

Н. А. Макаров, Д. В. Харитонов, Д. О. Лемешев

# ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ СПЕКАНИЯ

**Н. А. Макаров, Д. В. Харитонов, Д. О. Лемешев**

## **ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ СПЕКАНИЯ**

*Допущено федеральным учебно-методическим объединением по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 18.00.00 «Химические технологии» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Химическая технология»*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2024

УДК 541.1  
ББК 24.5+35.41  
М15

Рецензенты:

доктор химических наук, декан факультета естественных наук  
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет  
имени Д. И. Менделеева» *В. В. Щербаков*;  
кандидат технических наук, профессор кафедры стекла и керамики  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
*Э. П. Сысоев*

**Макаров, Н. А.**

**М15** Физическая химия спекания : учебное пособие / Н. А. Макаров,  
Д. В. Харитонов, Д. О. Лемешев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия,  
2024. – 184 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-1732-7

Изложены современные представления о физикохимии высокотемпературного уплотнения и упрочнения (спекания) объектов различной природы, как металлических, так и тугоплавких неметаллических. Рассмотрены процессы, происходящие на индивидуальном контакте взаимно припекающихся частиц, при уменьшении объёма как изолированной поры, так и ансамбля пор. Проанализирована роль дефектов строения кристаллической решётки – вакансий, дислокаций, границ между зёрнами в процессе спекания пористых тел. Рассмотрены особенности процесса спекания смесей порошков различных веществ в связи с возможным влиянием взаимной диффузии на кинетику процесса. Изложены закономерности спекания материалов с участием жидкой фазы различной природы.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 18.03.01, 18.04.01, 18.06.01 «Химическая технология» (программы «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов») и «Химическая технология высокотемпературных функциональных материалов»; 22.03.01, 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»; 22.06.01 «Технологии материалов». Может быть использовано инженерно-техническим персоналом производств тугоплавких неметаллических материалов в своей профессиональной деятельности.

УДК 541.1  
ББК 24.5+35.41

ISBN 978-5-9729-1732-7

© Макаров Н. А., Харитонов Д. В., Лемешев Д. О., 2024  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ПРИПЕКАНИЕ ТЕЛ, КОНТАКТИРУЮЩИХ «В ТОЧКЕ» .....	7
1.1. Возможные механизмы припекания твёрдых тел, контактирующих в «точке».....	7
1.2. Геометрия контактной области. Движущая сила припекания .....	9
1.3. Механизм вязкого течения.....	12
1.4. Механизм объёмной самодиффузии .....	14
1.5. Взаимное припекание при наличии прижимающего усилия .....	18
1.6. Механизм поверхностной диффузии .....	21
1.7. Механизм переноса вещества через газовую фазу .....	22
1.8. Закон «размеров» .....	24
1.9. Взаимное припекание частиц произвольной формы.....	28
2. ПРИПЕКАНИЕ РАЗНОРОДНЫХ ТЕЛ .....	32
2.1. Взаимно нерастворимые тела .....	32
2.2. Эффекты Кикрендалла и Френкеля.....	37
2.3. Припекание взаимно растворимых твёрдых тел.....	41
3. ЗАЛЕЧИВАНИЕ (СПЕКАНИЕ) ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОР .....	45
3.1. Залечивание изолированной поры в однородной изотропной среде.....	46
3.2. Роль границ зерен и дислокаций в залечивании изолированной поры .....	53
3.3. Залечивание изолированной поры в изотропной среде под влиянием значительных внешних давлений .....	60
3.4. Перемещение поры как единого целого .....	61
4. АНСАМБЛЬ ПОР В РЕАЛЬНОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ .....	68
4.1. Ансамбль пор в квазивязкой сплошной среде .....	69
4.2. Коалесценция пор в ансамбле.....	71
4.3. Коалесценция пор при наличии стоков вакансий. Расширение локализованной пористой области .....	76
5. СПЕКАНИЕ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРЕССОВОК .....	84
5.1. Стадии процесса усадки .....	84

5.2. Активность дисперсных порошков .....	87
5.3. Влияние «гравитационных» и остаточных напряжений на спекание.....	92
5.4. Феноменологическое описание процесса спекания .....	96
5.5. Поздняя стадия спекания порошковых прессовок .....	101
<b>6. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА УПЛОТНЕНИЕ ПОРИСТОГО ТЕЛА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.....</b>	<b>104</b>
<b>7. СПЕКАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРЕССОВОК .....</b>	<b>109</b>
7.1. Концентрационная зависимость линейной усадки двухкомпонентных смесей в твердой фазе.....	109
7.2. Модифицирование порошков в процессе спекания. Активированное спекание.....	115
<b>8. СПЕКАНИЕ С УЧАСТИЕМ ЖИДКОЙ ФАЗЫ.....</b>	<b>124</b>
<b>9. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ СПЕКАНИЯ .....</b>	<b>161</b>
9.1. Сущность энергии активации .....	161
9.2. Модели физико-химических процессов в технологии тугоплавких неметаллических материалов .....	162
9.3. Изотермический метод исследования кинетики спекания .....	163
9.4. Определение кажущейся энергии начальной стадии спекания методом ступенчатой изотермической дилатометрии .....	168
9.5. Дифференциальный метод неизотермической кинетики .....	171
9.6. Интегральный метод неизотермической кинетики .....	178
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>180</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>181</b>