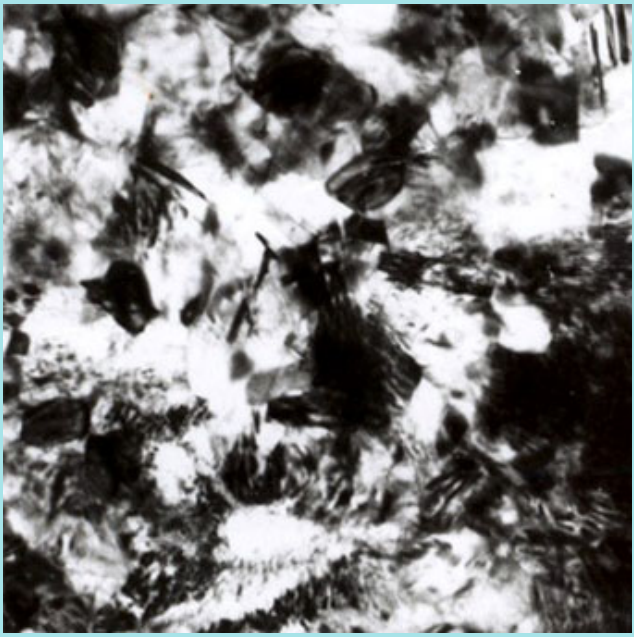
Ф. З. Утяшев
Г. И. Рааб
В. А. Валитов

ДЕФОРМАЦИОННОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Монография



2020

Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб, В. А. Валитов

ДЕФОРМАЦИОННОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Монография

Санкт-Петербург
Наукоемкие технологии
2020

УДК 669.1
ББК 34.2(я7)
У84

Ответственный редактор:
Член-корреспондент РАН *Алымов Михаил Иванович.*
Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН
Рецензенты:
Столяров Владимир Владимирович. Институт машиноведения РАН;
Лутфуллин Рамиль Яватович. Институт проблем сверхпластичности металлов РАН

У84 Утяшев Ф. З., Рааб Г. И., Валитов В. А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 185 с.

ISBN 978-5-6044793-9-1

Представлены теоретические и прикладные основы деформационных технологий получения и обработки конструкционных ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных (НС) металлических материалов с высоким комплексом физико-механических свойств.

На базе современных представлений о строении и пластической деформации металлов рассмотрены механизмы деформации и измельчения зерен. Показана связь между деформированным и структурным состоянием металлов, позволяющая прогнозировать формируемую структуру в УМЗ и НС материалах в зависимости от условий обработки.

Приведены рациональные подходы, схемы и режимы обработки различных металлов и сплавов с использованием разнообразных методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Даны примеры изготовления УМЗ и НС материалов и изделий, в том числе из суперсплавов на основе никеля и железа.

Книга предназначена для инженеров – металловедов и обработчиков металлов давлением, научных работников, разработчиков новых технологий, оборудования и инструмента для получения объемных наноматериалов конструкционного назначения, а также для аспирантов, магистрантов, бакалавров и студентов старших курсов металлургических и машиностроительных специальностей.

УДК 669.1
ББК 34.2(я7)

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, Грант № 18-19-00685

© Утяшев Ф. З., 2020
© Рааб Г. И., 2020
© Валитов В. А., 2020
© Оформление. Издательство «Наукоемкие технологии», 2020

ISBN 978-5-6044793-9-1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных сокращений и обозначений 5
Введение 6

Часть 1. Теоретические основы деформационного наноструктурирования металлов 9

Глава 1.1. Этапы структурообразования и факторы, влияющие на измельчение зерен 9
1.1.1. Масштабные уровни и эволюция микроструктуры металлов при пластической деформации 9
1.1.2. Влияние природы материала и условий деформации на измельчение зерен 20
1.1.3. Термостабильность ультрамелкозернистой структуры 34

Глава 1.2. Деформированное состояние поликристаллического материала при интенсивной пластической деформации 38
1.2.1. Скалярные и векторные характеристики деформации и их роль при интенсивной пластической деформации 38
1.2.2. Новый подход определения компонент накопленной деформации в материалах при интенсивной пластической деформации 50

Глава 1.3. Модель наноструктурирования металлов при интенсивной пластической деформации 61
1.3.1. Основные положения и допущения модели 62
1.3.2. Кинетика фрагментации структуры и механизмов деформации 68
1.3.3. Связь между параметрами структуры и деформации 74
1.3.4. Верификация модели 84

Резюме по 1 части 86
Список литературы к части 1 89

Часть 2. Методы получения ультрамелкозернистых и наноструктурированных материалов и изделий 94

Глава 2.1. Формирование мелких зерен как релаксационный процесс ... 95
2.1.1. Внутренний и внешний каналы релаксации напряжений при пластической деформации 95
2.1.2. Характер деформации и энергозатрат 97

Глава 2.2. Современные методы деформационного наноструктурирования 101
2.2.1. Лабораторные методы 101
2.2.2. Опытно промышленные методы 116
2.2.3. Комбинированные и совмещенные методы для получения длинномерных УМЗ полуфабрикатов 120

Глава 2.3. Ультрамелкозернистые и наноструктурированные изделия из металлов и сплавов 124
2.3.1. Продукция из титана и его сплавов 124
2.3.2. Огнестойкие строительные стали 130
2.3.3. Стальной крепеж 137
2.3.4. Метизы из алюминиевых сплавов 138
2.3.5. Алюминиевые электропровода 141
2.3.6. Медные электропровода 142
2.3.7. Детали газотурбинных двигателей из суперсплавов 145

Глава 2.4. Особенности наноструктурирования никелевых суперсплавов 148
2.4.1. Формирование нанокристаллической структуры кручением под давлением 149
2.4.2. Дробная деформационно-термическая обработка 159

Резюме по 2 части 174
Список литературы к части 2 175

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВГД – высокое гидростатическое давление;
ВДС – внутризеренное дислокационное скольжение;
ГПУ – гексагональная плотноупакованная (решетка);
ГЦК – гранецентрированная (решетка);
ГЗ – границы зерен;
ДП – диффузионная ползучесть;
ИПД – интенсивная пластическая деформация;
ЗГД – зернограничные дислокации;
ЗГП – зернограничное проскальзывание;
КД – кручение под давлением;
КГД – квазигидростатическое давление;
КЗГП – кооперативное зернограничное проскальзывание;
МК – микрокристаллическая (структура);
НК – нанокристаллическая (структура);
НС – наноструктура;
РД – решеточные дислокации;
РКУ – равноканальное угловое;
РКУП – равноканальное угловое прессование;
СМК – субмикрокристаллическая структура;
СПД – сверхпластическая деформация;
СП – сверхпластичность;
УМЗ – ультрамелкозернистая (структура);
ε (e) –истинная степень деформации;
$\dot{\varepsilon}$, (ξ) – скорость деформации;
T – температура;
p – давление;
σ – напряжение;
$\sigma_т$ – напряжение течения;
ρ – скалярная плотность дислокаций;
ρ' – зарядовая плотность дислокаций;
β – тензорная плотность дислокаций;
A – площадь поверхности;
$\hat{\alpha}, \alpha_{ij}$ – тензор дисторсии;
$\hat{e}, \hat{\varepsilon}, e_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – тензор деформации;
$\hat{\omega}$ – тензор поворота;
ω – угол поворота;
$\dot{\omega}$ – угловая скорость;
$\boldsymbol{V}, \vec{v}$ – собственные вектора;
d – средний размер зерен;
d_f – средний размер фрагмента (области разориентации);
t – время;
R_B – радиус-вектор;
θ – угол разориентировки границ;
b – вектор Бюргерса.

Посвящается памяти профессора
КАЙБЫШЕВА ОСКАРА АКРАМОВИЧА

ВВЕДЕНИЕ

Высокие эксплуатационные и технологические свойства металлических материалов, во многих случаях, достигаются путем формирования в них ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры. Первоначально повышенное внимание исследователей к УМЗ структуре возникло в первой половине прошлого столетия после открытия эффекта сверхпластичности металлов [1]. Позднее было установлено, что этот эффект присущ практически всем поликристаллическим материалам со средним размером зерен, обычно не превышающим 10 мкм [2, 3]. Для формирования такой УМЗ структуры в металлических материалах чаще всего использовали процесс горячей деформации.

Относительно недавно особый интерес возник к предельно малому диапазону УМЗ структуры – нанокристаллическому. Для получения таких структур стали применять методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [4][1], осуществляемые при температурах значительно ниже температуры динамической рекристаллизации, сопровождающей процесс горячей деформации. Методы ИПД позволили получать в металлах и сплавах нанокристаллическую (НК) структуру, обеспечивающую низкотемпературную сверхпластичность, упрощающую её технологическое применение. Однако более существенным оказалось то, что НК материалы показали ряд рекордно высоких физико-механических свойств, которые до недавнего времени считали структурнонезависимыми [5].

Вместе с тем, методы получения материалов с УМЗ и, особенно, с НК структурой, как в прошлом, так и настоящее время отличаются высокой трудоемкостью и низкой производительностью. Поэтому для их совершенствования важно понимание процесса формирования ультрамелких зерен при пластической деформации. В настоящее время известен ряд научных представлений и соответствующих моделей [6–9], посвященных этому вопросу. В них формирование ультрамелких зерен описывают на микро- или на макроуровне. В первом случае полагают, что измельчение происходит вследствие прохождения, так называемой, «низкотемпературной» динамической рекристаллизации и/или в результате фазовых превращений [6, 7]. Во втором случае, измельчение не зависит от кристаллической структуры заготовки, а является результатом континуальных сдвигов в заготовке в направлении детерминированных схемой простого сдвига касательных

[1] На Западе эти методы получили название severe plastic defomation (SPD).

напряжений [8]. Необходимо отметить, что безупречных доказательств осуществления процессов, соответствующих отмеченным представлениям в указанных работах и других работах, развивающих эти представления, не приводятся.

Известны исследования [9, 10], в которых изучено влияние ротационных мод при больших монотонных деформациях на структурообразование. Показана роль этих мод в формировании мелких фрагментов в виде микрополос с ячейками внутри. В поперечном направлении такие полосы приобретают размеры порядка 0,1 мкм, а их границы, преимущественно, малоугловые ≤ 10–15°. В результате механические свойства материалов с такой структурой повышаются, но заметно уступают, тем же материалом, подвергнутым ИПД, поскольку немонотонный характер ИПД позволяет накапливать большие деформации и приводит к формированию не полосовой структуры, а структуру с мелкими равноосными зеренами, отличающиеся большеугловыми – 40÷60° разориентировками границ произвольного типа.

Необходимо отметить, что на мезоуровне большое внимание деформационному наноструктурированию уделяется в исследованиях Томской школы металлофизиков [11, 12]. В них важно значение уделяется кривизне и кручению, которые приобретает кристаллическая решетка металлических материалов при деформации, и построению физических моделей наноструктурообразования.

В целом вышеперечисленные работы рассматривают различные факторы, которые, по мнению их авторов, играют ключевую роль в формировании УМЗ структур. Однако основной недостаток этих работ заключается в том, что они описывают механизм измельчения зерен без учета связи между макро- и микроуровнями процесса деформации и структурными изменениями. Поэтому непосредственно использовать построенные на этих представления модели при разработке технологических процессов ИПД затруднительно.

Актуальна многоуровневая модель деформационного измельчения, позволяющая по заданным технологическим параметрам обработки, спрогнозировать основные характеристики наноструктуры в металлических материалах.

В этой связи первая часть книги посвящена теоретическим аспектам деформационного наноструктурирования материалов и описанию многоуровневой модели деформационного измельчения микроструктуры. Материал этой части базируется на ряде публикаций авторов, в которых представлен широкий спектр исследований, посвященных формированию УМЗ структуры в металлах и сплавах. В частности, в монографии [10] внимание читателя впервые было сфокусировано на ключевой особенности ИПД – немонотонном деформировании, вследствие которого формируется не полосовая, а равноосная нанозеренная структура. В последующей работе [13]

впервые изложены систематические представления о структурообразовании, связывающие макро- и микроуровни деформации и структуры при ИПД, и рассмотрены модельные представления, позволяющие определять размеры зерен в зависимости от степени накопленной сдвиговой деформации и масштабного фактора – размеров заготовки. Дальнейшее развитие этой модели, и методов получения УМЗ и НК материалов с учетом деформационного разогрева, описано в монографии [14].

В предлагаемой вниманию читателя монографии приведено обобщение модели деформационного измельчения. Показана необходимость учета не только величины, но распределения в объеме образца составляющих накопленной деформации. Особое внимание уделено ротационной составляющей деформации. Установлено, что ротационные повороты влияют на распределение сдвиговой составляющей и, следовательно, косвенно на размеры получаемых зерен. Однако непосредственная роль ротационной составляющей заключается в том, что её величина определяет вид формирующихся в кристаллической решетке областей разориентации и угловые разориентировки их границ. При монотонной деформации из-за небольших величин знакопеременных поворотов формируются микрополосы, а при немонотонной деформации – равноосные субмикро- или нанозерна. Показан новый метод оценки указанных составляющих деформации и пример их расчета для одного из наиболее распространенных методов ИПД – РКУ прессования. Практическое значение модели, рассмотренной в данной монографии, заключается в возможности прогнозировать параметры НК структуры и на этой основе совершенствовать методы ИПД.

Во второй части монографии рассмотрены наиболее широко используемые методы ИПД, а также их комбинации, обеспечивающие активное немонотонное деформирование и интенсивное нарастание величины накопленной деформации за ограниченное число проходов и переходов. В качестве конкретных материалов в работе рассмотрен широкий круг металлов и сплавов, включая малопластичные и труднообрабатываемые материалы.

Теоретические и прикладные основы деформационного измельчения зерен, изложенные в книге, базируются как на классических представлениях о процессах деформации и структурообразования, так и на результатах недавних исследований [10, 13–16]. Во многом, эти исследования проводились в рамках государственных заданий Министерства образования и Науки РФ, порученных федеральным учреждениям г. Уфы: ИПСМ РАН и УГАТУ. Кроме того, часть работ, в частности, по исследованию деформационного наноструктурирования суперсплавов, а также подготовка к изданию монографии выполнено при поддержке гранта РНФ № 18-19-00685.

Научное издание

Утяшев Фарид Зайнуллаевич
Рааб Георгий Иосифович
Валитов Венер Анварович

Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов

Монография

Издательство «Наукоемкие технологии»
ООО «Корпорация «Интел Групп»
http://publishing.intelgr.com
E-mail: publishing@intelgr.com
Тел.: +7 (812) 945–50–63

Подписано в печать 19.11.2020.
Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Объем 11,56 печ.л. Тираж 50 экз.

ISBN 978-5-6044793-9-1