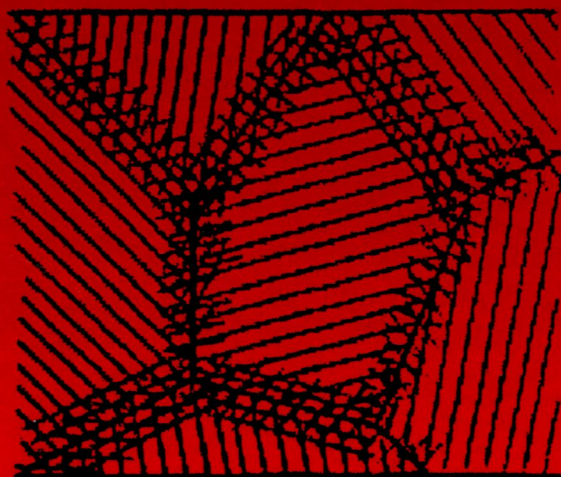


Э. В. КОЗЛОВ
А. М. ГЛЕЗЕР
Н. А. КОНЕВА
Н. А. ПОПОВА
И. А. КУРЗИНА

**ОСНОВЫ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
НАНОСТРУКТУРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**



Э. В. КОЗЛОВ
А. М. ГЛЕЗЕР
Н. А. КОНЕВА
Н. А. ПОПОВА
И. А. КУРЗИНА

ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией
доктора физико-математических наук
А. М. ГЛЕЗЕРА



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2016

УДК 539.2: 669.15

ББК 30.3я73

О 75

Авторский коллектив:

Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А., Попова Н.А.,
Курзина И.А.

Основы пластической деформации наноструктурных материалов /
Под ред. А.М. Глезера. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 304 с. —
ISBN 978-5-9221-1689-3.

В книге подробно и систематически рассмотрены особенности механического поведения поликристаллических материалов при снижении размера зерен. Проанализированы стадии деформационного упрочнения и влияние на них размерного фактора. Обобщены закономерности формирования дислокационных структур и механических свойств при изменении размера зерна. Рассмотрены внутренние поля напряжений, возникающие при дислокационном пластическом течении. С единых позиций описана «дорожная карта» возможных процессов структурообразования при гигантских пластических деформациях. На примере титана описаны структура и механические свойства модифицированных поверхностных слоев материала, полученных методом ионной имплантации. Рассмотрено применение принципа инженерии границ зерен для создания сверхвысокопрочных нанокристаллов.

Книга представляет интерес для научных работников, инженеров, аспирантов и магистров, занимающихся проблемами физики прочности и создания высокоэффективных конструкционных и многофункциональных наноматериалов.

Научное издание

ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под редакцией А.М. Глезера

Редактор *Е.С. Артоболевская*

Оригинал-макет: *И.Г. Андреева*

Оформление переплета: *В.Ф. Киселев*

Подписано в печать 05.08.2016. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 19. Уч.-изд. л. 20,9. Тираж 100 экз. Заказ № 09414

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117342, Москва, ул. Бултерова, 17 Б; e-mail: porsova@fml.ru, sale@fml.ru

Сайт: <http://www.fml.ru>; интернет-магазин: <http://www.fmlib.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства
в ООО «Паблит»

127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31 В, стр. 1

Сайт: www.publit.ru

Тел.: 8 (495) 685-93-18

ISBN 978-5-9221-1689-3



9 785922 116893

ISBN 978-5-9221-1689-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2016

© Коллектив авторов, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. Стадии пластической деформации поликристаллических материалов	10
1.1. Введение. Существо проблемы	10
1.2. Основные стадии пластической деформации поликристаллов на мезоуровне	11
1.3. Обнаружение стадий пластической деформации в ГЦК металлах и твердых растворах	12
1.4. Некоторые исторические сведения об установлении стадий II–IV пластической деформации в поликристаллах	13
1.5. Стадийность пластической деформации в ОЦК металлах и сплавах	15
1.6. Накопление дислокаций, внутренние поля напряжений и эволюция дислокационной структуры	16
1.7. Эволюция субструктуры — основа физики стадийности при скольжении полных дислокаций	22
1.8. Переход к двойникованию и деформационному мартенситному превращению как важный фактор формирования стадийности деформационного упрочнения	25
1.9. Локализация деформации — еще одна причина выделения новых стадий	25
1.10. Факторы, осложняющие картину стадийности деформации в мезополикристаллах	25
1.11. Влияние размера мезозерна на стадийность пластической деформации	28
1.12. Изменение структуры поликристаллического агрегата и картины стадий деформации с уменьшением среднего размера зерна	30
1.13. Основные факторы, определяющие стадийность деформации и величину коэффициента деформационного упрочнения в микрообласти	34
1.14. Проблема определения размера зерна на микроуровне	36
1.15. Идентификация стадий пластической деформации на микроуровне	37
1.16. Зависимость «напряжение σ –деформация ε » для поликристаллов меди с разным размером нанозерен	38
1.17. Закономерности деформационного упрочнения микрополикристаллов меди с разным размером зерна	40
1.18. Механизмы упрочнения и особенности стадийности деформации поликристаллов с нанозерном	43
1.19. Влияние различных механизмов упрочнения на величину напряжения течения и вид зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$	44
1.20. Базовая картина деформационного упрочнения нанополикристаллов	48

1.21. Влияние размера зерна на параметры стадий пластической деформации	50
Список литературы к главе 1	52
Глава 2. Структура и механические свойства нанокристаллов . . .	57
2.1. Введение	57
2.2. Классификация поликристаллов по размерам зерен	58
2.3. Методы получения ультрамелкозернистых и нанозернистых поликристаллических материалов	59
2.4. Структура поликристаллических материалов	60
2.5. Тройные стыки зерен	64
2.6. Модели зерен поликристаллов на мезо- и микроуровне	73
2.7. Структура отдельных нанозерен	80
2.8. Особенности структуры нанополикристаллического агрегата как следствие больших пластических деформаций	82
2.9. Зависимость плотности дислокаций от размера зерна и проблема мелких зерен, не содержащих дислокации	84
2.10. Критические интервалы размеров зерен и их участков	86
2.11. Соотношение Холла–Петча и его параметр σ_0 в широком интервале размеров зерен	88
2.12. Механизмы реализации соотношения Холла–Петча на мезоуровне	90
2.13. Зависимость коэффициента k от размера зерна в соотношении Холла–Петча	92
2.14. Проблема перехода коэффициента k к отрицательному значению. Первый критический размер зерна	97
2.15. Механизмы реализации соотношения Холла–Петча на микроуровне	101
2.16. Механизмы проскальзывания по границам зерен	105
2.17. Число дислокаций в зоне сдвига и напряжение, необходимое для формирования этой зоны	106
2.18. Контактные напряжения. Обычное и аккомодационное скольжение	109
2.19. Структурная классификация нанокристаллов с позиций их деформационного поведения	112
2.20. Заключение	118
Список литературы к главе 2	119
Глава 3. Основные компоненты дислокационной структуры и роль размерного фактора	129
3.1. Проблема классификации компонент дислокационной структуры	129
3.1.1. Компоненты дислокационной структуры (129). 3.1.2. Градиент деформации, плотность геометрически необходимых и избыточных дислокаций (130). 3.1.3. Размер зерна и плотность геометрически необходимых дислокаций (130). 3.1.4. Способы измерения плотности геометрически необходимых дислокаций (131).	
3.2. Скалярная плотность дислокаций в дислокационных фрагментах с различными типами субструктур	134

3.2.1. Зависимость плотности дислокаций от размера зерна в ультрамелкозернистых поликристаллах (135).	
3.2.2. Критические размеры зерен (136).	
3.2.3. Геометрически необходимые и статистически запасенные дислокации, второй и третий критические размеры зерен. Сопоставление параметров микро- и мезоуровней (141).	
3.3. Зависимость скалярной плотности дислокаций от размера фрагментов с сетчатой дислокационной субструктурой в мартенситной стали	145
3.4. Зависимость плотности дислокаций от размера фрагментов с ячеистой дислокационной субструктурой в мартенситной стали	147
3.5. Влияние размера зерен и фрагментов на плотность дефектов в металлических материалах	149
3.5.1. Подобие размерных соотношений в ультрамелкозернистых поликристаллах металлов и сталей с фрагментированной структурой (150).	
3.5.2. Зависимость плотности частичных дисклинаций от размера зерен (154).	
3.5.3. Частицы вторых фаз, дислокации и границы зерен и фрагментов (157).	
3.5.4. Пластическая деформация и наночастицы вторых фаз в микрокристаллических металлах (157).	
3.5.5. Фрагментированная дислокационная субструктура в мартенситных сталях и микрочастицы вторых фаз (158).	
3.5.6. О механизмах формирования частиц вторых фаз по границам элементов микроструктуры (160).	
3.5.7. Стабилизация структуры микрокристаллов частицами вторых фаз (160).	
3.6. Роль геометрически необходимых дислокаций при формировании деформационных субструктур	163
3.7. Накопление геометрически необходимых дислокаций и скалярной плотности дислокаций. Роль границ различного типа	168
3.8. Концентрационная зависимость основных параметров дислокационной структуры в ГЦК твердых растворах	170
3.9. Ячеистая субструктура: плотность дислокаций (ρ_S и ρ_G) и размер ячеек	171
Список литературы к главе 3	173
Глава 4. Дислокационная структура и внутренние поля напряжений	180
4.1. Введение	180
4.2. Методы измерения внутренних напряжений	181
4.3. Структура ультрамелкозернистых металлов и сплавов	185
4.4. Источники внутренних полей напряжений в ультрамелкозернистых материалах	192
4.5. Распределение внутренних напряжений в зернах. Схема зерна ультрамелкозернистых материалов	198
4.6. Заключение	201
Список литературы к главе 4	202
Глава 5. Большие пластические деформации	206
5.1. Введение	206
5.2. Терминология	208

5.3. Структурные модели.	209
5.4. Энергетические принципы механического воздействия на твердое тело.	212
5.5. Низкотемпературная динамическая рекристаллизация	214
5.6. Аморфизация и кристаллизация в процессе МПД	222
5.7. Влияние дробности и направления деформации.	241
5.8. Принцип цикличности при МПД	248
5.9. Заключение	254
Список литературы к главе 5.	255
Глава 6. Влияние ионной имплантации на структурно-фазовые состояния и прочность модифицированных поверхностей металлов.	260
6.1. Введение	260
6.2. Влияние ионного облучения на структуру титановых сплавов	262
6.3. Распределение внедренных элементов по глубине имплантированного слоя титановых сплавов	267
6.4. Влияние ионной имплантации на фазовый состав поверхностных слоев титановых сплавов.	269
6.5. Модификация физико-механических свойств титановых сплавов в условиях ионной имплантации.	282
Список литературы к главе 6.	290
Глава 7. Инженерия границ зерен и сверхпрочность нанокристаллов.	296
Список литературы к главе 7.	302
Заключение	303