

В.Н. Чувильдеев, Ю.В. Левинский, Е.В. Вершинина

# **Основы теории спекания металлических порошков**

**Учебник предназначен для студентов  
образовательных организаций высшего образования,  
обучающихся по направлениям подготовки  
«Материаловедение и технологии материалов»  
и «Металлургия»**

Москва  
Научный мир  
2020

УДК 621.762  
ББК 34.3  
Ч 82

Рецензенты:

профессор, доктор химических наук Г.М. Вольдман,  
профессор, доктор технических наук В.С. Панов

**Чувильдеев В.Н., Левинский Ю.В., Вершинина Е.В.**  
**ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ.** – М.:  
Научный мир, 2020. – 306 с.: ил.

ISBN 978-5-91522-495-6

В учебном пособии приведены систематизированные сведения об особенностях дисперсного состояния материала в целом и металлических порошках в частности. Основная часть книги посвящена описанию явлений, происходящих при нагреве порошка, и перехода его из сыпучего в компактное состояние. Физика явлений консолидации достаточно сложна, поэтому во всех случаях, где это возможно, авторы использовали следующий подход: вычленение из сложных явлений главной составляющей, создание ее простейшей модели, разработка модели реальных процессов путем последовательных усложнений первичной упрощенной модели. В пособии описаны физические и математические модели припекания порошинок, поведение пористого скелета и пор в компактном теле, термодинамика и кинетика процессов спекания металлических порошков, влияние внешних параметров и условий спекания на структуру спеченных тел. При изложении материала использованы последние достижения теории в этой области, в том числе и работы самих авторов.

*Рекомендовано к печати Ученым советом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института структурной макрокинетике и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова Российской академии наук.*

ISBN 978-5-91522-495-6

© Чувильдеев В.Н., Левинский Ю.В.,  
Вершинина Е.В., 2020  
© Издательство «Научный мир», 2020

## Оглавление

Предисловие.....	9
Введение.....	12
Литература (предисловие, введение).....	23
<b>Глава 1. Микромеханизмы спекания в однокомпонентных системах .....</b>	<b>24</b>
1.1. Возможные механизмы припекания твердых тел, контактирующих в «точке» .....	24
1.2. Геометрия контактной области.....	26
1.3. Припекание по механизму вязкого течения.....	29
1.4. Припекание по механизмам объемной и граничной самодиффузии вакансий.....	33
1.5. Припекание по механизму поверхностной диффузии .....	38
1.6. Припекание по механизму переноса через газовую фазу .....	41
1.7. Припекание при наличии прижимающего усилия.....	44
1.8. Поворот крупинки в процессе припекания.....	46
1.9. Взаимное припекание частиц произвольной формы .....	48
1.10. Эффект размера частиц. Диаграммы Эшби .....	50
1.11. Пороговые механизмы припекания частиц.....	54
1.12. Контактные явления в группе частиц .....	59
Контрольные вопросы.....	61
Задания для самостоятельных исследований .....	62
Литература к главе 1 .....	63
<b>Глава 2. Микромеханизмы спекания в многокомпонентных системах .....</b>	<b>65</b>
2.1. Припекание взаимно нерастворимых тел .....	66
2.2. Взаимная диффузия. Эффекты Киркендалла и Френкеля ....	69

2.3. Припекание взаимно растворимых тел .....	73
2.4. Взаимное припекание твердых растворов.....	76
2.5. Припекание с участием жидкой фазы.....	78
2.6. Роль газовой фазы в припекании частиц разных металлов.....	87
Контрольные вопросы.....	89
Задания для самостоятельных исследований .....	90
Литература к главе 2.....	91
<b>Глава 3. Образование и уплотнение сплошного каркаса .....</b>	<b>92</b>
3.1. Моделирование спекания ансамбля порошинок.....	92
3.2. Реологическое описание спекания .....	96
3.3. Феноменология спекания.....	98
3.4. Активированное спекание .....	102
Контрольные вопросы.....	106
Задания для самостоятельных исследований .....	106
Литература к главе 3.....	107
<b>Глава 4. Поведение изолированной поры .....</b>	<b>108</b>
4.1. Залечивание изолированной поры путем диффузии вакансий.....	110
4.2 Залечивание изолированной поры путем вязкого течения .....	111
4.3. Сопоставление действия механизмов объемной диффузии вакансий и вязкого течения при залечивании изолированной поры.....	112
4.4. Роль газа в залечивании изолированной поры.....	113
4.4.1. Кинетика изменения размеров заполненной газом поры при вязком течении (общий случай) .....	114
4.4.2. Кинетика изменения размеров заполненной газом поры по механизму объемной диффузии вакансий (общий случай).....	119
4.4.3. Поведение поры, содержащей газ, при постоянном давлении .....	123
4.4.4. Поведение поры, заполненной постоянным количеством газа .....	124
4.4.5. Поведение пор при медленной и быстрой диффузиях газа в твердом теле .....	129
4.5. Перемещение поры как целого.....	132

4.6. Преобразование формы поры.....	137
4.7. Пороговые механизмы залечивания поры.....	140
4.7.1. Феноменологическое описание залечивания поры под действием внешнего давления.....	141
4.7.2. Дислокационный механизм залечивания поры.....	143
4.7.3. Кинетика дислокационного залечивания поры .....	146
Контрольные вопросы.....	148
Задания для самостоятельных исследований .....	149
Литература к главе 4.....	150
<b>Глава 5. Эволюция ансамбля пор.....</b>	<b>151</b>
5.1. Ансамбль пор в квазивязкой сплошной среде.....	152
5.2. Коалесценция пор в ансамбле.....	157
5.3. Коалесценция пор при наличии стоков вакансий.....	162
Контрольные вопросы.....	166
Задания для самостоятельных исследований .....	167
Литература к главе 5.....	167
<b>Глава 6. Микромеханизмы спекания двухкомпонентных систем.....</b>	<b>169</b>
6.1. Концентрационная зависимость линейной усадки двухкомпонентных порошковых смесей.....	170
6.2. Увеличение пористости при спекании смеси порошков взаимно растворимых металлов .....	175
6.3. Спекание в присутствии жидкой фазы .....	180
6.3.1 Связь спекания с участием жидкой фазы с диаграммами состояния.....	181
6.3.2. Кинетика спекания с участием жидкой фазы .....	191
6.3.3. Явления фрагментации и аккомодации при спекании в присутствии жидкой фазы.....	197
6.3.4. Инфильтрация как метод жидкофазного спекания.....	199
Контрольные вопросы.....	215
Задания для самостоятельных исследований .....	217
Литература к главе 6.....	218
<b>Глава 7. Спекание при одновременном действии температуры и давления .....</b>	<b>219</b>
Контрольные вопросы.....	227
Литература к главе 7.....	228

---

<b>Глава 8. Неизотермическое спекание.....</b>	<b>229</b>
Контрольные вопросы.....	243
Задания для самостоятельных исследований .....	243
Литература к главе 8.....	244
<b>Глава 9. Особенности спекания металлических нанопорошков .....</b>	<b>245</b>
9.1 Предварительная стадия спекания.....	246
9.2. Первая стадия спекания.....	251
9.3. Вторая стадия спекания.....	256
9.4. Третья стадия спекания .....	260
9.5. Неизотермическое спекание нанопорошков .....	265
Контрольные вопросы.....	270
Задания для самостоятельных исследований .....	271
Литература к главе 9.....	271
<b>Приложение. Основные свойства порошковых материалов микро и наноразмеров Современные методы исследования.....</b>	<b>273</b>