводностью и ультрамелкозернистой структурой (чистота 99,95%) была обработана 8-ходовым равноканальным угловым прессованием и затем подвергнута нескольким проходам прокатки при комнатной температуре и при температуре жидкого азота до обжатия на 96,5%. Микроструктура, текстура, и механические свойства прокатанных после прессования образцов были исследованы с помощью растрового электронного микроскопа с функцией дифракции электронов обратного рассеяния рентгеновской дифрактометрии и испытаний на растяжение. Было обнаружено, что прокатка может еще улучшить полученную равноканальным угловым прессованием микроструктуру. После прокатки сильнее, чем ожидалось, проявил себя компонент текстуры латуни, и предполагается, что он возникает в результате изменения пути деформации с переходом от прессования к прокатке, что в свою очередь активизирует прежде латентные системы скольжения. Прокатка при температуре жидкого азота дала более крупную фракцию компонента латуни, чем прокатка при комнатной температуре. Результатом прокатки после равноканального углового прессования стала большая величина равномерного удлинения.

*Ключевые слова:* медь, ультрамелкозернистая структура, равноканальная угловая экструзия/прессование, прокатка, текстура.

УДК 669.14.018.8`786:621.78–977:539.4.014

**Влияние параметров температурно-механического воздействия при высокотемпературной термомеханической обработке на цикл упрочнения–разупрочнения азотсодержащих коррозионно-стойких сталей.** Коджаспиров Г. Е., Рудской А. И., Карьялайнен Л. П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 125–128.

Исследовано влияние параметров температурно-механического воздействия в условиях высокотемпературной термомеханической обработки на цикл упрочнения–разупрочнения азотсодержащих коррозионно-стойких сталей. Проведены испытания на осесимметричное сжатие на термомеханическом моделирующем устройстве «Gleeble 1500». Как показатель упрочнения твердость подвергнутых высокотемпературной термомеханической обработке образцов увеличивалась со снижением температуры деформации и усилением механического воздействия при температурах 800–1000°С.

*Ключевые слова:* коррозионно-стойкие стали, высокотемпературная термомеханическая обработка.

УДК 539.531:539.431

**Предельное упрочнение и «теоретическая» твердость.** Фирстов С. А., Рогов Т. Г., Даниленко М. И., Горбань В. Ф., Печковский Е. П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 129–137.

Рассмотрена сущность предельного упрочнения материалов. Предложена новая концепция «теоретической» твердости для быстрой и эффективной оценки максимально возможного упрочнения материалов. Предложено определение «теоретической» твердости и выведена формула для ее расчета. Произведен анализ расчетной теоретической твердости некоторых материалов.

*Ключевые слова:* твердость, инденторное воздействие, упрочнение, наноструктура.

УДК 669.018:539.374

**Последние разработки в области технологии интенсивных пластических деформаций для обработки объемных наноструктурных материалов.** Валиев Р. З. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 138–149.

Несмотря на большие перспективы, применение наноструктурных металлов и сплавов в качестве конструкционных и функциональных материалов нового поколения оставалось до недавнего времени открытым вопросом. Только в последние годы в этой области наметился прорыв, связанный как с разработкой новых технологий изготовления наноструктурных объемных материалов, так и с исследованиями фундаментальных механизмов, которые приводят к появлению новых свойств этих материалов. Хотя для глубокого понимания этих механизмов еще необходимы фундаментальные исследования, экспериментальные промышленные изделия для медицины и микроустройств могут поступить на рынок в ближайшем будущем. В настоящей статье представлены новые концепции и принципы применения технологий интенсивных пластических деформаций для изготовления объемных наноструктурных материалов с перспективными свойствами. Особое внимание уделено анализу влияния микроструктурных особенностей наноструктурных материалов, подвергнутых интенсивной пластической деформации, на механизмы деформации и механические свойства, а также первым примерам инновационного применения этих материалов.



*Ключевые слова:* объемные наноструктурные материалы, интенсивная пластическая деформация, прочность, текучесть, сверхпластичность.

УДК 539.2:621.73

**Объемные наноструктурированные материалы: деформационные способы получения, свойства и возможности применения.** Мулюков Р. Р., Назаров А. А., Имаев Р. М. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 150–155.

Рассмотрены основные результаты исследований по объемным наноструктурированным материалам, выполненных в Институте проблем сверхпластичности металлов (ИПСМ) Российской Академии наук. Институт является пионером в применении деформационных методов наноструктурирования металлов по всей толщине. Изложены основные принципы одного из наиболее эффективных методов деформации для производства наноструктурированных материалов – изотермической многократнойковки. Рассмотрены необычные физические и механические свойства объемных наноструктурированных материалов и очерчены перспективные виды конструкционного и функционального применения этих материалов.

*Ключевые слова:* наноструктурированные материалы, изотермическая многократнаяковка, механические свойства, физические свойства.

УДК 539.22:539.389:620.186.8

**Физика зернограницного упрочнения в широком диапазоне размеров зерен.** Козлов Е. В., Жданов А. Н., Конева Н. А. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 156–168.

Предложена оценка современных представлений о структуре и механических свойствах нанополикристаллических металлов и сплавов, о методах измельчения зерна, об особенностях механизмов деформации в диапазоне наноразмеров с отдельным рассмотрением роли скольжения по границе зерна и задач, вытекающих из зависимости Холла–Петча.

*Ключевые слова:* нанополикристаллические металлы, твердость, размеры зерен.

УДК 669.14: 539.25:621.778

**Закономерности эволюции дислокационной субструктуры при волочении проволоки из сталей с высокой степенью деформации.** Громова А. В., Иванов Ю. Ф., Козлов Е. В., Коновалов С. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 169–173.

Проделан анализ количественных и качественных электронно-микроскопических исследований дислокационной субструктуры сталей различных конструкционных классов, образующейся при волочении проволоки и высадке со степенью обжатия до 75 %.

*Ключевые слова:* волочение проволоки, сталь, дислокационная субструктура.

УДК 669.295: 539.2:621.73–973

**Влияние деформации, производимой ковкой при криогенных температурах, на эволюцию текстуры титана.** Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Соколенко В. И., Чиркина Л. А., Ковтун Г. П., Борисова И. Ф., Калиновский В. В., Малыхин Д. Г., Метолитиди Е. Н., Оковит В. С. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 174–179.

Для выяснения механизмов формирования наноструктуры и их зависимости от температурных режимов были исследованы процессы образования текстуры в поликристаллическом титане ВТ1-0, находившемся в состоянии поставки и подвергнутом разнонаправленной ковке при температуре 300 К и 77 К. Образец, деформированный при 77 К, характеризуется особым состоянием текстуры. Его можно определить как наиболее изотропное состояние, которое является результатом разрушения текстуры из-за макро- и микромасштабного двойникования. Данные рентгенографического исследования структуры согласуются с результатами измерений внутреннего трения и отражательной способности в инфракрасном диапазоне.

*Ключевые слова:* титан, криогенная температура,ковка, двойникование, наноструктура, текстура.

УДК [669.295+669.295]:539.2:621.777

**Текстурные аспекты образования структуры в металлических материалах при равноканальном угловом прессовании.** Перлович Ю., Исаенкова М., Фесенко В., Грехов М. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 180–185.

Формирование кристаллографической текстуры при равноканальном угловом прессовании и во взаимосвязи с развитием субструктуры рассмотрены на примере прутков из титана (Ti) и циркония (Zr). На базе данных о текстуре по аналогии с прокаткой были определены положения осей нагрузки и механизмы рабочей деформации. Равноканальное угловое прессование по маршрутам С и В<sub>с</sub>

отличается от других режимов деформирования повторяющимся поворотом решетки зерна к устойчивой ориентации при каждом следующем проходе. Рассеяние текстуры в титановом прутке свидетельствует об активизации динамической рекристаллизации.

*Ключевые слова:* равноканальное угловое прессование, титан, цирконий, кристаллографическая текстура, механизмы пластической деформации, рассеяние текстуры.

УДК 669.245:539.214:539.374

**Механические свойства сплавов на основе никеля после интенсивной пластической деформации.** Мухтаров Ш. Х., Валитов В. А., Дудова Н. Р. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 186–191.

Исследовано влияние структуры, сформировавшейся в результате интенсивной пластической деформации (ИПД), на свойства сплавов на никелевой основе. ИПД исследована с помощью схем многоосевойковки и кручения при высоком давлении. Показано, что субмикро- и нанокристаллические сплавы могут проявлять признаки низкотемпературной сверхпластичности (СП). С уменьшением среднего размера зерна в сплаве температурная граница СП снижается, напряжение пластического течения уменьшается и пластичность возрастает.

Исследования микроструктуры на расчетной длине деформированных образцов показывают, что СП-деформация приводит к трансформации неравновесных границ зерен в более равновесные и это сопровождается уменьшением плотности дислокаций и увеличением размера зерен. Некоторые границы зерен демонстрируют полосчатый контраст, типичный для равновесных большеугловых границ.

Проведен сравнительный анализ структуры и механических свойств объемного образца и листа Inconel 718 после СП-деформирования и термообработки. Показано, что обычная термообработка обеспечивает получение механических свойств, соответствующих стандартным требованиям.

*Ключевые слова:* сплав на основе никеля, интенсивная пластическая деформация, структура, сверхпластичность, механические свойства.

УДК 669.14.018:621.785.062.53 539.43

**Структура и упругопластические свойства ультрамелкозернистых титана VT1-0 и сплава VT6.** Псахье С. Г., Дударев Е. Ф., Кашин О. А., Найдёнкин Е. В., Раточка И. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 192–197.

Приведены результаты комплексного исследования микроструктуры, деформационного поведения в области микро- и макропластической деформации, упругопластических и неупругих свойств титана VT1-0 и сплава VT6 с ультрамелкозернистой (субмикрокристаллической) структурой, сформированной посредством интенсивной пластической деформации. Показано, что в результате формирования ультрамелкозернистой (субмикрокристаллической) структуры закономерности деформационного упрочнения в области микропластической деформации сохраняются, а в области макропластической деформации происходят существенные изменения. Рассмотрены закономерности изменения упругопластических и неупругих свойств титана VT1-0 и сплава VT6 при переходе от крупнозернистой к ультрамелкозернистой структуре. Показана взаимосвязь между истинным зернограницным проскальзыванием и проявлениям сверхпластичности у сплава VT6 в ультрамелкозернистом состоянии.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, титановые сплавы, ультрамелкозернистая структура, деформационное поведение, механические свойства.

УДК 539.2:539.374

**Механизмы и модель измельчения зерен в металлах посредством интенсивной низкотемпературной деформации.** Утяшев Ф. З., Рааб Г. И. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 198–204.

Для придания металлическим материалам необычных физических и механических свойств посредством глубокого измельчения зерен в последнее время стали применяться методы интенсивной низкотемпературной пластической деформации (ИПД). Предполагается, что при таких ИПД-методах, как равноканальное угловое прессование прутка и скручивание тонких дисков под давлением, измельчение происходит благодаря реализации деформации простого сдвига.

Настоящая статья рассматривает измельчение зерен в металлах как следствие процесса формирования фрагментов и полос в результате кристаллографических и некристаллографических сдвигов при изгибе и/или скручивании образца. Упомянутые механизмы деформации и измельчения реализуются при любых методах больших низкотемпературных деформаций. Именно эти механизмы

ответственны за измельчение структуры, которое достигается во время прокатки, волочения и при других способах формоизменения металла, при которых образец тем или иным путем подвергается изгибу–кручению. Характерная особенность методов равноканального углового прессования и скручивания дисков состоит в том, что изгиб–кручение образца в локализованном очаге деформации явно и сильно нарастают, что ведет к немонотонной деформации и увеличению угловых разориентировок границ сформировавшихся полос и фрагментов. Показано, что глубина рафинирования структуры зависит от вклада упомянутых механизмов в суммарную деформацию, которая в свою очередь зависит от масштабного фактора – размеров очага деформации и размеров образца.

*Ключевые слова:* деформация, механизмы, нанокристаллические металлы, фрагменты, полосчатые структуры, тензор плотности, кривизна, кручение.

УДК 539.385:621.318.1

**Структура и механические свойства твердого магнитного сплава Fe–Co–Cr после кручения под давлением при комнатной температуре.** Корзникова Г. Ф., Ломаева С. Ф., Корзников А. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 205–210.

Исследована эволюция структуры, магнитных и механических свойств твердого магнитного сплава Fe–8%Co–30%Cr после испытаний на кручение (при разных углах закручивания) под давлением на наковальне Бриджмена. Обработке подвергали образцы со структурой двух типов: 1) закаленная

на  $\alpha$ -твердый раствор и 2) ( $\alpha_1+\alpha_2$ )-структура (с высокой коэрцитивной силой). Установлено, что если при интенсивной пластической деформации формируется нанокристаллическая структура с размером зерна  $\sim 100$  нм независимо от исходной фазовой структуры, то механизмы кинетики структурных превращений от исходного фазового состава сильно зависят. При деформации сплава в исходном состоянии (с высокой коэрцитивной силой) наблюдалось некоторое снижение коэрцитивной силы и повышение пластичности, а при деформации  $\alpha$ -твердого раствора в исходном состоянии коэрцитивная сила повышалась.

*Ключевые слова:* магнитный сплав, твердый раствор, большая пластическая деформация, нанокристаллическая структура.

УДК 669.295: 539.2:621.771.016

**Формирование субмикроструктурной структуры в листовом титане холодной прокаткой и механические свойства титана после прокатки.** Малышева С. П., Салищев Г. А., Якушина Е. Б. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 211–216.

Рассматриваются изменения микроструктуры, текстуры и механических свойств, приобретаемые техническим листовым титаном с исходной крупнозернистой (КЗ) и субмикроструктурной (СМК) структурой во время холодной прокатки. СМК структура была обработана многократной ковкой. Были определены деформации, допустимые при прокатке титана с различным размером зерна. Показано, что образцы с СМК и КЗ структурой могут быть деформированы на 96% без промежуточного отжига. Исследования микроструктуры и механических свойств листового титана, обработанного прокаткой при комнатной температуре, показали, что в процессе прокатки происходит измельчение микроструктуры и она становится более однородной. Кроме того, в листах с исходной крупнозернистой структурой после прокатки формируется до 50% зерен субмикронного размера и их объемная доля увеличивается с деформацией. В полуфабрикатах обоих типов формируется типичная текстура, получаемая прокаткой. Листы крупнозернистого титана приобретают высокие механические свойства, сопоставимые со свойствами субмикроструктурного титана. Проведен сравнительный анализ механических свойств образцов из титана с субмикроструктурной структурой, обработанных различными способами.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, субмикроструктурная структура, холодная прокатка, титан, прочность, удлинение, текстура.

УДК 669.71:539.219.2:539.374

**Сопротивление излому и растрескиванию интенсивно деформированных алюминиевых сплавов с микро- и субмикроструктурной структурой.** Маркушев М. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 217–223.

Рассмотрены особенности разрушения при комнатной температуре промышленных алюминиевых сплавов 1560(Al–6,5Mg–0,6Mn) и 5083(Al–4,4Mg–0,7Mn–0,15Cr) с фрагментированной и зернистой

субмикроструктурной (СМК) ( $d \sim 0,4\text{--}0,5$  мкм) и микроструктурной (МК) ( $d \sim 5\text{--}8$  мкм) структурой, подвергнутых интенсивным пластическим деформациям посредством углового экструдирования и последующему отжигу. Превращение деформированной СМК структуры в МК отожженную структуру ведет к изменению характера разрушения от преимущественно хрупкого межкристаллического к пластическому транскристаллическому. Рассмотрены данные качественного и количественного анализов растрескивания и роста трещин. В частности, показано, что меньшее сопротивление растрескиванию в СМК структурах имеет место из-за предшествовавшей и более интенсивной локализации пластической деформации в объеме сплавов в результате формирования крупных полос сдвига, проходящих через сотни зерен. Сделан вывод, что основным фактором, определяющим сопротивление сплавов росту трещин, являются размеры зоны пластической деформации (ЗПД) в вершине трещины: наименьшие размеры имеет ЗПД в материалах с фрагментарной СМК структурой, наибольшие – в МК сплавах.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, алюминиевые сплавы, растрескивание и рост трещин, субмикро- и микроструктурная структура.

УДК 669.293:539.2:621.777–973

**Наноструктура ниобия после низкотемпературного квазигидростатического экструдирования.** Мац А. Б., Соколенко В. И. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 224–228.

Представлены результаты электронно-микроскопических исследований структуры ниобия (99,89%) после деформирования посредством квазигидростатической экструзии (КГЭ) при температуре 77 К в диапазоне степени деформации  $\varepsilon = 2,25\text{--}6,91$ . Показаны особенности процесса, имеющего место во время самоорганизации структуры и развития фрагментации. Поперечные размеры фрагментов и расстояние между их границами составляют 20–100 нм, разориентировки вытянутых большеугловых границ составляют  $8,5\text{--}34^\circ$ . Выявлены эффекты нестабильности фрагментированной структуры.

*Ключевые слова:* ниобий, криогенная температура, квазигидростатическая экструзия, наноструктура, нестабильность.

УДК 669.12:539.2:621.77.016.2

**Развитие кристаллографической текстуры и микроструктуры в железе, подвергнутом равноканальному угловому прессованию.** Сафаров И. М., Корзникова Е. А., Корзников А. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 229–233.

Исследована субмикроструктурная (СМК) структура технически чистого железа в процессе равноканального углового прессования. Показано, что после четырех проходов, соответствующих истинной деформации  $\varepsilon = 4,7$ , формируется фрагментированная микроструктура, которая в процессе последующего отжига преобразуется в зернистую СМК структуру. Обработанная СМК структура характеризуется высокой прочностью и текучестью. В структуре железа при равноканальном угловом прессовании формируются макрополосы сдвига, отличающиеся как размерами фрагментов, так и их ориентацией по отношению к направлению деформации сдвига. Исследования текстуры также подтвердили неравномерный характер деформации при равноканальном угловом прессовании.

*Ключевые слова:* субмикроструктурная структура, равноканальное угловое прессование, макрополосы сдвига, текстура.

УДК 669.15–194.56:[621.777+621.778]–973

**Особенности структуры и механические свойства аустенитной стали после комбинированного интенсивного деформирования посредством волочения и квазигидростатического экструдирования в условиях криогенной температуры.** Волчок О. И., Калиновский В. В., Неклюдов И. М., Оковит В. С., Соколенко В. И., Хаймович П. А., Черняк Н. А., Чиркина Л. А. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 234–239.

Исследовано последовательное сочетание различных способов деформирования при 77 К при различных диаграммах механических напряжений и изучено влияние этих способов на механические свойства аустенитной стали. Сочетание волочения с квазигидростатическим экструдированием повысило упрочнение до уровня, которого невозможно достичь применением отдельных типов деформации вплоть до  $\varepsilon_f = 70\%$ . Комбинированная деформация качественно изменяет эпюру внутренних напряжений. Это обеспечивает реализацию ротационных мод пластической деформации, максимальную полноту превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и самую высокую степень деформации стали в холодном состоянии. Магнитные измерения и данные о внутреннем трении показали, что после волочения объемное содержание мелкодисперсной  $\alpha$ -фазы становится больше, чем после

квазигидростатического экструдирования, а максимум достигается при последовательной комбинации этих двух видов деформирования.

*Ключевые слова:* криогенный, волочение, экструдирование, мартенситные превращения, упрочнение, магнитные свойства, внутреннее трение.

УДК 539.2:548.4

**Атомистическое моделирование дисклинационных трещин на тройных стыках в нанокристаллических металлах.** Ву М. С., Жоу К., Назаров А. А., Лим Б. К. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 240–245.

Приводится описание атомистического моделирования дисклинированного тройного стыка в кобальтовой нанопроволоке, состоящей из трех зерен. Границы зерен построены в соответствии со структурной моделью. Моделирование показывает, что существует критическая мощность  $\omega_c$  дисклинации, при которой происходит зарождение трещины на тройном стыке, и что  $\omega_c$  наглядно показывает значительное влияние размеров при 0, 300 и 500 К. Размеры трещины (длина, ширина) и общая конфигурация зависят от сопротивления дисклинации  $\omega$ , температуры и структур границ зерен. Для рассматриваемых температур механизмами релаксации являются бифуркационное зарождение трещины на границах зерен, аморфизация, конкурирующая с вторичным растрескиванием на границах зерен по фронту трещины, и образование субзерна. Бифуркационная трещина сначала удлиняется и расширяется по мере того, как  $\omega$  становится больше  $\omega_c$ . Однако с дальнейшим увеличением  $\omega$  общая длина бифуркационной трещины уменьшается, а два ее ответвления расширяются, что, по-видимому, вызывается инициацией других механизмов.

*Ключевые слова:* дисклинационная трещина, тройной стык, нанокристаллические металлы, атомистическое моделирование.

УДК 548.4

**Кинетический подход к описанию образования кристаллических областей, разориентированных вблизи дисклинаций.** Сарафанов Г. Ф., Перевезенцев В. Н. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 246–251.

На основе кинетического подхода рассмотрена самосогласованная динамика совокупности дислокаций в упругом поле дисклинаций. Показано, что дисклинации собирают вокруг себя дислокационный заряд, который вызывает разориентацию кристаллов в ближайших к нему областях, равную половине мощности дисклинаций. Максимальная плотность дислокационного заряда располагается вдоль линий нулевого уровня упругого поля дисклинаций, экранированного совокупностью дислокаций, перпендикулярно существующей системе скольжения дислокаций.

*Ключевые слова:* дислокации, дисклинации, субграница, мезодефекты, фрагментация.

УДК 681.3:548.4

**Компьютерное моделирование образования дислокационных границ в упругом поле дисклинаций.** Перевезенцев В. Н., Сарафанов Г. Ф., Касаткин Д. А. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 252–259.

Проведено компьютерное моделирование поведения совокупности дислокаций в упругом поле дисклинации и внешнего напряжения во время деформации. Показано, что дисклинация ведет к нарушению ламинарного потока дислокаций и появлению дислокационных субграниц, которые эффективно экранируют упругое поле дисклинаций. Исследован процесс образования стыковых дисклинаций и образования оборванных дислокационных границ во время пластической деформации бикристаллической и трикристаллической модели.

*Ключевые слова:* дислокации, дисклинации, субграница, мезодефекты, фрагментация.

УДК 548.4:539.374:621.77.016.2

**Механизм деформационного упрочнения и формирования субмикронных дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях.** Малыгин Г. А. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 260–268.

В рамках дислокационно-кинетического подхода, основанного на уравнениях дислокационной кинетики, теоретически обсуждается механизм деформационного упрочнения и образования субмикронных дислокационных структур (СДС) при больших пластических деформациях. Образование СДС является результатом процесса самоорганизации геометрически необходимых (ГН) дислокаций. Источником ГН дислокаций являются градиенты пластической деформации в границах дислокационных ячеек вследствие неоднородного характера распределения дислокаций на

микроуровне в пластически деформированном материале. На основе выведенных соотношений проанализированы данные о механических свойствах Al и Al–Mg сплава после РКУ прессования и последующего их отжига с целью получения равновесных границ зерен.

*Ключевые слова:* большие пластические деформации; дислокационно-кинетический подход, РКУ прессование.

УДК 539.2:548.4:681.3

**Атомистическое моделирование зернограницных и стыковых дисклинаций в металлах.** Назаров А. А., Ву М. С., Жоу К., Мурзаев Р. Т. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 269–274.

Приводится обзор последних данных по атомистическому компьютерному моделированию механизмов релаксации напряжений дисклинаций и влиянию стыковых дисклинаций на диффузию по границам зерен в наноструктурированных металлах. Это моделирование установило существование критической мощности дисклинации, выше которой дисклинация может привести к образованию трещины. В бикристаллах титана (Ti) дисклинации могут релаксироваться также конкурирующими механизмами, такими как образование новых зерен и аморфизация; в никеле (Ni) превращений такого типа в наклонных границах зерен не наблюдалось. В нанокристаллах дисклинации могут привести к увеличению коэффициента диффузии по границам зерен более чем на два порядка.

*Ключевые слова:* дисклинация, трещина, диффузия по границам зерен, нанокристаллические металлы, атомистическое моделирование.

УДК 548.4

**Супердислокация и ее превращения.** Гринберг Б. А., Иванов М. А. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 275–280.

Супердислокации являются носителями пластической деформации в интерметаллических композиционных материалах. Важной особенностью является то, что заблокированные супердислокации, которые образуются благодаря повторному расщеплению скользящих супердислокаций или перестройке ядра сверхчастичных дислокаций, обладают самой низкой энергией. Предложено новое представление о возможности термически активированного блокирования супердислокаций в отсутствие внешних напряжений (самоблокирование). Был выявлен вполне обычный термически активируемый процесс, который вызывает вытягивание дислокации в преимущественном направлении и является необходимым этапом в преобразованиях дислокаций, ведущих к блокированию. По своему характеру этот процесс представляет собой переброс дислокации из мелкой впадины потенциального рельефа в глубокую. Следующие этапы этой перестройки исходной дислокации: образование двойного перегиба и последующая его переориентация в преимущественном направлении. Была рассчитана движущая сила этого процесса и сформулированы условия для его реализации в случаях полных, сверхчастичных и частичных дислокаций. Получены экспериментальные доказательства справедливости предложенной концепции.

*Ключевые слова:* супердислокации, пластическая деформация, изменение потенциала, блокирование дислокаций, самоблокирование.

УДК 669.245: 539.2:539.374

**Структура и механические свойства монокристаллов никелевого суперсплава CMSX-4 после пластической деформации.** Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Свердлов В. Я., Богуслаев А. В., Ключихин В. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 281–287.

Исследованы микроструктура и микротвердость Ni-суперсплава CMSX-4 после пластической деформации осадкой при температурах 1065 и 1170°C (степень деформации  $\varepsilon \approx 60\%$ ). При определенных режимах деформации происходит измельчение  $\gamma'$ -фазы до размеров 0,1–0,05 мкм (~50 нм). При этом частицы  $\gamma'$ -фазы приобретают сферическую форму, распределяясь в  $\gamma$ -матрице изотропно или текстурировано. Микротвердость сплавов увеличивалась от HV  $\approx 4000$  МПа в исходном состоянии до HV  $\approx 8000$  МПа в деформированном.

*Ключевые слова:* Ni-суперсплав CMSX-4, монокристалл, пластическая деформация, наноструктура.

УДК 669.017.165:669.017.3:539.374

**Влияние экстремальных условий на структуру и свойства интерметаллических соединений.** Казанцева Н. В., Гринберг Б. А. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 288–293.

Представлен обзор экспериментальных данных о влиянии больших пластических деформаций на структуру, фазовые превращения и свойства никелевых суперсплавов и новых перспективных алюминидов титана системы Ti–Al–Nb. Установлено, что в сплавах Ti–Al–Nb большие пластические деформации вызывают различные фазовые превращения, одно из которых – разупорядочение. Новые метастабильные фазы A20 и B19 были обнаружены в этих сплавах.

При ударно-волновом нагружении в никелевом суперсплаве было обнаружено фазовое превращение суперструктуры  $L1_2$  в модулированную тетрагональную ( $c/a = 2,022$ ) суперструктуру  $DO_{22}$ . Модулированные суперструктуры имели переменные антифазовые границы. Фазовое превращение структуры  $L1_2 \rightarrow DO_{22}$  сопровождалось изменением магнитных свойств: магнитная восприимчивость изменилась по сравнению с исходной примерно на два порядка.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, интерметаллические соединения, структура, фазовые превращения.

УДК 669.245:669.017.3:539.374

**Влияние большой пластической деформации на свойства и фазовые превращения суперсплава на основе никеля.** Сергеев В. И., Сафаров И. М. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 294–297.

Исследовано изменение многофазовой структуры сплава на основе никеля после интенсивного пластического деформирования и последующего отжига. Деформирование производилось на наковальнях Бриджмена при комнатной температуре. Установлено, что вследствие интенсивной пластической деформации произошло превращение многофазовой структуры в однофазовую. Отжиг ведет к распаду однофазовой структуры и выделению частиц карбида и интерметаллических частиц.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, суперсплав на основе никеля, фазовые превращения, твердый раствор.

УДК 669.017.165:539.2:539.374

**Микроструктура упорядоченных сплавов TiAl и CuPd после деформирования посредством сдвига под давлением.** Антонова О. В., Волков А. Ю. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 298–303.

Показано, что применение сдвига под давлением позволяет деформировать интеркристаллическое соединение TiAl (суперструктура  $L1_0$ ) и сплав CuPd (суперструктура B2) до весьма высоких степеней деформации, в результате чего можно получить нанокристаллическую структуру с размерами кристаллита до 10 нм. Для исследования эволюции микроструктуры в процессе пластического деформирования и особенностей дефектной субструктуры применялись рентгенография и электронная микроскопия. Установлено, что фрагментация сплава после деформирования происходит через стадии образования полосчатой структуры, что главным образом обусловлено двойникованием в TiAl, с последующей потерей стабильности ее границ и образованием нанокристаллических структур. Образование локализованных полос деформации в сплаве CuPd сопровождается фазовым превращением  $B2 \rightarrow Al$  на первых стадиях деформирования. Деформация соединения TiAl стимулирует в некоторых частях образца фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha_2$ . При крайне высоких степенях деформации наблюдалось образование сильно диспергированных кристаллитов с неизвестной структурой как в TiAl, так и в CuPd.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, интерметаллические соединения, структура, фазовое превращение.

УДК 621.318.12:539.2:620.175

**Образование градиентной нанокристаллической структуры в магнитотвердых сплавах системы Fe–Cr–Co в ходе деформирования в горячем состоянии посредством комплексного нагружения.** Корзников А. В., Корзникова Г. Ф. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 304–310.

Экспериментально исследованы эволюция структуры и микротвердость магнитотвердых сплавов Fe–25Cr–15Co и Fe–30Cr–8Co во время комплексного двухэтапного нагружения посредством высадки–скручивания в изотермических условиях при различных температурах. Обнаружено, что в обоих сплавах деформация вызывает интенсивное измельчение исходной крупнозернистой структуры. Однако преобразованная структура неоднородна по сечению образца. В активной зоне деформации вблизи головки образца имеются микрокристаллический слой с размером зерна около 5 мкм в однофазном сплаве Fe–30Cr–8Co и микроструктура с двойным размером зерна около 0,5 мкм

в двухфазном сплаве Fe–15Co–25Cr. С удалением от активной зоны деформации размер зерна увеличивается, а микротвердость уменьшается.

*Ключевые слова:* магнитотвердый сплав, деформация, комплексное нагружение, градиентная структура.

УДК 669.245:539.214:621.78

**Формирование нанокристаллической структуры при интенсивной деформационно-термической обработке и ее влияние на сверхпластические свойства никелевых сплавов.**

Валитов В. А. . – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 311–316.

В настоящей работе на широком круге сплавов на никелевой и никель-железной основе с различным типом упрочнения ( $\gamma+\gamma'$ ;  $\gamma+\delta+\gamma''$ ;  $\gamma+\gamma'+Y_2O_3$ ) проведено систематическое исследование закономерностей структурообразования в широком температурно-скоростном интервале пластической деформации. Установлены термомеханические режимы обработки, обеспечивающие поэтапную трансформацию крупнозернистой структуры в микрокристаллическую (МК) и далее вплоть до нанокристаллического (НК) структурного состояния. Выявлены закономерности влияния морфологии упрочняющей фазы и условий обработки на развитие процессов структурообразования при горячей, теплой и холодной деформации. Выявлена взаимосвязь фазового состава и типа упрочнения жаропрочных сплавов с термостабильностью субмикрокристаллической (СМК) и НК структур и возможностью проявления эффектов низкотемпературной и высокоскоростной сверхпластичности (СП).

*Ключевые слова:* нанокристаллическая структура, сверхпластичность, интенсивная деформационно-термическая обработка, никелевый сплав.

УДК 539.2:548.4:539.374

**Механизмы мезоскопической деформации в условиях высокого давления.** Константинова Т. Е., Токий В. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 317–322.

Рассматриваются эффекты, создаваемые высоким давлением в микро- и мезоструктуре деформированных промышленных сплавов на основе железа и титана. На первом микромасштабном уровне роль высокого давления состоит в уменьшении подвижности дислокаций, вероятность накопления дислокаций возрастает и качество дислокаций растрескивания снижается. На следующем мезоскопическом уровне пластическая деформация некоторых многокомпонентных сплавов (Fe–17Ni–9Co–5Mo–1Ti, Fe–0,8C, Ti–5Al–5V–5Mo, Ti–40Nb) происходит за счет локальных дипольных изгибов кристаллической решетки, что является объемным дефектом мезоуровня. Описаны экспериментальный метод определения параметров и дислокационная модель нового мезодефекта. Вид деформации можно рассматривать как совместные изгиб и кручение. Высокое давление приводит к значительным непрерывно распределенным разориентировкам и образованию областей локальных изгибов сферического типа, что усиливает взаимодействие дислокаций. С помощью теоретической модели рассмотрен механизм фрагментации, представляемый как превращение дислокационных диполей в дисклинационные диполи. Показано, что деформация титановых сплавов может быть обусловлена мартенситным превращением  $\beta \rightarrow \alpha$  (ротационная мода), которое является обратимым. Описана эволюция структуры титановых сплавов после равноканального многоугольного прессования и горячей экструзии кручением.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, высокое давление, мезоструктура, механизмы деформации, изгиб, мартенсит деформации, фрагментация, сплавы на основе железа и титана.

УДК 669.14.018:539.374:621.78

**Эволюция структуры и механические свойства стали, подвергнутой большим пластическим деформациям в области аустенитно-перлитного превращения.** Коджаспиров Г. Е., Рыбин В. В., Дракатос П. А. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 323–328.

Рассматривается образование структуры при больших пластических деформациях среднеуглеродистых низколегированных сталей в температурном интервале 1000–600°C при непрерывном воздушном и водяном охлаждении. Показано, что при вышеупомянутых условиях появляется многокомпонентная мартенситно-бейнитно-перлитно-ферритная структура. Имеют место процессы частичной коагуляции цементита в перлитном компоненте с ячеистой и фрагментированной структурой в феррите при плотности дислокаций внутри ячеек и фрагментов в интервале  $10^9$ – $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Понижение температуры в конце деформации вызывает постепенное нарастание плотности дефектов в обоих компонентах структуры при некотором росте перлитного компонента.



Установлены зависимости между механическими свойствами, компонентами структуры и тонкой структурой. Это позволяет прогнозировать и контролировать предел текучести подвергнутых термомеханической обработке сталей с многокомпонентной структурой.

*Ключевые слова:* коррозионно-стойкие стали, термомеханическая обработка при высоких температурах.

УДК 669.14.018:621.785.062.53

**Формирование структуры и свойств низкоуглеродистой низколегированной стали при термомеханической обработке с ускоренным охлаждением.** Рыбин В. В., Хлусова Е. И., Нестерова Е. В., Михайлов М. С. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 329–340.

Работа посвящена результатам исследования взаимосвязи структуры и свойств толстолистового проката из хромоникельмолибденовой мартенситно-бейнитной стали, микролегированной марганцево-никелевой ферритно-бейнитной стали и микролегированной марганцовистой ферритной стали при термомеханической обработке (ТМО). Особое внимание уделено роли динамической рекристаллизации и деформационно-индуцированной фрагментации аустенита в формировании в низколегированных малоуглеродистых сталях мелкозернистых изотропных структурных состояний. Показано, что динамическая рекристаллизация позволяет изменить морфологию бейнита с анизотропной игольчатой на более изотропную гранулярную. Интенсивная пластическая деформация в области фрагментации аустенита не только сохраняет эту тенденцию, но и приводит к образованию фрагментированного гранулярного бейнита и интенсивному измельчению ферритного зерна. Дополнительное упрочнение при термомеханической обработке мартенситно-бейнитной стали достигается благодаря формированию фрагментированного гранулярного бейнита, наследующего деформационно-индуцированную структуру горячекатаного аустенита. Упрочнение ферритной стали обусловлено измельчением ферритного зерна и фрагментацией феррита. Суммарное воздействие перечисленных механизмов упрочнения обеспечивает сохранение высокого уровня прочности ферритно-бейнитной стали несмотря на обусловленное ТМО увеличение доли ферритной составляющей. Наряду с повышением прочностных характеристик, термомеханическая обработка низкоуглеродистой низколегированной стали позволяет увеличить сопротивление хрупким разрушениям при температурах до  $-60^{\circ}\text{C}$ .

*Ключевые слова:* низкоуглеродистая низколегированная сталь, термомеханической обработке с ускоренным охлаждением, толстолистовой прокат, структура и свойства.

УДК 669.3:539.2:620.178.7

**Ударно-волновое нагружение и диссипативные структуры в меди.** Мещеряков Ю. И., Жигачева Н. И., Диваков А. К., Макаревич И. П., Барахтин Б. К. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 341–347.

Ударно-волновое нагружение поликристаллической меди М3 в одноосном напряженном состоянии обнаруживает пороговое зарождение диссипативных структур диаметром 15–25 мкм. Турбулентнообразные конфигурации (там, где они наблюдаются) находятся в зернах, благоприятно ориентированных относительно направления распространения ударной волны. Каждая структура, в свою очередь, состоит из сеток параллельных или взаимно перпендикулярных полос сдвига с шагом 100–300 нм, поэтому размер элементарной ячейки, ограниченной полосами сдвига в их масштабе, относится к наноструктуре. В макроскопическом отношении импульс и энергия, затраченные на образование структур, количественно характеризуются «дефицитом скорости частицы» – разностью между скоростью ударного нагружения при симметричном соударении и скоростью открытой поверхности ударно-нагруженной плоской мишени. Имеется пороговая скорость деформации, выше которой дефицит скорости частицы начинает нарастать очень быстро и одновременно таким же образом возрастают твердость и предел текучести материала.

*Ключевые слова:* ударная волна, турбулентность, наноструктура, полосы сдвига, динамическая прочность.

УДК 539.37:539.386

**Вихревая модель упругопластического течения при высокоскоростных деформациях. Построение кинетического уравнения, чистый сдвиг.** Морозов В. Г. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 348–352.

Упругопластическая среда при высокоскоростных деформациях рассматривается как смесь частиц, характеризующих два состояния: упругое и пластическое. Такая модель адекватна современным экспериментальным представлениям о гетерогенности течения на мезоуровне, где переход в пластичность происходит за счет образования вихревых пластических очагов. Строится феноменологическое кинетическое уравнение для концентрации завихренности для простого случая

– чистого сдвига. Уравнение решается в квазистационарном приближении для полосы сдвига и для пластического пограничного слоя. При этом области пластичности и упругости разделяются. Решения предназначены для описания очагов пластичности на мезоуровне. На основе их будет строиться феноменологическая макромодель пластического течения. Предполагается применить этот подход для моделирования инициирования взрыва твердых ВВ при низкоскоростном воздействии. Механизм его – нагрев ВВ в очагах пластичности. По структуре уравнений при больших скоростях сдвиговое пластическое течение переходит в турбулентное с поперечными вихрями.

*Ключевые слова:* очаги пластичности, мезоуровень, низкоскоростное воздействие на ВВ.

УДК 669.3:539.21:539.411.5

**Условие образования наноструктуры в меди при высокоскоростной деформации.** Атрошенко С. А., Ермолаев В. А., Фроммерт М., Ху В., Наумова Н. С. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 353–358.

Рассматривается образование наноструктуры при динамической рекристаллизации во время высокоскоростной деформации. Для исследований использовались поликристаллические образцы из меди. Ударное нагружение было реализовано при комнатной температуре в диапазоне скоростей 66–210 м/с. Для исследований динамической рекристаллизации использовалась локальная динамическая характеристика ударно-нагруженных образцов, полученная с помощью двухканального лазерного интерферометра, и проводилось микроструктурное исследование образцов. В экспериментах определено сопротивление меди растрескиванию. В ударно-нагруженных образцах из меди обнаружены области динамической рекристаллизации с образовавшейся наноструктурой, сходные с теми, которые описаны в [1–4].

*Ключевые слова:* ударное нагружение, локализация сдвига, образование нанокристаллической структуры, динамическая рекристаллизация.

УДК 669.295:539.411.5

**Превращения в двухфазных титановых сплавах в условиях высокоскоростного механического нагружения.** Скотникова М. А., Крылов Н. А., Мотовилина Г. Д., Ланина А. А., Сорокина С. С. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 359–365.

Для исследования структурных и фазовых изменений, происходящих в материале плоских мишеней – образцах из титанового сплава ВТ-6 ( $\alpha + \beta$ ) – в диапазоне скоростей ударного напряжения от 400 до 600 м/с, применяют электронную микроскопию просвечивающего типа (ЭМПТ), сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и рентгенографию. Показано, что волна сжатия пластической деформации модулирует структуру материала, разбивая ее на микроблоки размером 4–40 мкм. Вдоль границ блоков волна разгрузки производит координированное перемещение блоков друг относительно друга таким образом, что чем меньшего размера блок и чем ближе он находится к центру вращения, тем больше взаимное перемещение блоков. Показано, что на входе образуется волна нагружения, вызывающая распад  $\beta$ -фазы и обогащение ванадием  $\alpha$ -фазы вплоть до образования мягкой орторомбической  $\alpha''$ -фазы, которая тормозит ударную волну. Ударная волна отражается на выходе от противоположной стороны образца, и образуется волна разгрузки. Здесь происходит изменение механизма пластической деформации от сдвига к вращению. Таким образом, имеет место обратимое фазовое превращение с интенсивным выделением тепла, при котором образуется мягкая  $\beta$ -фаза, обогащенная ванадием, склонная к распаду до образования хрупкой  $\omega$ -фазы. Чем больше в количественном выражении мягкая  $\beta$ -фаза, тем меньше микротвердость на противоположной стороне материала. С момента, когда  $\beta$ -фаза переходит в хрупкую  $\omega$ -фазу, твердость материала образца возрастает. В этом месте образуется трещина.

*Ключевые слова:* электронная микроскопия просвечивающего типа, сканирующая электронная микроскопия, ударное нагружение, титановый сплав, разрушение, структурно-фазовые изменения.

УДК 669.018:539.2:539.37

**Оценка энергозатрат при деформации и разрушении металлических материалов.** Арутюнян Р. А. – Вопросы материаловедения, 2007 № 4(52), с. 366–371.

В последние годы разработаны новые методы применения интенсивных пластических деформаций при обработке металлических материалов, в результате которой происходит глубокая фрагментация зерен и материал приобретает новую субмикроструктурную структуру и необычайную прочность. В то же время проблема потребления энергии, необходимой для получения металлических материалов с новыми свойствами, в этих разработках обычно не рассматривается. В настоящей публикации рассмотрены некоторые аспекты этой проблемы, в частности потребление энергии для необратимой деформации и разрушения металлических материалов. Например, такая

проблема возникает, когда выводят критерий вязкого разрушения при ползучести для несжимаемых материалов. В соответствии с законом Хоффа [2], металлический образец разрушается, когда величина деформации стремится к бесконечности и, следовательно, к бесконечности стремится потребление необходимой для разрушения энергии. Для выведения критерия разрушения при ползучести применен закон сохранения энергии [3]. Полученный критерий включает в себя совокупность тепловой и скрытой энергии [4, 5].

Определены параметры предложенного критерия и построены теоретические кривые разрушения при ползучести. Предполагая, что тепловая энергия рассеивается и не оказывает влияния на процесс разрушения, критерий разрушения при ползучести можно упростить. Показано, что такая версия критерия энергии наилучшим образом совпадает с полученными экспериментальными кривыми разрушения при ползучести. Скрытая энергия поступает на создание необратимой пластической деформации, вызываемой дислокационным механизмом, поэтому допущение относительно несжимаемости вполне оправдано. В общем случае для реальной оценки потребления энергии введено условие сжимаемости [6] и сформулирован критерий вязко-хрупкого разрушения.

*Ключевые слова:* несжимаемый материал, критерий вязкого разрушения, закон сохранения энергии, энергия деформации, тепловая и скрытая энергия, сжимаемый материал, критерий вязко-хрупкого разрушения.

УДК 539.219.2

**Дальнодействующие поля внутренних напряжений в ультрамелкозернистых материалах.** Конева Н. А., Жданов А. Н., Федорищева М. В., Козлов Е. В. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 372–390.

Дальнодействующие поля внутренних напряжений играют важную роль в различных процессах, которые имеют место в ультрамелкозернистых (УМЗ) материалах, создаваемых интенсивной пластической деформацией (ИПД). Экспериментально эти поля не исследованы в достаточной мере. Просвечивающая электронная микроскопия является одним из наиболее подходящих способов исследования внутренних напряжений, и в настоящей статье приведено описание этих способов. Представлены результаты исследований зеренной и субзеренной структур и их границ в УМЗ меди и никеле. Выявлены источники полей напряжений. Изучен характер изменения амплитуды внутренних напряжений с увеличением расстояния от их источников. Приведена схема зеренной структуры УМЗ материалов, полученная на основании экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* дальнодействующие поля внутренних напряжений, УМЗ материалы, зерна, дислокации, дисклинации, частицы, границы.

УДК 669.71–416:539.2:621.771.016

**Регулирование свойств листового материала с учетом динамических процессов формирования структуры проката из алюминиевых сплавов.** Гречников Ф. В., Михеев В. А., Попов И. П. – Вопросы материаловедения, 2007, № 4(52), с. 391–397.

В статье приведены результаты исследований процессов высокоскоростной прокатки тонкой ленты из алюминиевых сплавов с целью получения текстуры с упорядоченной морфологией. Показана технология и представлены данные о регулировании структуры, свойств и их анизотропии посредством изменения температурно-скоростных и деформационно-силовых параметров горячей прокатки. Рассмотрена технология получения тонких лент с заданными свойствами и структурой.

*Ключевые слова:* структура материала, анизотропия, текстура ленты, рекристаллизация, температура прокатки.