

# **TECNOLOGÍA DE SUPERFICIES EN MATERIALES**

Consulte nuestra página web: [www.sintesis.com](http://www.sintesis.com)  
En ella encontrará el catálogo completo y comentado



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](http://www.cedro.org)) vela por el respeto de los citados derechos.

# **TECNOLOGÍA DE SUPERFICIES EN MATERIALES**

**José Antonio Puértolas Ráfales  
Ricardo Ríos Jordana  
Miguel Castro Corella  
José Manuel Casals Bustos (eds.)**



© José Antonio Puértolas Ráfales  
Ricardo Ríos Jordana  
Miguel Castro Corella  
José Manuel Casals Bustos (eds.)

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

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.

Depósito Legal: M. 8.383-2010  
ISBN: 978-84-975668-0-3

Impreso en España - Printed in Spain

# RELACIÓN DE AUTORES

## AUTORES/EDITORES

### **José Antonio Puértolas Ráfales**

Catedrático del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

### **Ricardo Ríos Jordana**

Profesor Titular del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

### **Miguel Castro Corella**

Profesor Titular del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

### **José Manuel Casals Bustos**

Profesor Asociado del Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

## AUTORES/COLABORADORES

### **José Ignacio Arnaudas Pontaque**

Profesor Titular del Departamento de Física de la Materia Condensada  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

### **María Belén de Benito Sanz**

Investigadora del Departamento de Tratamientos Superficiales y Procesado de Materiales  
Centro de Tecnologías Electroquímicas (CIDETEC). San Sebastián

### **Lluís Carreras Vendrell**

Director Gerente  
Tratamientos Térmicos Carreras. Barcelona

**Cristina Castro Lapetra**

Responsable de Procesos de Recubrimientos y Materiales  
Departamento de Producción  
BSH Balay, S.A. Zaragoza

**José Antonio Díez Silanes**

Director del Departamento de Tratamientos Superficiales  
Centro de Tecnologías Electroquímicas (CIDETEC). San Sebastián

**Carlos Domínguez Horna**

Investigador Científico y responsable del grupo de Transductores Químicos  
Instituto de Microelectrónica-Centro Nacional de Microelectrónica (IMB-CNM). Barcelona

**José Luis Galán López**

Jefe de Departamento del Laboratorio Industria  
BASF-Coating, S.A. Guadalajara

**Ricardo Ibarra García**

Catedrático de Universidad y Director del Instituto de Nanociencia de Aragón (INA)  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

**Ruth Lahoz Espinosa**

Investigadora del Laboratorio de Procesado de Materiales por Láser  
Instituto Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA-CSIC). Zaragoza

**José Francisco Marco Sanz**

Científico Titular. Departamento de Química-Física de Interfases y Electroquímico.  
Instituto de Química-Física "Rocasolano"-CSIC. Madrid

**Joan Ramón Miguel Campreciós**

Director del Centro de Proyección Térmica  
Centro de Proyección Térmica. Barcelona

**Adolfo Muñoz Alcalde**

Director de Investigación y Desarrollo  
VITREX, S.L. Zaragoza

**Rafael Rodríguez Trías**

Director del Centro de Ingeniería Avanzada de Superficies  
Asociación de la Industria Navarra (AIN). Pamplona

**Fausto Rubio Alonso**

Científico Titular del Departamento de Química-Física de Superficies y Procesos  
Instituto de Cerámica y Vidrio (ICV-CSIC). Madrid

**José María Sánchez Vila**

Director del Departamento Técnico  
Tratamientos Térmicos Carreras. Barcelona

**Francisco Villuendas Yuste**

Profesor Titular del Área de Física Aplicada  
Universidad de Zaragoza. Zaragoza

# ÍNDICE

<b>Prólogo</b> .....	11
----------------------	----

## **Bloque I: TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**

### Capítulo 1: **Tratamientos termoquímicos**

*LL. Carreras, J. M. Sánchez*

1.1. Introducción .....	15
1.2. Cementación .....	15
1.3. Nitruración .....	23
1.4. Boruración .....	30

### Capítulo 2: **Tratamientos mecánicos**

*R. Ríos, J. A. Puértolas, M. Castro, J. M. Casals*

2.1. Introducción .....	33
2.2. El granallado .....	33
2.3. Otros procesos mecánicos superficiales .....	36
2.4. Aplicaciones industriales .....	38
2.5. Técnicas de medida de las tensiones residuales .....	40

### Capítulo 3: **Implantación iónica**

*R. Rodríguez*

3.1. Introducción .....	45
3.2. Fundamentos de la implantación iónica .....	46

3.3. Aspectos industriales de la implantación iónica .....	49
3.4. Tendencias .....	54

**Capítulo 4: Tratamiento superficial por láser**

*R. Lahoz*

4.1. Introducción .....	57
4.2. Tipos de láser y parámetros de control .....	57
4.3. Interacción láser-superficie .....	59
4.4. Tipos de aplicaciones .....	63

**Capítulo 5: Tratamientos superficiales con plasma**

*M. Castro, J. A. Puértolas, R. Ríos, J. M. Casals*

5.1. Introducción .....	71
5.2. Fundamentos del plasma .....	72
5.3. Interacciones entre el plasma y la superficie del material .....	82
5.4. Tratamientos superficiales por plasma y aplicaciones industriales .....	84

**Bloque II: RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES**

**Capítulo 6: Recubrimientos químicos y por inmersión en caliente**

*J. A. Díez, B. de Benito*

6.1. Introducción .....	101
6.2. Deposición electroquímica .....	102
6.3. Deposición química .....	109
6.4. Recubrimientos por conversión .....	111
6.5. Recubrimientos por inmersión en caliente .....	115
6.6. Metalizado de plásticos .....	117

**Capítulo 7: Deposición física en fase vapor (PVD)**

*F. Villuendas, R. Rodríguez*

7.1. Introducción .....	121
7.2. Proceso de PVD .....	122
7.3. Estructura de los recubrimientos por PVD .....	128
7.4. Aplicaciones industriales .....	131



## Capítulo 8: **Deposición química en fase vapor (CVD)**

*C. Domínguez*

8.1. Introducción .....	139
8.2. Principios básicos del CVD .....	139
8.3. Técnica CVD .....	144
8.4. Aspectos industriales .....	150

## Capítulo 9: **Proyección térmica**

*R. Miguel, M. Castro*

9.1. Introducción .....	155
9.2. Materiales y sustratos .....	156
9.3. Técnicas de proyección térmica .....	157
9.4. Microestructura de los recubrimientos por proyección térmica .....	165
9.5. Propiedades y aplicaciones industriales .....	167

## Capítulo 10: **Pinturas**

*C. Castro, J. L. Galán*

10.1. Introducción .....	175
10.2. La pintura: tipos y componentes .....	176
10.3. Fabricación de la pintura .....	179
10.4. Métodos de aplicación .....	181
10.5. Curado de la pintura .....	186
10.6. Control y defectos en la pintura .....	187

## Capítulo 11: **Esmaltes vítreos**

*A. Muñoz, J. A. Puértolas*

11.1. Introducción .....	189
11.2. Estructura de un esmalte vítreo .....	189
11.3. Proceso de esmaltado .....	193
11.4. Características técnicas del esmalte vítreo .....	196
11.5. Aplicaciones .....	197

## Capítulo 12: **Recubrimientos obtenidos por sol-gel**

*F. Rubio*

12.1. Introducción .....	199
12.2. Proceso sol-gel .....	200
12.3. Tecnologías de recubrimiento sol-gel .....	204
12.4. Aplicaciones .....	212
12.5. Ventajas y desventajas del proceso sol-gel .....	217

### **Bloque III: CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE**

#### **Capítulo 13: Caracterización morfológica, mecánica y tribológica de superficies**

*J. A. Puértolas, M. Castro, R. Ríos, J. M. Casals*

13.1. Introducción .....	221
13.2. Perfilometría .....	221
13.3. Medida de espesores .....	225
13.4. Técnicas de indentación .....	226
13.5. Adhesión .....	229
13.6. Tribología .....	230

#### **Capítulo 14: Microscopios de proximidad**

*J. I. Arnaudas*

14.1. Introducción .....	237
14.2. Microscopio túnel de barrido .....	239
14.3. Microscopio de fuerzas atómicas .....	241
14.4. Otras técnicas de microscopía de proximidad .....	250
14.5. Las microscopias de proximidad en la caracterización de materiales ...	253

#### **Capítulo 15: Técnicas espectroscópicas de análisis de superficies**

*F. Marco, M. Castro*

15.1. Introducción .....	257
15.2. Espectroscopia Auger .....	259
15.3. Espectroscopia de fotoelectrones generados por rayos X (XPS) .....	262
15.4. Espectroscopia de dispersión de iones .....	267
15.5. Espectroscopia de masa de iones secundarios (SIMS) .....	272
15.6. Espectroscopia de descarga luminiscente (GDOES) .....	276
15.7. Comparación de técnicas .....	278

### **Bloque IV: NUEVAS TECNOLOGÍAS EN MATERIALES**

#### **Capítulo 16: Nanotecnología**

*R. Ibarra*

16.1. Introducción .....	283
16.2. Nanomateriales y técnicas de preparación .....	283
16.3. Técnicas de nanofabricación .....	291
16.4. Aplicaciones .....	296

# Prólogo

En la actualidad, sectores industriales como la industria automovilística, aeronáutico, máquina-herramienta, biomédico, envases, entre otros, dependen de forma crítica de los tratamientos superficiales y recubrimientos para alcanzar altas prestaciones en multitud de productos frente a fenómenos de corrosión, fricción, desgaste, propiedades ópticas, biocompatibilidad, reactividad química o textura externa.

Dado que la región superficial, más o menos extensa, tiene una estructura interna y propiedades diferentes de las que se manifiestan en el volumen, su estudio se ha realizado considerando la superficie como un ente físico propio. La investigación realizada en este campo en los laboratorios y centros tecnológicos ha permitido un conocimiento específico de la superficie y el desarrollo de procesos y tecnologías para modificarla. Sin embargo, esta ingeniería de superficies no hubiese experimentado una fuerte evolución como la ocurrida en las dos últimas décadas, si no se hubieran podido controlar cuantitativamente los cambios introducidos. Las técnicas de caracterización de la superficie han contribuido a verificar la composición, morfología, microestructura, propiedades mecánicas, físicas y químicas de las capas implantadas o tratamientos realizados sobre la superficie del material. La industria no ha sido ajena al importante papel que desarrolla la superficie del material, y ha incorporado dichas tecnologías a sus procesos productivos para mejorar las prestaciones de sus productos en los ámbitos indicados, sin perder las propiedades estructurales y funcionales del material base.

En este libro se introduce al lector en las principales tecnologías y procesos implicados en la modificación de superficies y en su caracterización, estructurados de tal modo que le confieran el carácter de una disciplina con entidad propia.

Un elemento diferencial de esta obra, y que los autores han considerado de gran importancia en su génesis es el reconocimiento de que para abordarla en toda su extensión no basta con el conocimiento que el mundo académico tiene de la ingeniería de superficies, fruto de la investigación, sino que es fundamental también la participación de centros con un alto componente de I+D+i, institutos de investigación y empresas, expertos en la aplicación de determinadas técnicas y procesos en superficies. La transferencia de conocimientos entre el mundo investigador y el industrial se ve, por tanto, reflejado, en este libro a través de la amplia colaboración de autores provenientes del segundo ámbito.

A partir de esta premisa, el libro ha sido confeccionado por profesores e investigadores de distintas áreas de la Universidad de Zaragoza, y de algunos de sus institutos universitarios (Instituto de Nanociencia de Aragón, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, e Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón), junto a especialistas de distintas industrias, centros e institutos tecnológicos, todos ellos de prestigio reconocido. La diversidad de autores, si bien ha

enriquecido el contenido del libro por sus contribuciones especializadas, ha requerido también por parte de los autores/editores de una fuerte labor de revisión y estructuración para que su contenido, metodología, estilo, extensión y profundidad se adapte al de un libro con un enfoque uniforme y transversal.

El libro ha sido dividido en cuatro bloques, y aunque la clasificación de procesos relacionados con la modificación superficial puede realizarse atendiendo al tipo de elementos que interaccionan con la superficie, en este caso se ha establecido una separación entre aquellos que modifican la microestructura y/o la química de la superficie (tratamiento superficial) y los que suponen la adicción de otro material a la misma (recubrimiento). En el primer grupo se introducen técnicas asociadas con diferentes tipos de energía que provocan el cambio superficial, como la energía térmica, la mecánica, la radiación láser y el plasma. En los recubrimientos se tratan los electroquímicos, los de inmersión en caliente, la deposición física y química en fase vapor, la proyección térmica, las pinturas y esmaltes vítreos, y los recubrimientos por sol-gel. El bloque relativo a la caracterización de la superficie incluye por una parte la morfología, las propiedades mecánicas, y los aspectos tribológicos, y por otra la determinación de la composición superficial mediante las técnicas espectroscópicas de análisis junto a la observación superficial mediante microscopios de proximidad.

Algunas técnicas no se han expuesto en el texto por considerarlas circunscritas casi exclusivamente a la investigación, y actualmente alejadas del mundo industrial, y otras porque aparecen recogidas en el libro "Tecnología de Materiales", publicado con anterioridad por los mismos autores/editores. De cara a completar el contenido de estos dos libros, en éste se ha incluido un capítulo dedicado a la nanotecnología que recoge aspectos de preparación de capas delgadas y técnicas litográficas y de nanoimpresión sobre las mismas.

En definitiva, este libro incorpora la experiencia académica e industrial sobre la ingeniería de superficies y aporta una visión uniforme de la misma, con una orientación docente e informativa que sirva de base para ingenieros, tecnólogos y licenciados relacionados con los diversos sectores industriales donde los materiales estructurales y su modificación superficial constituyan un elemento relevante del proceso tecnológico.

José Antonio Puértolas Ráfales (ed.)