

УДК 621.771/620.18
ББК 34.39
Р83

Рудской А. И. **Наноструктурированные металлические материалы.** — СПб. : Наука, 2011. — 270 с.

ISBN 978-5-02-025488-6

В книге приведены результаты исследований возможности получения субмикронных и наноструктурированных металлических материалов с использованием жидкофазных технологий, а также с использованием методов термомеханической обработки

Приведены результаты исследований физических свойств некоторых нанопорошковых материалов, особенностей их компактирования и спекания.

Рассмотрены проблемы и технологические решения при реализации процесса равноканального углового (РКУ) прессования, условия получения субмелкозернистых и наноструктурных материалов на основе алюминия.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся проблемами нанотехнологии в металлургии с применением методов порошковой металлургии и процессов интенсивной пластической деформации.

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор *К. М. Иванов*
Директор института автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН, член-корреспондент РАН
Ю. Н. Кульчин

ISBN 978-5-02-025488-6

© Рудской А. И., 2011
© СПбГПУ, 2011
© Издательство «Наука», 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| Глава 1 Наномодифицирование металлических расплавов | 6 |
| Глава 2 Получение субмикронной и нанокристаллической структуры металлов методами горячей деформации | 22 |
| 2.1. Исследование возможности измельчения зерна трехстадийной деформацией в аустенитной области | 25 |
| 2.2. Исследование возможности измельчения зерна трехстадийной деформацией в аустенитной области и в межкритическом интервале | 30 |
| 2.3. Исследование возможности измельчения зерна интенсивной пластической деформацией N, совмещенной с термоциклированием | 31 |
| 2.4. Исследование возможности измельчения зерна трехстадийной деформацией в аустенитной области, в межкритическом интервале и окончательной деформации при 700+400 °С | 32 |
| 2.5. Анализ структуры методом обратно рассеянных электронов | 43 |
| 2.6. Тестирование механических свойств материалов с субмикронной и нанокристаллической структурой | 44 |
| Глава 3 Технологические особенности получения нанопорошков | 50 |
| 3.1. Газофазный синтез наноразмерных частиц | 51 |
| 3.1.1. <i>Однокомпонентные наночастицы (Fe, Ni, W)</i> | <i>53</i> |
| <i>Синтез наночастиц на основе железа</i> <i>при атмосферном давлении</i> | <i>60</i> |

| | |
|---|----|
| <i>Сравнение структуры частиц, полученных в вакууме и при атмосферном давлении в среде инертного газа</i> | 66 |
| 3.1.2. <i>Легированные металлические наночастицы (Fe–Co, Ni–Cu)</i> | 68 |
| 3.1.3. <i>Карбидные частицы, полученные путем реакции с атмосферой несущего газа</i> | 72 |
| <i>Получение наночастиц системы железо-углерод</i> | 74 |
| 3.2. Метод термического разложения солей | 79 |
| 3.2.1. <i>Получение дисперсно-упрочненных сплавов Cu–Al₂O₃</i> | 79 |
| 3.2.2. <i>Нанопорошковый сплав WC–10Co</i> | 83 |
| 3.3. Получение наноразмерных порошков путем диспергирования | 85 |

Глава 4. Структура и свойства нанопорошков, особенности их компактирования

| | |
|---|-----|
| 4.1. Магнитные свойства наночастиц на основе железа | 90 |
| 4.2. Особенности компактирования наноструктурированных материалов методами порошковой металлургии | 101 |
| 4.2.1. <i>Компактирование неагломерированных нанопорошков</i> | 101 |
| 4.2.2. <i>Применение добавок наноразмерных частиц для активации процесса спекания вольфрама</i> | 107 |
| 4.2.3. <i>Компактирование сплавов Cu–Al₂O₃</i> | 112 |
| 4.2.4. <i>Особенности процесса спекания и механические свойства сплавов WC–Co</i> | 118 |

Глава 5. Нанотехнологические аспекты металлических материалов в условиях интенсивной пластической деформации

| | |
|---|-----|
| 5.1. Структура и механические свойства | 123 |
| 5.1.1. <i>Чистые металлы</i> | 123 |
| 5.1.2. <i>Стали и сплавы</i> | 125 |
| 5.2. Основные методы интенсивной пластической деформации | 128 |
| 5.2.1. <i>Деформация кручением под высоким давлением</i> | 134 |
| 5.2.2. <i>Всесторонняя ковка</i> | 137 |
| 5.2.3. <i>Пакетная прокатка в режимах термомеханической обработки</i> | 139 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.4. Технологические процессы изготовления сверхтонких (5–30 мкм) вакуумноплотных фольг и пленок | 143 |
| 5.2.5. РКУ-прессование как метод получения объемных СМК и НК материалов | 148 |
| 5.3. Сравнительный анализ особенностей деформирования заготовок методами интенсивной пластической деформации | 154 |

Глава 6. Исследование механики процесса получения ультрамелкозернистых металлических материалов в условиях равноканального углового прессования 166

| | |
|---|-----|
| 6.1. Конечно-элементный анализ механики РКУ-прессования | 166 |
| 6.1.1. Влияние геометрии канала | 167 |
| 6.1.1.1. Неустановившаяся стадия процесса | 168 |
| 6.1.1.2. Установившаяся стадия процесса | 176 |
| 6.1.1.3. Оценка неравномерности деформированного состояния | 181 |
| 6.2 Влияние контактного трения | 186 |
| 6.2.1. Установившаяся стадия процесса | 187 |
| 6.2.2. Оценка неравномерности деформированного состояния | 192 |
| 6.2.3. Сравнительный анализ результатов численного моделирования | 194 |
| 6.3. Расчетно-экспериментальное исследование процесса РКУ-прессования | 195 |
| 6.3.1. Инструмент для РКУ-прессования | 196 |
| 6.3.2. Материал для РКУ-прессования | 196 |
| 6.3.3. Анализ кинематики течения материала в канале .. | 197 |
| Экспериментальные исследования влияния различных смазок на кинематику течения металла при РКУ-прессовании | 197 |
| Численное моделирование | 202 |
| 6.3.4. Энергосиловые параметры | 205 |
| 6.3.5. Анализ деформированного состояния | |
| Экспериментальные исследования деформированного состояния металла при РКУ-прессовании | 208 |
| 6.3.6. Исследование структуры и свойств металла после РКУ-прессования | 213 |

| | |
|--|-----|
| Глава 7. Вероятностные реологические модели ультрамелкозернистых и наноструктурированных материалов и экспериментальное определение параметров реологических уравнений | 218 |
| 7.1. Построение определяющих уравнений для процессов пластического деформирования | 218 |
| 7.1.1. Одномерные вероятностные реологические модели . | 220 |
| 7.1.2. Выбор и обоснование вероятностных характеристик | 223 |
| 7.2. Определение вида и параметров вероятностных функций распределения зерен в УМЗ и НК материалах | 226 |
| 7.2.1. Эффект Холла–Петча | 226 |
| 7.2.2. Выбор и обоснование закона распределения зерен по размерам | 228 |
| 7.2.3. Унимодальные и полимодальные плотности вероятности распределения зерен по размерам..... | 230 |
| 7.2.4. Методика определения параметров статистических функций по экспериментальным данным | 231 |
| 7.2.5. Интегральные оценки | 232 |
| 7.2.6. Экспериментальное определение параметров вероятностных функций | 233 |
| 7.3. Экспериментальное определение параметров Холла–Петча | 238 |
| 7.3.1. Связь вероятностных функций распределения внутренних параметров и методика определения параметров Холла–Петча (ХП) | 238 |
| 7.3.2. Экспериментальные данные и расчет параметров ХП | 239 |
| Литература | 254 |