

Ю.В. Левинский  
М.П. Лебедев

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ  
ПРОЦЕССОВ  
СПЕКАНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ  
ПОРОШКОВ



**Ю.В. Левинский, М.П. Лебедев**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Металлургия»

Москва  
Научный мир  
2014

УДК 621.762

ББК 34.3

Л34

Рецензенты:

доктор химических наук, профессор *Д.В. Дробот*  
доктор химических наук, профессор *Г.М. Вольдман*

**Левинский Ю.В., Лебедев М.П.**

**Л34 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ.** – М.: Научный мир, 2014. – 372 с.: илл.

ISBN 978-5-91522-388-1

В учебном пособии приведены систематизированные сведения об особенностях дисперсного состояния, в целом, и представителей этого состояния – металлических порошках, в частности. Описаны свойства порошков и методы их измерения. Основная часть пособия посвящена описанию явлений, происходящих при нагреве порошка и превращении его из сыпучего в компактное тело. Физика этих явлений достаточно сложна. Во всех случаях, где это возможно, авторы пособия старались показать студентам, как можно из сложных явлений вычленить главную составляющую и составить простейшую ее модель, а затем путем последовательных усложнений перейти к описанию реальных процессов. В пособии описаны физические и математические модели припекания порошинок, поведение пористого скелета и замкнутых в компактном теле пор. Описаны 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.

*Учебное пособие рекомендовано Ученым Советом автодорожного факультета Федерального государственного автономного учреждения высшего профессионального образования Северо-восточного федерального университета им. М.К. Амосова и Ученым Советом факультета «Химии и технологии редких элементов и материалов электронной техники» Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московского государственного университета тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова.*

ISBN 978-5-91522-388-1

© Левинский Ю.В., Лебедев М.П., 2014

© Научный мир, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	9
Введение .....	12
Литература (предисловие, введение) .....	24
<b>Глава 1. Особенности дисперсного состояния вещества ....</b>	<b>26</b>
1.1. Условия равновесия фаз с криволинейной поверхностью .....	28
1.2. Дисперсность металлических порошков .....	32
1.3. Реакционная способность дисперсных систем .....	38
1.4. Токсичность порошков .....	51
1.5. Физические свойства .....	53
1.5.1. Форма и структура частиц .....	53
1.5.2. Размер частиц и гранулометрический состав порошка .....	55
1.5.3. Удельная поверхность порошка .....	64
1.5.4. Плотность частиц .....	72
1.5.5. Температура плавления .....	74
1.5.6. Микротвердость частиц и наноиндентирование .....	77
1.6. Технологические свойства .....	81
1.6.1. Насыпная плотность и плотность утряски .....	81
1.6.2. Текучесть порошка .....	85
1.6.3. Уплотняемость, прессуемость, формуемость .....	86
Контрольные вопросы .....	90
Литература (к гл. 1) .....	90

<b>Глава 2. Припекание частиц</b> .....	92
2.1. Возможные механизмы припекания твердых тел, контактирующих в «точке» .....	92
2.2. Геометрия контактной области .....	94
2.3. Припекание по механизму вязкого течения .....	98
2.4. Припекание по механизмам объемной и граничной самодиффузии вакансий .....	102
2.5. Припекание по механизму поверхностной диффузии .....	107
2.6. Припекание по механизму переноса через газовую фазу .....	111
2.7. Припекание при наличии прижимающего усилия .....	114
2.8. Поворот крупинок в процессе припекания .....	117
2.9. Взаимное припекание частиц произвольной формы .....	118
2.10. Эффект размера частиц. Диаграммы Эшби .....	121
2.11. Пороговые механизмы припекания частиц .....	125
2.12. Контактные явления в группе частиц .....	131
Контрольные вопросы .....	134
Литература (к гл. 2) .....	135
<b>Глава 3. Припекание двух- и многокомпонентных частиц</b> .....	136
3.1. Припекание взаимно нерастворимых тел .....	137
3.2. Взаимная диффузия. Эффекты Киркендалла и Френкеля .....	140
3.3. Припекание взаимно растворимых тел .....	145
3.4. Взаимное припекание твердых растворов .....	148
3.5. Припекание с участием жидкой фазы .....	151
3.6. Роль газовой фазы в припекании частиц разных металлов .....	161
Контрольные вопросы .....	163
Литература (к гл. 3) .....	164

<b>Глава 4. Образование и уплотнение сплошного скелета ....</b>	<b>165</b>
4.1. Моделирование спекания ансамбля порошинок .....	165
4.2. Реологическое описание спекания .....	170
4.3. Феноменология спекания .....	172
4.4. Активированное спекание .....	176
Контрольные вопросы .....	181
Литература (к гл. 4) .....	181
<b>Глава 5. Поведение изолированной поры в твердом теле .....</b>	<b>183</b>
5.1. Залечивание изолированной поры путем диффузии вакансий .....	185
5.2. Залечивание изолированной поры путем вязкого течения .....	186
5.3. Сопоставление действия механизмов объемной диффузии вакансий и вязкого течения при залечивании изолированной поры .....	187
5.4. Роль газа в залечивании изолированной поры ...	188
5.4.1. Кинетика изменения размеров заполненной газом поры при вязком течении (общий случай) .....	190
5.4.2. Кинетика изменения размеров заполненной газом поры по механизму объемной диффузии вакансий (общий случай) .....	195
5.4.3. Поведение поры, содержащей газ при постоянном давлении .....	199
5.4.4. Поведение поры, заполненной постоянным количеством газа .....	200
5.4.5. Поведение пор при медленной и быстрой диффузиях газа в твердом теле .....	206
5.4.6. Поведение пор в полубесконечном теле и теле конечных размеров .....	210

5.5. Перемещение поры как целого .....	217
5.6. Преобразование формы поры .....	223
5.7. Пороговые механизмы залечивания поры .....	227
5.7.1. Феноменологическое описание залечивания поры под действием внешнего давления .....	228
5.7.2. Дислокационный механизм залечивания поры .....	230
5.7.3. Кинетика дислокационного залечивания поры .....	233
Контрольные вопросы .....	236
Литература (к гл. 5) .....	237
<b>Глава 6. Ансамбль пор в кристаллическом теле .....</b>	<b>238</b>
6.1. Ансамбль пор в квазивязкой сплошной среде ....	239
6.2. Коалесценция пор в ансамбле .....	245
6.3. Коалесценция пор при наличии стоков вакансий .....	251
Контрольные вопросы .....	256
Литература (к гл. 6) .....	257
<b>Глава 7. Спекание двухкомпонентных систем .....</b>	<b>258</b>
7.1. Концентрационная зависимость линейной усадки двухкомпонентных порошковых смесей .....	259
7.2. Увеличение пористости при спекании смеси порошков взаимно растворимых металлов .....	265
7.3. Спекание в присутствии жидкой фазы .....	271
7.3.1. Связь спекания с участием жидкой фазы с диаграммами состояния .....	272
7.3.2. Кинетика спекания с участием жидкой фазы .....	283
7.3.3. Явления фрагментации и аккомодации при спекании в присутствии жидкой фазы .....	289

---

7.3.4. Инфильтрация как метод жидкофазного спекания .....	291
Контрольные вопросы .....	310
Литература (к гл. 7) .....	311
<b>Глава 8. Спекание при одновременном действии температуры и давления .....</b>	<b>313</b>
Контрольные вопросы .....	322
Литература (к гл. 8) .....	323
<b>Глава 9. Неизотермическое спекание .....</b>	<b>324</b>
Контрольные вопросы .....	340
Литература (к гл. 9) .....	340
<b>Глава 10. Особенности спекания металлических нанопорошков .....</b>	<b>342</b>
10.1 Предварительная стадия спекания .....	343
10.2. Первая стадия спекания .....	349
10.3. Вторая стадия спекания .....	354
10.4. Третья стадия спекания .....	359
10.5. Неизотермическое спекание нанопорошков ...	365
Контрольные вопросы .....	370
Литература (к гл. 10) .....	371