

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ  
ИЗ РАСПЛАВА**



Санкт-Петербург  
2018

УДК 669.1:67.02:62-492.2

ББК 34.39

Ф48

Рецензенты:

Академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением Самарского национального исследовательского университета имени академика

*С. П. Королева Ф. В. Гречников*

Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН (г. Уфа), заведующий кафедрой физики и технологии наноматериалов

Башкирского государственного университета *Р. Р. Мулюков*

Авторы:

А. И. Рудской, К. Н. Волков, С. Ю. Кондратьев, Ю. А. Соколов

**Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава / А. И. Рудской [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018, 610 с.**

В монографии рассматриваются вопросы, связанные с разработкой, реализацией и применением математических моделей, предназначенных для управления и оптимизации технологических процессов получения порошков металлов из расплава. Приводятся сведения о методах производства порошков металлов и их сплавов, а также характеристики специализированного оборудования. Обсуждается влияние различных факторов на ускорение, теплообмен, отвердевание и кристаллизацию расплавленных частиц в неизотермических потоках газа и низкотемпературной плазмы. Исследуется влияние условий истечения и ввода частиц в поток на закономерности рассеивания и отвердевания капель расплава, а также формообразование и распределение частиц по размерам. Показаны перспективы развития технологий и оборудования, обеспечивающих получение в промышленном масштабе мелкодисперсных порошков различного химического состава с контролируемыми и управляемыми размером, формой, физико-химическими свойствами для аддитивных технологий. Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области порошковой металлургии, аддитивных технологий, новых материалов, металловедения, занимающихся проектированием соответствующего технологического оборудования, а также преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов металлургических, машиностроительных и политехнических высших учебных заведений.

Табл. 34. Ил. 230. Библиогр. : 355 назв.

Печатается по решению Совета по издательской деятельности Ученого совета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

© Рудской А. И., Волков К. Н.,  
Кондратьев С. Ю., Соколов Ю. А., 2018

ISBN 978-5-7422-6111-7  
doi:10.18720/SPBPU/2/id18-12

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	9
Введение .....	13
<b>Глава 1. Формирование частиц при распылении металлического расплава и их строение .....</b>	<b>18</b>
1.1. Свойства металлических порошков.....	19
1.2. Методы измерения размеров частиц .....	40
1.3. Свойства газов, жидких и твердых металлов .....	43
1.4. Кристаллизация распыленных частиц.....	57
1.5. Аморфизация расплава.....	61
1.6. Микроструктура распыленных частиц .....	64
1.7. Распределение распыленных частиц по размерам .....	70
1.7.1. Способы представления распределения частиц по размерам .....	70
1.7.2. Функции распределения частиц .....	73
1.7.3. Средние размеры частиц .....	75
1.7.4. Униимодальные функции распределения .....	78
1.7.5. Дисперсность капель .....	85
Заключение к главе 1 .....	91
Библиографический список к главе 1 .....	92
<b>Глава 2. Методы получения металлических порошков .....</b>	<b>96</b>
2.1. Методы производства металлических порошков распылением расплава.....	97
2.1.1. Распыление расплава в охлаждаемом газе.....	98
2.1.2. Распыление расплава потоком жидкости .....	100
2.1.3. Распыление расплава в плазменной струе .....	103
2.1.4. Метод центробежного распыления расплава.....	105

2.2. Способы нагрева для плавления металла перед распылением .....	111
2.3. Диспергирование жидкой струи .....	138
2.3.1. Самопроизвольный распад струи .....	138
2.3.2. Режимы дробления и характерные параметры .....	144
2.3.3. Вторичное дробление капель .....	147
2.3.4. Механизм диспергирования струи расплава .....	153
2.3.5. Механизм формообразования распыленных частиц .....	160
2.3.6. Скорость охлаждения расплава .....	165
2.3.7. Форма частиц .....	167
2.4. Стадии получения порошка в плазменной струе .....	170
2.5. Диспергирование жидкой пленки .....	177
2.6. Ионная химико-термическая обработка порошков ....	181
2.7. Моделирование процессов получения металлических порошков распылением расплава .....	185
Заключение к главе 2 .....	186
Библиографический список к главе 2 .....	187
<b>Глава 3. Математическое моделирование двухфазных течений в технологических процессах .....</b>	<b>192</b>
3.1. Стандартная кривая сопротивления .....	193
3.1.1. Сила сопротивления .....	193
3.1.2. Картина обтекания шаровидной частицы .....	195
3.1.3. Коэффициент сопротивления .....	198
3.1.4. Влияние различных факторов на коэффициент сопротивления .....	201
3.2. Вращение частицы .....	223
3.3. Движение частицы в потоке с поперечным сдвигом .....	228
3.4. Нестационарные эффекты при движении частицы .....	231
3.5. Движение частицы в потоке с градиентом температуры .....	235
3.6. Движение частицы под действием силы тяжести .....	239
3.7. Движение частицы в турбулентном потоке .....	241
3.8. Теплообмен частицы с газом .....	242

3.9. Уравнения движения и теплообмена частицы .....	246
3.10. Методы моделирования двухфазных течений .....	251
3.10.1. Характеристика различных подходов .....	251
3.10.2. Области применения .....	253
3.10.3. Режимы течения газозвеси .....	256
3.11. Континуальный подход .....	258
3.12. Траекторный подход .....	265
3.13. Обоснование некоторых допущений .....	269
Заключение к главе 3 .....	286
Библиографический список к главе 3 .....	288
<b>Глава 4. Струйные течения в металлургических процессах .....</b>	<b>292</b>
4.1. Классификация струйных течений .....	294
4.2. Структура турбулентной струи .....	296
4.2.1. Условия истечения .....	296
4.2.2. Дозвуковая струя .....	298
4.2.3. Сверхзвуковая струя .....	304
4.2.4. Струя низкотемпературной плазмы .....	314
4.2.5. Ускорение частиц .....	317
4.3. Методы расчета турбулентных струй .....	319
4.4. Математическая модель струйного течения .....	328
4.4.1. Газ .....	329
4.4.2. Частицы .....	332
4.4.3. Начальные и граничные условия .....	335
4.4.4. Расчетная область и сетка .....	337
4.4.5. Численный метод .....	337
4.5. Истечение струи в затопленное пространство и в спутный поток .....	340
4.6. Течение в неизотермической струе .....	348
4.7. Рассеивание и теплообмен частиц в струе .....	364
4.8. Газодинамическое охлаждение капель расплава .....	374
4.9. Течения газа с нестационарным подводом энергии .....	381
Заключение к главе 4 .....	397
Библиографический список к главе 4 .....	398

<b>Глава 5. Особенности управления процессом получения порошка</b> .....	403
5.1. Методы математического моделирования .....	404
5.1.1. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент.....	404
5.1.2. Математические модели газодинамических процессов.....	407
5.1.3. Сопряженные задачи.....	410
5.1.4. Вычислительные пакеты .....	411
5.2. Системный подход к построению модели .....	413
5.2.1. Управление качеством порошка .....	419
5.2.2. Взаимосвязь между моделями .....	423
5.2.3. Модели отдельных стадий процесса.....	425
5.3. Нагрев торца заготовки .....	429
5.3.1. Модель плазмотрона .....	429
5.3.2. Модель плазменной струи .....	431
5.3.3. Модель нагрева заготовки .....	435
5.4. Движение частицы в закрученном потоке.....	437
5.5. Перенос частиц потоками с концентрированной завихренностью.....	444
5.6. Аэродинамическая модель получения порошка методом PREP .....	459
5.6.1. Основные соотношения.....	459
5.6.2. Движение частицы вверх .....	460
5.6.3. Движение частицы вниз .....	462
5.6.4. Результаты расчетов .....	466
5.7. Аэротермодинамическая модель получения порошка методом PREP.....	469
5.8. Исследование процесса охлаждения индивидуальной частицы в газовой среде .....	473
5.8.1. Исходные данные .....	475
5.8.2. Охлаждение частицы в газовой среде аргона и гелия.....	478
5.8.3. Исследование влияния химического состава инертной среды на параметры процесса .....	481
5.9. Исследование процесса получения порошка методом PREP .....	492

5.9.1. Частота вращения заготовки .....	494
5.9.2. Состав газовой смеси.....	494
5.9.3. Турбулентность .....	498
5.9.4. Давление в камере.....	503
5.10. Формообразование частицы.....	507
5.11. Взаимодействие частицы со стенкой камеры.....	518
5.12. Модель получения порошка на специализированной установке.....	528
5.13. Статистический анализ фракционного состава частиц.....	534
Заключение к главе 5.....	542
Библиографический список к главе 5 .....	544
<b>Глава 6. Автоматизированные системы производства порошка</b> .....	548
6.1. Иерархическое описание автоматизированной системы производства порошка .....	549
6.2. Специализированное оборудование для производства порошка .....	554
6.2.1. Технологическая установка для получения порошка методом распыления расплава в газовой среде.....	555
6.2.2. Специализированная установка для реализации технологии распыления в плазменной струе.....	558
6.2.3. Установка центробежного распыления металлических расплавов с затвердеванием частиц в жидкости .....	560
6.2.4. Технологическая установка для получения порошка методом плазменного распыления быстровращающейся заготовки .....	561
6.3. Векторная оптимизация процесса производства порошка методом PREP.....	566
6.3.1. Особенности моделирования процесса получения порошка.....	567
6.3.2. Оптимизация процесса.....	571

6.4. Организация системы управления установки для производства порошка методом PREP .....	577
6.4.1. Основные функции системы управления .....	580
6.4.2. Структура системы управления .....	586
6.4.3. Адаптивное управление процессом производства порошка .....	591
6.4.4. Синтез регуляторов параметров процесса .....	599
Заключение к главе 6 .....	604
Библиографический список к главе 6 .....	605
Заключение .....	608