

MATERIALES REFRACTARIOS Y CERÁMICOS

PROYECTO EDITORIAL
BIBLIOTECA DE QUÍMICAS

Director:

Carlos Seoane Prado

Catedrático de Química Orgánica
Universidad Complutense de Madrid



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

MATERIALES REFRACTARIOS Y CERÁMICOS

Luis F. Verdeja
José P. Sancho
Antonio Ballester



EDITORIAL
SÍNTESIS

Consulte nuestra página web: www.sintesis.com
En ella encontrará el catálogo completo y comentado

© Luis F. Verdeja, José P. Sancho y Antonio Ballester

© EDITORIAL SÍNTESIS, S.A.
Vallehermoso, 34 - 28015 Madrid
Teléf.: (91) 593 20 98
<http://www.sintesis.com>

Depósito Legal: M. 8.365-2008
ISBN: 978-84-975655-9-2

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S.A.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| PRÓLOGO | 9 |
| FACTORES DE CONVERSIÓN DE UNIDADES..... | 11 |
| 1. REFRACTARIOS Y CERÁMICOS | 15 |
| 1.1. Introducción | 16 |
| 1.2. Criterios de clasificación | 17 |
| 1.3. Compuestos cerámicos en la Ciencia de Materiales | 19 |
| Bibliografía | 22 |
| 2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES | 23 |
| 2.1. Introducción | 24 |
| 2.2. Enlace químico y estructura | 24 |
| 2.3. Tamaño de grano | 30 |
| Bibliografía | 34 |
| 3. TRANSFORMACIONES EN ESTADO SÓLIDO | 35 |
| 3.1. Introducción | 36 |
| 3.2. Transformaciones difusionales y por desplazamiento | 36 |
| 3.3. Tenacidad en refractarios y cerámicos | 40 |
| Bibliografía | 59 |
| 4. MECANISMOS DE AGLOMERACIÓN | 61 |
| 4.1. Introducción | 62 |
| 4.2. Aglomeración hidráulica, orgánica y química | 62 |
| 4.3. Sinterización cerámica | 64 |
| Bibliografía | 79 |

| | |
|--|-----|
| 5. PROPIEDADES QUÍMICO-FÍSICAS | 81 |
| 5.1. Introducción | 82 |
| 5.2. Propiedades químicas | 82 |
| 5.3. Densidad | 83 |
| 5.4. Porosidad y permeabilidad | 84 |
| 5.5. Dilatación lineal | 89 |
| 5.6. Calor específico | 92 |
| 5.7. Conductividad térmica | 92 |
| Bibliografía | 102 |
| 6. PROPIEDADES MECÁNICAS | 103 |
| 6.1. Introducción | 104 |
| 6.2. Constantes elásticas | 105 |
| 6.3. Refractariedad | 111 |
| 6.4. Ensayos de resistencia mecánica | 115 |
| 6.4.1. Resistencia mecánica en frío | 116 |
| 6.4.2. Ensayo de tenacidad a la fractura | 123 |
| 6.4.3. Resistencia mecánica en caliente | 125 |
| 6.5. Resistencia al choque térmico | 131 |
| Bibliografía | 131 |
| 7. CRITERIOS PARA EL DISEÑO CON MATERIALES CERÁMICOS | 133 |
| 7.1. Introducción | 134 |
| 7.2. Paradoja del límite elástico | 135 |
| 7.3. Criterios de resistencia en frío y caliente | 138 |
| 7.4. Modelos de comportamiento viscoelástico de materiales | 148 |
| Bibliografía | 153 |
| 8. CORROSIÓN DE REFRACTARIOS Y CERÁMICOS | 155 |
| 8.1. Introducción | 156 |
| 8.2. Aspectos termodinámicos | 157 |
| 8.3. Cinética de corrosión | 161 |
| 8.4. Mecanismos de corrosión. Modelo de desgaste nodal | 165 |
| Bibliografía | 176 |
| 9. MATERIALES DEL SISTEMA SÍLICE-ALÚMINA | 177 |
| 9.1. Introducción | 178 |
| 9.2. Refractarios de sílice | 178 |
| 9.2.1. Propiedades y aplicaciones | 181 |
| 9.3. El estado vítreo | 193 |
| 9.3.1. Vidrios de sílice | 195 |
| 9.4. Refractarios sílico-aluminosos | 214 |
| 9.4.1. Propiedades y aplicaciones | 215 |
| 9.4.2. Reología de las arcillas | 216 |
| 9.4.3. Sialones | 219 |

| | |
|--|-----|
| 9.5. Refractarios aluminosos y de corindón | 236 |
| 9.5.1. Propiedades y aplicaciones | 236 |
| Bibliografía | 250 |
| 10. MATERIALES BÁSICOS | 253 |
| 10.1. Introducción | 254 |
| 10.2. Refractarios de magnesita | 255 |
| 10.2.1. Propiedades y aplicaciones | 256 |
| 10.3. Refractarios de dolomía | 258 |
| 10.3.1. Propiedades y aplicaciones | 258 |
| Bibliografía | 271 |
| 11. ESPINELAS | 273 |
| 11.1. Introducción | 274 |
| 11.2. Propiedades y aplicaciones | 274 |
| Bibliografía | 292 |
| 12. MATERIALES CARBONOSOS | 293 |
| 12.1. Introducción | 294 |
| 12.2. Materiales de carbono-grafito. Propiedades y aplicaciones | 296 |
| 12.3. Materiales de carbono-diamante. Propiedades y aplicaciones | 298 |
| 12.4. Materiales compuestos de matriz cerámica | 299 |
| 12.5. Nanomateriales | 301 |
| Bibliografía | 312 |
| 13. MATERIALES BASE SILICIO | 313 |
| 13.1. Introducción | 314 |
| 13.2. Materiales de carburo de silicio. Propiedades y aplicaciones | 316 |
| 13.3. Materiales de nitruro de silicio. Propiedades y aplicaciones | 318 |
| 13.4. Estadística de Weibull | 319 |
| Bibliografía | 331 |
| 14. MATERIALES BASE CIRCONIO | 333 |
| 14.1. Introducción | 334 |
| 14.2. Materiales de silicato de circonio. Propiedades y aplicaciones | 334 |
| 14.3. Materiales de óxido de circonio. Propiedades y aplicaciones | 336 |
| 14.4. Biomateriales | 341 |
| 14.5. Barreras térmicas | 343 |
| Bibliografía | 356 |
| ÍNDICE DE MATERIAS | 357 |

PRÓLOGO

Cualquiera que se aventure a escribir un libro que pretenda desarrollar por completo las materias relativas al área de los Materiales Refractarios y Cerámicos, debería pedir unas cuantas veces perdón a sus colegas, bien por los errores cometidos, por las simplificaciones excesivas en algunos temas, por las omisiones que inevitablemente se comenten, o por pura y simple ignorancia. No obstante, a juicio de los autores, existe un cuerpo doctrinal básico de la ciencia y la tecnología de los materiales que, actuando como común denominador entre las diferentes familias de materiales, está siempre presente con mayor o menor intensidad en cada una de las cuatro familias de materiales: metales, cerámicos, polímeros y compuestos.

Lamentablemente, la ciencia y tecnología de los materiales puede verse en la actualidad reflejada en la parábola oriental del elefante y los ciegos. Un rey del norte de la India ordenó que se reunieran en cierto lugar todos los habitantes ciegos de la ciudad. Después dispuso que se llevara a un elefante delante de ellos. A unos les mandó palpar la cabeza. Les dijo: “Así es un elefante”. Otros pudieron palpar la oreja, el torso o los pelos de la cola. Luego el monarca fue preguntando a cada uno de ellos: “¿Cómo es un elefante?”, y todos respondieron según la parte que habían palpado:

el elefante es “como un cesto trenzado”, “como la reja de un arado” o “como una escoba”. A continuación, todos se pusieron a discutir manifestando a voz en grito lo que era para cada uno de ellos el elefante. Finalmente, la discusión llegó a tal extremo que se abalanzaron unos contra otros y empezaron a pegarse puñetazos mientras el monarca se reía a carcajadas. Es frecuente comprobar agrias disputas sobre aquellos temas y problemas que algunos consideran capitales en la ciencia y tecnología de materiales. Cada uno de los interlocutores considera que su parcela de trabajo o línea de investigación es fundamental y la única que define el verdadero conocimiento del área. Cada vez resulta mucho más necesario para los profesionales y docentes del área que adquieran un sólido conocimiento global de la disciplina antes de profundizar en sus trabajos e investigaciones específicas.

Una de las aportaciones didácticas más notables del texto es haber enfatizado todos aquellos aspectos básicos comunes del conocimiento de los materiales. Se han intentado incluir todas aquellas aportaciones que han surgido del conocimiento de los materiales metálicos en el estudio de los refractarios y cerámicos. Con este tipo de actitud, se quiere resaltar la importancia que

tienen, para el desarrollo de la ciencia y tecnología de los materiales en el futuro, los conocimientos transversales al utilizar soluciones semejantes para analizar los diferentes problemas que plantea el estudio de la materia condensada. Por otra parte, con este tipo de propuestas o iniciativas los lectores pueden superar el babel conceptual que les puede conducir a pensar equivocadamente, es decir, a creer que están estudiando materias o problemas absolutamente diferentes.

La misión de la ciencia es aprender modos de pensar que sean efectivos para discutir y predecir el comportamiento del mundo observado. Los objetivos que persigue la tecnología son los de utilizar el conocimiento científico para crear, transformar y controlar un determinado objeto o proceso. Los sólidos pueden destruirse a través de distintas vías: esfuerzos mecánicos, temperatura o ataque químico. Todos estos problemas son abordados a lo largo del texto tanto bajo la perspectiva científica como bajo la tecnológica, haciendo especial hincapié en las características estructurales de los materiales: aquellas que tienen relación con la variación de la geometría del sólido debido a su interacción con fuerzas o fluidos corrosivos.

A lo largo de los 14 capítulos del libro se distinguen dos bloques de conocimiento cuyo significado puede interpretarse con la ayuda de la figura 2.1. En un primer bloque se estudian las características del enlace, la estructura y las propiedades de los materiales no metálicos: capítulos 2 a 8. Finalmente, desde los capítulos 9 a 14 se detallan las aplicaciones más notables de los refractarios, cerámicos, vidrios y cementos.

La necesidad que tienen la ciencia y la tecnología modernas de cuantificar propuestas y resultados ha llevado a la mayoría de los textos que se editan de estas materias en la actualidad a incorporar ejercicios de aplicación que validen numéricamente los conceptos teóricos que se desarrollan. A lo largo del libro se resuelven 126 ejercicios de aplicación que refuerzan los conocimientos teóricos y prácticos de la ciencia de los materiales cerámicos y refractarios moderna. El consejo de los autores sería que el estudiante intente asimilar los conceptos básicos del texto y que pueda poste-

riormente acreditarlos tanto en la resolución de los problemas propuestos como en la de aquellos otros de similar naturaleza que pueda imaginar.

Aunque la obra pretende cubrir un área de conocimiento prácticamente inédita de la bibliografía universitaria de posgrado en lengua española, puede también utilizarse, a través de los conceptos manejados en los ejercicios propuestos, como libro en la ciencia de materiales de los programas de grado o doctorado. Para cualquier titulación de grado en Ingeniería, pero sobre todo en el posgrado, puede servir como texto de referencia para los cursos de ciencia y tecnología de materiales no metálicos. Igualmente, puede ser un instrumento de utilidad en aquellas titulaciones de maestría en ciencias donde se quiera conducir el conocimiento de los materiales hacia perspectivas estructurales.

Deseamos desde aquí dar las gracias a todas las personas e instituciones que han contribuido a la realización del texto. En primer lugar, a los profesores José Ignacio Verdeja (catedrático de Metalotecnia) y Ángel Alfonso Fernández (profesor titular de Siderurgia) por sus decisivas aportaciones en el conocimiento de la termodinámica y cinética de las transformaciones de fase, en los criterios de elección y selección de materiales o en el tratamiento y simulación de los mismos. Al profesor José Antonio Pero-Sanz, cuyo texto en su quinta edición *Ciencia y Tecnología de Materiales. Transformaciones, propiedades y selección* ha sido una referencia constante en el proceso de integración de los metales en la ciencia y tecnología de los refractarios y cerámicos.

Los autores queremos también expresar nuestro agradecimiento a los componentes del grupo de investigación de Siderurgia, Metalurgia y Materiales de la Universidad de Oviedo (<<http://uniovi.es/unidades/guposInv>>).

Y, finalmente, a las empresas o grupos industriales siguientes: Thermal Surface Technology-Oviedo; KKK-Electromateriales-Gijón; Asturiana de Zinc-Avilés; Saint Gobain (CIDA-Avilés; CI-Barcelona, CREE-Francia); RHI Refractories (Leoben-Austria) y ArcelorMittal-España.