

А. А. Лепешев  
А. В. Ушаков  
И. В. Карпов

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ  
И ПОЛИМЕРНЫХ  
НАНОКОМПОЗИТОВ**

Монография

НОЦ (кафедра) “Новые материалы и технологии”



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет

Сибирское отделение Российской академии наук  
Красноярский научный центр

**А. А. Лепешев, А. В. Ушаков, И. В. Карпов**

**ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ  
И ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ**

Монография

Красноярск  
СФУ  
2012

УДК 621.762 : 544.552

ББК 30.365

Л481

*Рецензенты:* Я. И. Бульбик, доктор технических наук, профессор  
НОЦ (кафедры) ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии»;

Г. Г. Крушенко, доктор технических наук, профессор, главный на-  
учный сотрудник ИВМ СО РАН

**Лепешев, А. А.**

Л481 Плазмохимический синтез нанодисперсных порошков и по-  
лимерных нанокompозитов / А. А. Лепешев, А. В. Ушаков,  
И. В. Карпов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 328 с.  
ISBN 978-5-7638-2502-02

Представлены результаты научно-исследовательских работ в области по-  
лучения, исследования и применения нанодисперсных нитридов и оксидов ме-  
таллов. Приведены физико-химические и технологические характеристики на-  
нодисперсных нитридов и оксидов, синтезированных в плазме дугового разряда  
низкого давления.

Большое внимание уделено применению нанодисперсных порошков в ка-  
честве наполнителей полимерных композиционных материалов, позволяющих  
разрабатывать нанокompозиционные полимерные материалы с высокими экс-  
плуатационными характеристиками для перспективных отраслей машиностроения.

Предназначено специалистам, инженерам, научным работникам, аспи-  
рантам, магистрантам, студентам старших курсов, занимающимся созданием,  
исследованием и внедрением новых перспективных материалов и нанотехнологий.

**УДК 621.762 : 544.552**

**ББК 30.365**

ISBN 978-5-7638-2502-02

© Сибирский федеральный  
университет, 2012

© Лепешев А.А.

Ушаков А. В.

Карпов И. В., 2012

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
<i>Глава 1. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ НИТРИДОВ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ....</i>	7
1.1. Особенности термического взаимодействия молекулярного азота с поверхностью наночастиц металлов	7
1.2. Математическая модель заполнения адсорбционного состояния.....	22
1.3. Скорость роста и степень стехиометрии нанопорошков нитридов	27
1.4. Методика расчета констант скоростей гетерогенных плазмохимических реакций с термической и нетермической активацией процессов.....	33
<i>Глава 2. ПРОЦЕССЫ КЛАСТЕРООБРАЗОВАНИЯ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ РАСПЫЛЕНИИ.....</i>	42
2.1. Основные положения процесса кластерообразования.....	43
2.2. Рост кластеров в расширяющемся газе.....	55
2.3. Процессы конденсации пароплазменного потока в расширяющемся газе.....	61
<i>Глава 3. ПРОЦЕССЫ ОКИСЛЕНИЯ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ И НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА.....</i>	69
3.1. Особенности фазового состава нанопорошков металлов....	73
3.2. Состав оксидно-гидроксидного слоя на частицах электродуговых нанопорошков оксида титана.....	75
<i>Глава 4. ОСОБЕННОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ КАТОДНЫХ ПЯТЕН НА ОКИСЛЕННОМ КАТОДЕ.....</i>	81
4.1. Влияние состава газовой смеси на формирование оксидного слоя на катоде.....	81
4.2. Оптимизация состава газовой смеси.....	93
4.3. Влияние электрических параметров режимов.....	96

---

<b>Глава 5. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ НИТРИДОВ МЕТАЛЛОВ.....</b>	<b>105</b>
5.1. Получение нанодисперсных порошков нитрида титана.....	105
5.1.1. Влияние давления газовой среды на синтез нанопорошка нитрида титана.....	105
5.1.2. Физико-химические свойства нанопорошка нитрида титана.....	111
5.1.3. Технологические свойства нанопорошка нитрида титана.....	120
5.2. Получение нанодисперсных порошков нитрида циркония...	126
5.2.1. Влияние давления газовой среды на синтез нанопорошка нитрида циркония.....	126
5.2.2. Физико-химические свойства нанопорошка нитрида циркония.....	132
5.2.3. Технологические свойства нанопорошка нитрида циркония.....	137
<b>Глава 6. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>141</b>
6.1. Влияние концентрации кислорода в газовой смеси на синтез нанодисперсных оксидов.....	141
6.2. Зависимость удельной эрозии катода от давления газовой среды.....	149
6.3. Зависимость удельной эрозии от температуры распыляемого катода.....	152
6.4. Зависимость дисперсности нанодисперсных оксидов от давления и состава газовой смеси.....	158
6.5. Зависимость свойств нанодисперсных оксидов от геометрических параметров плазмохимического реактора	166
6.6. Зависимость площади удельной поверхности нанопорошков от природы газа-среды и добавок химически реагирующих газов.....	169
6.7. Физико-химические свойства нанодисперсных оксидов металлов .....	173
6.7.1. Физико-химические свойства нанопорошка оксида титана.....	174
6.7.2. Физико-химические свойства нанопорошка оксида циркония.....	181

<i>Глава 7. ПОЛУЧЕНИЕ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ</i> .....	190
7.1. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ, полученные модификацией ионами титана.....	197
7.2. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ, полученные модификацией ионами циркония.....	212
7.3. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ, полученные ионной модификацией титаном совместно с ионной активацией в тлеющем разряде в атмосфере гелия	218
7.4. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ, полученные ионной модификацией цирконием совместно с ионной активацией в тлеющем разряде в атмосфере гелия	223
7.5. Влияние ионной модификации на электрические свойства наноконпозиционных материалов на основе СВМПЭ.....	238
7.6. Влияние ионной модификации на электропроводность и диэлектрические свойства наноконпозиционных материалов на основе СВМПЭ.....	245
7.7. Электрофизические свойства наноконпозиционных материалов на основе СВМПЭ, содержащих наночастицы ионного синтеза.....	255
7.8. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ и TiO <sub>2</sub> , полученные методом горячего прессования.....	260
7.9. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ и TiN, полученные методом горячего прессования.....	274
7.10. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ и ZrO <sub>2</sub> , полученные методом горячего прессования.....	284
7.11. Наноконпозиционные материалы на основе СВМПЭ и ZrN, полученные методом горячего прессования.....	294
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	305
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	324