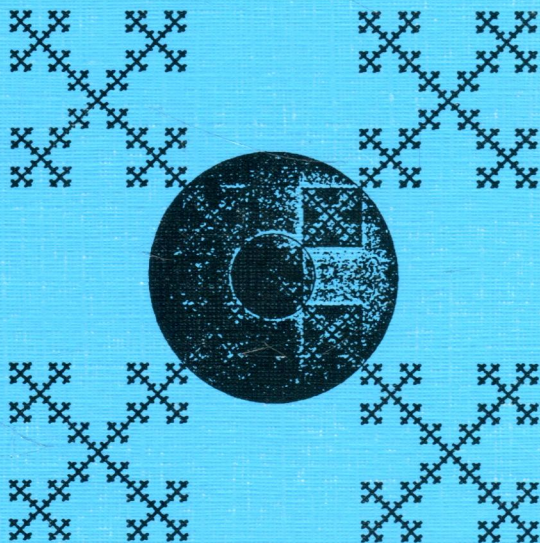


А.П. Шпак, П.Г. Черемской,
Ю.А. Куницкий, О.В. Соболев

КЛАСТЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Том 3



Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
Национальный университет имени Тараса Шевченко
Технический центр НАН Украины

А.П. Шпак, П.Г. Черемской,
Ю.А. Куницкий, О.В. Соболев

Кластерные и наноструктурные материалы

Том 3

**Пористость как особое состояние
самоорганизованной структуры
в твердотельных наноматериалах**

Киев – 2005

УДК 536:669
ББК 34.2
Ш73

*Печатается по решению Ученого совета института металлофизики
им. Г.В. Курдюмова и научно-технического совета Технического центра
Национальной академии наук Украины*

Рецензенты:

акад. НАН Украины *А.Г. Косторнов*
акад. НАН Украины *И.М. Неклюдов*
проф., доктор физ.-мат. наук *В.И. Лысов*

Редакторы: *Е.В. Бондарчук, Л.П. Юрченко*

Шпак А.П. и др.

Ш73 **КЛАСТЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.** Т.3. Пористость как особое состояние самоорганизованной структуры в твердых наноматериалах / А.П. Шпак, П.Г. Черемской, Ю.А. Куницкий, О.В. Соболев – К.: ВД "Академперіодика", 2005. – 516 с.
Ил. 215, табл. 55, библи. 878 назв.
ISBN 966-360-029-2

Изложены физические основы флуктуационного зарождения упорядоченных низкоразмерных структур, их фрактального описания и различных методов исследования. В качестве специфического структурного низкоразмерного элемента рассмотрена "фаза пустоты". Обосновывается концепция представления свободного объема и пор как фазово-структурных неоднородностей твердого тела. Изложены современные представления о способах локализации и распределения "фазы пустоты" в аморфных и кристаллических материалах, морфологии и классификации пор, видах пористости, механизмах процессов поробразования.

Для специалистов в области прикладной физики, физического материаловедения и порошковой металлургии, а также аспирантов, магистров и студентов соответствующих специальностей.

ББК 34.2

ISBN 966-360-029-2

© А.П. Шпак, П.Г. Черемской,
Ю.А. Куницкий, О.В. Соболев, 2005

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|------------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 11 |
| ВВЕДЕНИЕ | 17 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О САМООРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУР С ФРАКТАЛЬНОЙ И ЕВКЛИДОВОЙ РАЗМЕРНОСТЯМИ | 19 |
| 1.1. Особенности формирования структуры в неравновесных условиях | 19 |
| 1.2. Фрактальные системы | 24 |
| 1.3. Использование методов фрактальной геометрии для разных уровней организации | 33 |
| 1.4. Экспериментальные методы исследования фрактальных структур | 39 |
| 1.5. Процессы фрактальной агрегации при синтезе материалов | 54 |
| 1.6. Процессы самоорганизации и фрактальные структуры | 58 |
| Литература | 69 |
| 2. НАНОМАСШТАБНЫЙ УРОВЕНЬ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ | 73 |
| 2.1. Нанокластерное состояние материалов | 73 |
| 2.2. Нанокристаллическое структурное состояние | 93 |
| 2.3. Основные дифракционные соотношения в анализе многоуровневой структуры гетерогенных наноматериалов и композитов | 105 |
| 2.4. Многоуровневые фрактальные наноразмерные системы | 128 |
| 2.5. Влияние межфазных слоев на малоугловое рассеяние в нанокomпозиционных системах | 138 |
| Литература | 144 |
| 3. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ГЕНЕЗИСЕ ПОРИСТОСТИ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ | 149 |
| 3.1. Поры как фазово-структурные неоднородности макро-, микро- и наносистем | 149 |
| 3.2. Факторы, определяющие морфологию пор | 156 |
| 3.3. Способы локализации «пустоты» в материалах | 158 |
| Литература | 173 |

| | |
|--|------------|
| 4. ВИДЫ ПОРИСТОСТИ | 176 |
| 4.1. Пористость при твердении и кристаллизации | 176 |
| 4.2. Диффузионная пористость | 188 |
| 4.3. Деформационная пористость | 196 |
| 4.4. Радиационная пористость | 202 |
| 4.5. Механизмы порообразования в конденсатах | 211 |
| Литература | 221 |
| 5. ПРОЦЕССЫ ПОРООБРАЗОВАНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ НАНОСИСТЕМАХ | 225 |
| 5.1. Поры в аморфных пленочных наносистемах | 226 |
| 5.2. Порообразование при формировании поликристаллических конденсатов | 240 |
| 5.3. Пористость в эпитаксиальных конденсированных наносистемах | 270 |
| 5.4. Порообразование в ионно-плазменных конденсированных наносистемах | 280 |
| 5.5. Порообразование при пиролизе и анодном окислении | 287 |
| Литература | 292 |
| 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОРИСТОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ НАНОСИСТЕМ | 296 |
| 6.1. Изменение пористости пленок при изотермическом нагреве | 296 |
| 6.2. Эволюция пористости конденсированных наносистем в условиях теплосмен | 311 |
| Литература | 323 |
| 7. РАЗВИТИЕ РАДИАЦИОННОЙ ПОРИСТОСТИ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ НАНОСИСТЕМАХ | 326 |
| 7.1. Порообразование при ионном облучении | 326 |
| 7.2. Порообразование при ВУФ облучении | 343 |
| 7.3. Самоорганизация пористой структуры под действием облучения | 352 |
| Литература | 357 |
| 8. ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПОРИСТОСТЬ КОНДЕНСИРОВАННЫХ НАНОСИСТЕМ | 360 |
| 8.1. Основные факторы открытого космического пространства | 358 |
| 8.2. Пористость пленочных наносистем, конденсированных в космических и наземных условиях | 362 |

| | |
|--|------------|
| 8.3. Объемно-структурные изменения в наносистемах, экспонированных в открытом космическом пространстве | 370 |
| 8.4. Изменение характеристик пористости материалов при моделировании влияния факторов ОКП | 376 |
| Литература | 390 |
| 9. ФАЗА «ПУСТОТЫ» В КОМПОЗИЦИОННЫХ НАНОСИСТЕМАХ И КРИСТАЛЛАХ | 396 |
| 9.1. Локализация и превращения свободного объема в аморфных сплавах | 397 |
| 9.2. Конденсационная пористость пирографита | 409 |
| 9.3. Газодиффузная пористость энергоемких компактных структур | 411 |
| 9.4. Фрактальное представление структуры пористых композиционных и конденсированных систем | 418 |
| 9.5. Деформационно-диффузионная пористость в кристаллах | 423 |
| 9.6. Наноканальные, нанотрубчатые и нанопроволочные композиты | 439 |
| Литература | 448 |
| 10. ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ПОРИСТЫХ МАКРО-, МИКРО- И НАНОСИСТЕМ | 456 |
| 10.1. Особенности фазового состояния пористых систем | 456 |
| 10.2. Диаграммное представление пористых макро-, микро- и наносистем | 465 |
| Литература | 469 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ | 470 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОРИСТОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ПОР | 475 |

Content

FOREWORD

INTRODUCTION

1. BASIC CONCEPTIONS ON SELF-ORGANIZATION OF STRUCTURES WITH THE FRACTAL AND EUCLIDEAN DIMENSIONS

- 1.1. The peculiarities of the structure formation in nonequilibrium conditions
 - 1.2. The fractal systems
 - 1.3. The using of fractal geometry methods for different levels of organization
 - 1.4. The experimental methods of the fractal structures investigation
 - 1.5. The processes of the fractal aggregation under synthesis of materials
 - 1.6. The processes of self-organization and the fractal structures
- References

2. NANOSCALED LEVEL OF STRUCTURE ORGANIZATION

- 2.1. Nanocluster state of materials
 - 2.2. Nanocrystalline structural state
 - 2.3. The main diffraction equations under analysis of multilevel structure of nanomaterials and composites
 - 2.4. Multilevel fractal nanoscaled systems
 - 2.5. The influence of interfaces on small angle scattering in nanosystems
- References

3. BASIC CONCEPTION ON THE POROSITY GENESIS IN SOLIDS

- 3.1. The pores as phase-structural inhomogeneities of macro-, micro- and nanosystems
 - 3.2. The factors defined the morphology of pores
 - 3.3. The methods of localization of "emptiness" in materials
- References

4. THE TYPES OF POROSITY

- 4.1. The porosity under solidification and crystallization
- 4.2. The diffusive porosity
- 4.3. The deformation porosity
- 4.4. The radiation porosity

4.5. The mechanisms of pores' formation in solids.

References

5. THE PROCESSES OF PORES' FORMATION IN CONDENSED NANOSYSTEMS

5.1. The pores in amorphous nanoscaled films.

5.2. The pores' formation under polycrystalline solids obtaining.

5.3. The porosity in epitaxial condensed nanosystems.

5.4. The pores' formation in ion-plasmos condensed nanosystems

5.5. The pores' formation under pyrolysis and anode oxidation

References

6. THERMAL STABILITY OF POROSITY OF THE CONDENSED NANOSYSTEMS

6.1. The changing of films' porosity under isothermal heating

6.2. The evolution of porosity of condensed nanosystems under thermal cycling.

References

7. THE DEVELOPMENT OF RADIATION POROSITY IN CONDENSED NANOSYSTEMS

7.1. The pores' formation under ion radiation

7.2. The pores' formation under VUV radiation

7.3. The self-organization of porous structure under radiation

References

8. THE INFLUENCE OF SPACE FACTORS ON POROSITY OF CONDENSED NANOSYSTEMS

8.1. The main factors of open space

8.2. The porosity of films nanosystems, obtained under space conditions

8.3. Bulk-structural changing in nanosystems, exhibited in open space

8.4. The changing of materials' porosity characteristics at modeling of the influence of space factors

Reference

9. THE PHASE OF "EMPTINESS" IN NANOCOMPOSITES AND NANOCRYSTALS

9.1. The localization and transformation of free volume in amorphous alloys

9.2. The condensed porosity of pyrographite

- 9.3. Gas-diffusive porosity of power-consuming compact structures
- 9.4. The fractal conception of structure of porous composites and condensed systems
- 9.5. The deformation-diffusive porosity in crystals
- 9.6. The nanocanal, nanotubes and nanowires

References

10. THE PHASE STATE AND THERMODYNAMIC PRINCIPLES OF POROUS MACRO-, MICRO- AND NANOSYSTEMS

- 10.1. The peculiarities of phase state of porous systems
- 10.2. The diagrams of porous macro-, micro- and nanosystems

References

APPENDIX A. THE CHARACTERISTICS OF THE PORES SIZE DISTRIBUTION

APPENDIX B. THE METHODS OF STUDIES THE POROSITY AND SIZE OF PORES