

# МЕТОДЫ КОМПАКТИРОВАНИЯ И КОНСОЛИДАЦИИ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие

3-е издание, электронное

Допущено

Учебно методическим объединением  
высших учебных заведений РФ по образованию  
в области материаловедения, технологии материалов и покрытий  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров  
150100 «Материаловедение и технологии материалов»



Москва  
Лаборатория знаний  
2020

УДК 620.22-002.532  
 ББК 30.3+30.605я73  
 М54

*Серия основана в 2006 г.*

Авторы:

О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева, А. А. Качаев,  
 В. В. Полисадова

**Методы** компактирования и консолидации наноструктур-  
 М54 ных материалов и изделий : учебное пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева [и др.]. — 3-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 272 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-716-5

Рассмотрены основные методы компактирования и консолидации порошковых наноматериалов для получения из них изделий. В большей части внимание уделено объемным наноструктурным материалам и изготовленным на их основе керамическим изделиям конструкционного и функционального назначения. Подробно изложены метод УЗ-компактирования порошков, коллекторный метод прессования, приведены конструкции коллекторных пресс-форм для производства порошковых изделий различной геометрической формы. Проанализированы характеристики напряженно-деформированного состояния и реологические свойства уплотняемого порошкового материала, определяющие качество изделий.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области материаловедения, а также специалистов-технологов.

УДК 620.22-002.532

ББК 30.3+30.605я73

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий : учебное пособие / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева [и др.]. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 269 с. : ил. — (Нанотехнологии). — ISBN 978-5-9963-0844-6.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-716-5

© Лаборатория знаний, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>Введение</b> .....	<b>5</b>
<b>Глава 1. Консолидированные наноструктурные материалы</b> ...	<b>11</b>
1.1. Особенности свойств объемных наноструктурных материалов и роль границ зерен в их определении .....	11
1.2. Условия формирования наноструктуры материала .....	23
1.3. Интенсивная пластическая деформация .....	27
1.4. Агломераты наночастиц .....	31
1.5. Основные методы получения нанопорошков .....	33
1.6. Микро- и макроструктура порошкового компакта .....	38
1.7. Трение в порошковом компакте .....	43
1.8. Градиенты плотности в порошковых компактах .....	45
1.9. Конструкционные наноматериалы .....	47
1.10. Функциональная керамика .....	49
<b>Глава 2. Порошковые технологии компактирования материалов</b> .....	<b>59</b>
2.1. Холодное статическое прессование в закрытых пресс-формах ...	66
2.2. Горячее прессование .....	67
2.3. Изостатическое и квазиизостатическое прессование .....	69
2.4. Формование литьем .....	70
2.5. Динамические, высокоэнергетические и импульсные методы прессования .....	71
2.6. Ультразвуковое квазирезонансное прессование .....	75
2.7. Технологии послойно-селективного формирования объемных наноматериалов .....	85
2.8. Спекание в плазме искрового разряда .....	88
<b>Глава 3. Характеристики компактирования порошков</b> .....	<b>92</b>
3.1. Оценка этапов и граничных условий процесса уплотнения порошков .....	92
3.2. Распределение давления вдоль оси прессования .....	95
3.3. Оптимизация уравнения прессования .....	97
3.4. Кривые уплотнения и упругие свойства порошкового тела .....	111
3.5. Зависимость параметров прессовки от ее упругих свойств .....	118
3.6. Параметры межчастичных связей .....	125
3.7. Оптимизация внешнего воздействия .....	131

<b>Глава 4. Коллекторный способ прессования</b> . . . . .	<b>139</b>
4.1. Конструктивное решение . . . . .	139
4.2. Аналитическое описание . . . . .	144
4.3. Техническая реализация. Коллекторные пресс-формы . . . . .	148
4.4. Практическое применение коллекторного способа прессования . . . . .	156
4.5. Моделирование процессов деформации порошкового тела . . . . .	162
<b>Глава 5. Особенности УЗ-воздействия на твердофазные и порошковые системы</b> . . . . .	<b>165</b>
5.1. Влияние УЗ-воздействия на дислокационную структуру кристалла . . . . .	165
5.2. Механизм разрушения хрупких и пластичных материалов при УЗ-воздействии . . . . .	168
5.3. Акустопластический эффект при пластической деформации с наложением УЗ-колебаний . . . . .	172
5.4. Влияние кавитационного УЗ-воздействия на диспергирование порошковых материалов . . . . .	176
<b>Глава 6. Физические эффекты УЗ-компактирования керамических порошков</b> . . . . .	<b>181</b>
6.1. Распространение ультразвука в нанопорошковой среде . . . . .	181
6.2. Изменение акустических характеристик в компактируемом нанопорошке . . . . .	185
6.3. Механизмы мощного УЗ-воздействия на компактируемый порошок . . . . .	189
6.4. Влияние ориентации колебательного смещения относительно оси прессования на плотность прессовок . . . . .	195
6.5. Влияние УЗ-воздействия на качество прессовки . . . . .	197
6.6. Влияние УЗ-воздействия на параметры уплотнения и межчастичные связи . . . . .	207
6.7. Влияние УЗ-воздействия на плотность и усадку спеченной керамики . . . . .	216
6.8. Влияние УЗ-воздействия на порораспределение и зернистость спеченной керамики . . . . .	223
6.9. Влияние УЗ-воздействия на параметры кристаллической структуры и прочностные свойства конструкционной керамики . . . . .	229
<b>Заключение</b> . . . . .	<b>248</b>
<b>Литература</b> . . . . .	<b>250</b>
<b>Список сокращений</b> . . . . .	<b>269</b>