

Ф. З. УТЯШЕВ,  
Г. И. РААБ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ  
И НАНОСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ**



«Инфра-Инженерия»

Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ  
И НАНОСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕМНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Монография*

Москва    Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 621.7  
ББК 34.62  
У84

**Рецензенты:**

*Столяров Владимир Владимирович* (Институт машиноведения РАН);  
*Лутфуллин Рамиль Яватович* (Институт проблем сверхпластичности металлов РАН)

**Ответственный редактор:**

член-корреспондент РАН *Алымов Михаил Иванович*  
(Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН)

**Утяшев, Ф. З.**

**У84** Научные основы деформационных технологий формирования ультрамелкозернистых и наноструктурных объемных материалов : монография / Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб ; [отв. ред. М. И. Алымов]. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 160 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0632-1

Представлены теоретические и прикладные основы деформационных технологий обработки конструкционных ультрамелкозернистых и наноструктурных металлических материалов с особым комплексом физико-механических свойств. Рассмотрены механизмы деформации и измельчения зерен. Приведены схемы и режимы обработки различных металлов и сплавов с использованием методов интенсивной пластической деформации.

Для инженеров-металловедов, научных работников, а также студентов и аспирантов металлургических и машиностроительных специальностей.

УДК 621.7  
ББК 34.62

ISBN 978-5-9729-0632-1

© Ф. З. Утяшев, Г. И. Рааб, 2021  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
<b>ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>8</b>
Глава 1.1. Этапы структурообразования и факторы, влияющие на измельчение зерен .....	8
1.1.1. Масштабные уровни и эволюция микроструктуры при пластической деформации .....	8
1.1.2. Влияние природы материала и условий деформации на измельчение зерен .....	19
1.1.3. Термостабильность ультрамелкозернистой структуры .....	23
Глава 1.2. Деформированное состояние материалов при интенсивной пластической деформации (ИПД) .....	37
1.2.1. Скалярные и векторные характеристики деформации .....	37
1.2.2. Новый подход определения компонент накопленной деформации в материалах при ИПД.....	49
Глава 1.3. Модель наноструктурирования металлов при интенсивной пластической деформации.....	60
1.3.1. Основные положения и допущения модели.....	61
1.3.2. Кинетика фрагментации структуры и механизмов деформации .....	67
1.3.3. Связь между параметрами структуры и деформации заготовки .....	72
1.3.4. Верификация модели .....	82
Резюме по части 1 .....	84
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ЧАСТИ 1 .....	 88
 <b>ЧАСТЬ 2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	 <b>93</b>
Глава 2.1. Формирование УМЗ структуры как релаксационный процесс.....	94
2.1.1. Внутренний и внешний каналы релаксации напряжений при пластической деформации .....	94
2.1.2. Характер деформации и энергозатрат .....	96

Глава 2.2. Современные методы деформационного наноструктурирования .....	100
2.2.1. Лабораторные методы .....	100
2.2.2. Опытные-промышленные методы получения прутков .....	115
2.2.3. Комбинированные и совмещенные методы деформирования .....	119
Глава 2.3. Ультрамелкозернистые и наноструктурированные изделия .....	123
2.3.1. Изделия из титана и его сплавов .....	123
2.3.2. Огнестойкие стали .....	129
2.3.3. УМЗ стальной крепеж .....	135
2.3.4. Метизы из алюминиевых сплавов .....	137
2.3.5. Алюминиевые электропровода .....	138
2.3.6. Медные электропровода .....	139
2.3.7. Детали из суперсплавов .....	144
Резюме по части 2 .....	146
 СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	 148
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ЧАСТИ 2 .....	 150