

УДК 621.771(075.8)  
Р83

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургского института машиностроения *Г. П. Анастасиади*  
Доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургского государственного политехнического  
университета *А. А. Попович*

*Рудской А. И. Технологические основы получения ультрамелкозернистых металлов* : учеб. пособие / А. И. Рудской, Г. Е. Коджаспиров. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 247 с.

Соответствует содержанию федеральной дисциплины для подготовки магистров по направлению «Металлургия, машиностроение и материалобработка».

Содержит сведения для чтения лекций и проведения лабораторных работ по изучению технологий получения ультрамелкозернистых металлических материалов (в том числе наноструктурных), основанных на применении методов пластического деформирования, термической и термомеханической обработки, порошковой металлургии и др., а также на использовании специального оборудования, в том числе для физического моделирования вышеупомянутых технологических процессов.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по магистерской программе «Методы получения и обработки металлических наноструктурных материалов» по направлениям подготовки магистров в образовательной области «Металлургия, машиностроение и материалобработка». Оно может быть также использовано при обучении в системах повышения квалификации, в учреждениях дополнительного профессионального образования.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики».

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Рудской А. И., Коджаспиров Г. Е., 2011  
© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2011

ISBN 978-5-7422-3342-8

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений.....	6
Введение.....	7
1. Методы получения ультрамелкозернистых металлических материалов.....	13
1.1. Ультрамелкозернистые материалы. Описание и классификация.....	13
1.2. Способы получения нанопорошков для формирования ультрамелкозернистых материалов.....	17
1.2.1. Механическое диспергирование и последующее компактирование.....	21
1.2.2. Газофазный синтез наноразмерных частиц.....	26
1.3. Методы и схемы получения объемных ультрамелкозернистых материалов с использованием интенсивной пластической деформации.....	41
1.3.1. Деформация кручением под высоким давлением.....	43
1.3.2. Равноканальное угловое прессование.....	45
1.3.3. Многопроходная пакетная прокатка.....	49
1.3.4. Всесторонняя ковка и другие методы обработки металлов давлением.....	51
2. Структурообразование и разрушение при интенсивной пластической деформации.....	56
2.1. Механизмы упрочнения металлических материалов.....	56
2.2. Теории разрушения, роль величины зерна и границ.....	60
2.3. Формирование ультрамелкозернистой структуры в материалах при интенсивной пластической деформации.....	75
2.3.1. Роль физики больших пластических деформаций при формировании ультрамелкозернистых структур.....	79
2.3.2. Структурные и фазовые превращения при горячей пластической деформации.....	89

2.3.3. Структурообразование и фазовые превращения при теплой деформации.....	105
2.3.4. Структурообразование при холодной пластической деформации.....	120
3. Технологические процессы изготовления листа с ультрамел- козернистой структурой.....	135
3.1. Контролируемая прокатка листа из трубных низкоугле- родистых микролегированных сталей.....	139
3.2. Современные технологии изготовления высокопрочного листа из феррито-бейнитных сталей с использованием термомеха- нической обработки.....	141
3.3. Перспективные технологии многопроходной пакетной прокатки в режимах термомеханической обработки для создания ультрамелкозернистой структуры в низкоуглеродистой ста- ли.....	147
4. Высокотемпературная термомеханическая обработка как способ получения ультрамелкозернистой структуры сортового проката.....	159
4.1. Технологические основы прокатки в режимах высоко- температурной термомеханической обработки.....	159
4.2. Высокотемпературная термомеханическая обработка коррозионностойких аустенитных и аустенитно-ферритных ста- лей.....	163
4.3. Высокотемпературная термомеханическая обработка конструкционных феррито-перлитных сталей.....	176
5. Современные методы оценки ультрамелкозернистой структуры металлических материалов.....	180
5.1. Общая классификация методов.....	180
5.2. Электронная микроскопия.....	182
5.2.1. Просвечивающая электронная микроскопия.....	185
5.2.2. Растровая электронная микроскопия.....	193
5.3. Рентгеноструктурный анализ.....	197
5.4. Сканирующая туннельная микроскопия.....	201
5.5. Атомно-силовая микроскопия.....	205

6. Перспективные ультрамелкозернистые материалы и область их применения.....	208
6.1. Титановые сплавы в технике и медицине.....	208
6.1.1. Технология получения длинномерных прутков нанотитана для медицинских применений.....	210
6.1.2. Разработка технологии получения ультрамелкозернистых титановых сплавов для изделий промышленного назначения.....	213
6.2. Ультрамелкозернистые сплавы с эффектом памяти формы и область их применения.....	217
6.3. Ультрамелкозернистая медь и ее сплавы.....	222
6.4. Микролегированные строительные низкоуглеродистые стали с ультрамелкозернистой структурой.....	227
Библиографический список.....	238