

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ  
СЛИТКОВЫХ, ПОРОШКОВЫХ,  
НАНОСТРУКТУРНЫХ  
И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

---



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.7  
ББК 34.5  
М74

*А в т о р ы :*

*М. Х. Шоршоров, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева,  
Е. М. Селедкин, Д. С. Клементьев, А. А. Калинин*

**М74 Моделирование процессов ресурсосберегающей обработки слитковых, порошковых, наноструктурных и композиционных материалов :** монография / [М. Х. Шоршоров и др.] – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 360 с.  
ISBN 978-5-9729-0596-6

Приведены результаты математического моделирования механических свойств и структуры высоколегированных слитковых, порошковых металлических систем и инструментальных сталей в процессах изотермического деформирования и сверхпластического формоизменения. Рассмотрены процессы осадки объемных и листовых тонкослойных металлических заготовок, механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, наноструктурные и композиционные материалы различной природы. Обсуждаются ультрадисперсные порошковые и компактные нанокристаллические, наноаморфные и микрокристаллические металлические сплавы и соединения, структурное состояние, технологии производства и области применения. Представлены результаты количественных оценок процессов зародышеобразования и образования точечных дефектов кристаллического строения некоторых металлических систем в различных условиях и состояниях.

Для научных работников и инженеров в области материаловедения, физики металлов, технологии машиностроения. Может быть полезно студентам соответствующих специальностей и преподавателям при подготовке специалистов различных уровней.

УДК 621.7  
ББК 34.5

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
РАЗДЕЛ 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	10
1.1. Материалы для моделирования механических свойств.....	10
1.1.1. Состав, структура и физико-механические свойства сталей .....	12
1.1.2. Температурные интервалы фазовых превращений.....	14
1.2. Математическое моделирование механических свойств.....	20
1.2.1. Факторы, влияющие на механические свойства .....	21
1.2.2. Критерии и параметры деформирования .....	22
1.2.3. Математические модели .....	25
1.2.4. Методика планирования эксперимента .....	27
1.2.5. Статистическая обработка результатов.....	28
1.3. Механические испытания .....	29
1.3.1. Экспериментальное оборудование .....	29
1.3.2. Образцы .....	33
РАЗДЕЛ 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ.....	35
2.1. Оптимальное планирование экспериментов .....	35
2.2. Моделирование механических свойств при растяжении в температурно- механических полях.....	35
2.2.1. Построение математических моделей механических свойств.....	35
2.2.2. Закономерности изменения механических свойств в температурно- скоростных полях .....	40
РАЗДЕЛ 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФАЗОВОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ У8А.....	58
3.1. Сверхпластичность стали У8А при растяжении .....	58
3.2. Сверхпластичность стали У8А при осадке .....	63
Библиографический список к разделам 1, 2, 3.....	66

РАЗДЕЛ 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСАДКИ ОБЪЕМНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ И ЛИСТОВЫХ ТОНКОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК .....	73
4.1. Моделирование технологических процессов объемного осесимметричного деформирования.....	73
4.1.1. Математическая формулировка задач объемного осесимметричного формоизменения .....	73
4.1.2. Применение метода конечных элементов при вычислении деформированного состояния в задачах объемного осесимметричного формоизменения .....	77
4.1.3. Расчет напряжений по кинематике течения в задачах объемного осесимметричного формоизменения .....	89
4.1.4. Численная реализация и особенности построения конечноэлементной модели при решении технологической задачи осадки сплошной цилиндрической заготовки .....	95
4.1.5. Осадка сплошных цилиндрических заготовок в состоянии сверхпластичности.....	101
4.2. Осаживание тонкослойных заготовок .....	105
4.2.1. Конечноэлементная модель пластического сжатия тонкослойной заготовки между шероховатыми плитами .....	105
4.2.2. Осадка квадратной в плане заготовки .....	110
4.2.3. Осадка листовых анизотропных заготовок .....	120
4.2.4. Осаживание квадратной листовой заготовки в круглой матрице .....	126
Библиографический список к разделу 4 .....	135
РАЗДЕЛ 5. МЕХАНИЗМЫ ВОДОРОДНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....	138
5.1. Общие сведения о водородном растрескивании металлических материалов .....	138
5.2. Анализ современных теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания конструкционных металлических материалов	140

5.2.1. Теории внутреннего давления .....	140
5.2.2. Адсорбционные теории .....	142
5.2.3. Метановая гипотеза .....	144
5.2.4. Модели, основанные на гидридном охрупчивании .....	146
5.2.5. Декогезионные теории .....	148
5.2.6. Теория влияния водорода на подвижность дислокаций .....	154
5.2.7. Комплексные подходы .....	160
5.3. Основные выводы .....	164
Библиографический список к разделу 5 .....	164
<b>РАЗДЕЛ 6. НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ .....</b>	<b>174</b>
6.1. Порошковые металлические сплавы с наноаморфной, нанокристаллической и микрокристаллической структурами .....	175
6.2. Ультрадисперсные порошковые материалы .....	177
6.3. Прессование и спекание ультродисперсных материалов .....	179
6.4. Структурное состояние частиц ультрадисперсного размера и его влияние на физические и механические свойства массивных нанокристаллических материалов .....	182
6.5. Кластеры в деформированных металлах и их влияние на структурообразование и сверхпластичность .....	192
Библиографический список к разделу 6 .....	203
<b>РАЗДЕЛ 7. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>206</b>
7.1. Композиционные материалы .....	206
7.1.1. Общие сведения о композиционных материалах .....	206
7.1.2. Свойства, состав и классификация пластмасс .....	208
7.1.3. Характеристика и марки термопластов .....	211
7.2. Термореактивные пластмассы .....	217
7.2.1. Характеристика и марки реактопластов .....	217
7.2.2. Слоистые пластмассы .....	221

7.3. Неметаллические материалы .....	226
7.3.1. Резинотехнические материалы (РТМ) .....	226
7.3.2. Керамические материалы .....	229
Библиографический список к разделу 7 .....	234
<b>РАЗДЕЛ 8. НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И</b>	
<b>НАНОТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>237</b>
8.1. История развития .....	237
8.2. Структура наноматериалов .....	242
8.3. Классификация наноматериалов .....	243
8.4. Методы получения наноматериалов .....	245
8.5. Свойства наноматериалов .....	246
8.6. Сверхпластичность наноматериалов .....	248
8.7. Применения наноструктурных материалов .....	250
8.8. Композиционные покрытия триботехнического назначения с полимерными матрицами и наполнителями из наночастиц твёрдых смазочных материалов .....	261
Библиографический список к разделу 8 .....	275
<b>РАЗДЕЛ 9. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ</b>	
<b>ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В ЧИСТЫХ МЕТАЛЛАХ .....</b>	<b>277</b>
9.1. Оценка вклада в аномальное изменение теплоемкости титана вблизи температуры $\alpha \rightarrow \beta$ полиморфного превращения зародышей новой фазы .....	280
9.2. Оценка вклада в аномальное изменение теплоемкости таллия вблизи температуры $\alpha \rightarrow \beta$ полиморфного превращения зародышей новой фазы .....	291
9.3. Оценка вклада в аномальное изменение теплоемкости гафния вблизи температуры $\alpha \rightarrow \beta$ полиморфного превращения зародышей новой фазы .....	294
9.4. Сравнительные оценки параметров процесса зародышеобразования для титана, таллия и гафния .....	298
Библиографический список к разделу 9 .....	299

РАЗДЕЛ 10. ОСОБЕННОСТИ АКТИВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В СОСТОЯНИИ ПРЕДПРЕВРАЩЕНИЙ 301

Библиографический список к разделу 10 .....	315
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	317
Список литературы.....	317