

TECNOLOGÍA DE MATERIALES EN INGENIERÍA

VOLUMEN 2

**MODIFICACIÓN DE SUPERFICIES,
COMPORTAMIENTO EN SERVICIO, UNIONES,
ENSAYOS Y SELECCIÓN DE MATERIALES**

Consulte nuestra página web: **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) vela por el respeto de los citados derechos.

TECNOLOGÍA DE MATERIALES EN INGENIERÍA

VOLUMEN 2

MODIFICACIÓN DE SUPERFICIES,
COMPORTAMIENTO EN SERVICIO, UNIONES,
ENSAYOS Y SELECCIÓN DE MATERIALES

José Antonio Puértolas Ráfales (catedrático)
Ricardo Ríos Jordana (profesor titular)
Miguel Castro Corella (profesor titular)

(Profesores del área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica.
Escuela de Ingeniería y Arquitectura-EINA. Universidad de Zaragoza)



EDITORIAL
SÍNTESIS

© José Antonio Puértolas Ráfales
Ricardo Ríos Jordana
Miguel Castro Corella

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

ISBN: 978-84-9077-388-8
ISBN obra completa: 978-84-9077-405-2
Depósito Legal: M-37.915-2016

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	13
1. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y RECUBRIMIENTO DE MATERIALES....	15
1.1. Introducción	15
1.2. Tratamientos termoquímicos.....	17
1.2.1. Cementación	18
1.2.2. Nitruración	20
1.2.3. Boruración.....	22
1.3. Implantación iónica	22
1.3.1. Parámetros del proceso.....	22
1.3.2. Perfiles de implantación y efectos químicos y estructurales	23
1.3.3. Aplicaciones.....	24
1.3.4. Tendencias.....	25
1.4. Tratamientos por transformación.....	26
1.4.1. Temple por inducción	26
1.4.2. Temple por llama	27
1.4.3. Temple por radiación láser.....	28
1.4.4. Temple por haz de electrones	28
1.5. Tratamientos mecánicos	29
1.5.1. Proceso de granallado	29
1.5.2. Otros procesos.....	30
1.5.3. Beneficios de los procesos mecánicos.....	30
1.6. Tratamientos por láser.....	32
1.6.1. Tipos de láser y parámetros de control.....	33
1.6.2. Interacción láser-superficie.....	33
1.6.3. Aplicaciones.....	34
1.7. Tratamientos mediante plasma	36
1.7.1. Tipos de plasma y sus parámetros característicos	36

1.7.2.	<i>Generación del plasma: parámetros del proceso y reactores</i>	37
1.7.3.	<i>Interacción entre el plasma y la superficie del material</i>	39
1.7.4.	<i>Aplicaciones</i>	39
1.8.	Recubrimientos electroquímicos y químicos.....	42
1.8.1.	<i>Espesor y distribución de corriente</i>	43
1.8.2.	<i>Electrolitos, procesos, equipos industriales y aplicaciones</i>	44
1.8.3.	<i>Deposición química (electroless)</i>	45
1.9.	Recubrimientos por conversión.....	46
1.9.1.	<i>Anodizado</i>	46
1.9.2.	<i>Fosfatado</i>	47
1.9.3.	<i>Cromatado</i>	48
1.10.	Recubrimientos por inmersión en caliente.....	48
1.10.1.	<i>Galvanizado</i>	48
1.10.2.	<i>Otros procesos</i>	49
1.11.	Deposición química en fase vapor (CVD).....	49
1.11.1.	<i>Principios básicos y etapas</i>	50
1.11.2.	<i>Técnicas</i>	51
1.11.3.	<i>Aplicaciones</i>	52
1.12.	Deposición física en fase vapor (PVD).....	53
1.12.1.	<i>Técnicas</i>	54
1.12.2.	<i>Microestructura y estructura de capas</i>	56
1.12.3.	<i>Aplicaciones</i>	56
1.13.	Proyección térmica.....	57
1.13.1.	<i>Técnicas de proyección</i>	58
1.13.2.	<i>Aplicaciones</i>	59
1.14.	Pinturas.....	61
1.14.1.	<i>Tipos, componentes y aplicación</i>	61
1.14.2.	<i>Curado y defectos en la pintura</i>	63
1.15.	Esmaltes vítreos.....	64
1.15.1.	<i>Componentes y estructura de un esmalte vítreo</i>	64
1.15.2.	<i>Proceso de esmaltado</i>	65
1.15.3.	<i>Aplicaciones</i>	66
	Preguntas de autoevaluación.....	67
2.	UNIONES: SOLDADURAS Y ADHESIVOS.....	69
2.1.	Introducción.....	69
2.2.	La soldadura por fusión en metales.....	69
2.3.	Características de la soldadura por fusión.....	71
2.3.1.	<i>Ciclo térmico</i>	71
2.3.2.	<i>Estructura de la zona de fusión</i>	73
2.3.3.	<i>Estructura de la zona afectada térmicamente</i>	74
2.4.	Distorsiones dimensionales y tensiones residuales.....	76
2.5.	Defectos en las soldaduras por fusión.....	76
2.5.1.	<i>Inclusiones y porosidad</i>	77

2.5.2.	<i>Falta o exceso de penetración y otros fallos de forma y tamaño del cordón</i>	77
2.5.3.	<i>Grietas de solidificación</i>	78
2.5.4.	<i>Desgarramiento laminar</i>	78
2.5.5.	<i>Agrietamiento por hidrógeno o agrietamiento en frío</i>	79
2.5.6.	<i>Grietas de recalentamiento</i>	80
2.6.	Soldabilidad.....	80
2.6.1.	<i>Carbono equivalente</i>	81
2.6.2.	<i>Parámetro $Dt_{800-500}$</i>	82
2.7.	Otros procedimientos de soldadura.....	82
2.7.1.	<i>Soldadura débil y soldadura fuerte</i>	83
2.7.2.	<i>Soldadura por resistencia y soldadura aluminotérmica</i>	84
2.7.3.	<i>Soldadura por difusión</i>	85
2.7.4.	<i>Soldadura por fricción y soldadura por fricción y agitación</i>	86
2.7.5.	<i>Soldadura por explosión</i>	87
2.7.6.	<i>Soldadura oxiacetilénica o por llama</i>	87
2.7.7.	<i>Soldadura por láser y por haz de electrones</i>	88
2.8.	Introducción a los adhesivos.....	89
2.8.1.	<i>Mecanismos de la adhesión</i>	90
2.8.2.	<i>Formación de la unión adhesiva</i>	91
2.9.	Clases y componentes de los adhesivos.....	93
2.9.1.	<i>Componente de base</i>	93
2.9.2.	<i>Aditivos</i>	94
2.10.	Diseño y control de calidad de las uniones adhesivas.....	95
2.10.1.	<i>Diseño de uniones</i>	95
2.10.2.	<i>Evaluación de las uniones adhesivas</i>	95
2.11.	Influencia del medio ambiente.....	96
2.11.1.	<i>Temperatura</i>	96
2.11.2.	<i>Interacción con líquidos y gases</i>	97
2.11.3.	<i>Radiación UV y oxígeno atmosférico</i>	97
2.12.	Soldadura de plásticos.....	97
	Problemas resueltos.....	99
	Problemas propuestos.....	101
	Preguntas de autoevaluación.....	103
3.	OXIDACIÓN METÁLICA.....	105
3.1.	Introducción.....	105
3.2.	Tendencia a la oxidación metálica.....	106
3.2.1.	<i>Metales puros</i>	107
3.2.2.	<i>Aleaciones</i>	108
3.3.	Cinética de la oxidación.....	109
3.3.1.	<i>Mecanismos básicos de la oxidación</i>	109
3.3.2.	<i>Comportamientos cinéticos</i>	110
3.3.3.	<i>Capas de óxidos protectoras: índice de Pilling-Bedworth</i>	112
3.4.	Protección frente a la oxidación.....	113

3.4.1. <i>Atmósferas protectoras en laboratorio</i>	113
3.4.2. <i>Atmósferas protectoras en la industria</i>	114
3.4.3. <i>Protección en servicio</i>	115
3.5. Otros procesos de degradación de metales a alta temperatura	115
3.5.1. <i>Carburación y pulverización metálica (metal dusting)</i>	115
3.5.2. <i>Corrosión por halógenos y gases de halogenuros</i>	116
3.5.3. <i>Corrosión por cenizas y sales fundidas</i>	116
3.5.4. <i>Corrosión por metales fundidos</i>	117
3.5.5. <i>Sulfidación</i>	117
Problemas resueltos	118
Problemas propuestos	123
Preguntas de autoevaluación	124
4. CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA	127
4.1. Introducción	127
4.2. Fuerza impulsora para la corrosión electroquímica	128
4.2.1. <i>Potenciales normales de electrodo</i>	128
4.2.2. <i>Ecuación de Nernst</i>	130
4.2.3. <i>Diagramas de Pourbaix</i>	131
4.3. Cinética de la corrosión electroquímica	132
4.3.1. <i>Polarización</i>	132
4.3.2. <i>Diagramas de Evans</i>	133
4.3.3. <i>Pasivación</i>	133
4.4. Técnicas experimentales de medidas de la corrosión	135
4.4.1. <i>Curvas de polarización</i>	136
4.4.2. <i>Cálculo analítico de la velocidad de corrosión</i>	137
4.4.3. <i>Resistencia de polarización R_p</i>	137
4.5. Tipos de corrosión	138
4.5.1. <i>Corrosión uniforme</i>	138
4.5.2. <i>Corrosión galvánica</i>	139
4.5.3. <i>Corrosión por picaduras y en resquicios</i>	140
4.5.4. <i>Corrosión intercrystalina o intergranular</i>	141
4.5.5. <i>Corrosión microbiológica</i>	142
4.5.6. <i>Corrosión y cargas mecánicas</i>	142
4.5.7. <i>Corrosión por corrientes vagabundas o parásitas</i>	144
4.6. Protección frente a la corrosión	144
4.6.1. <i>Protección catódica</i>	145
4.6.2. <i>Protección anódica</i>	146
4.6.3. <i>Uso de inhibidores</i>	147
Problemas resueltos	148
Problemas propuestos	150
Preguntas de autoevaluación	151

5. DEGRADACIÓN DE MATERIALES NO METÁLICOS: POLÍMEROS Y CERÁMICAS.....	155
5.1. Introducción a la degradación de polímeros.....	155
5.2. Degradación física de polímeros.....	157
5.3. Oxidación de polímeros.....	158
5.3.1. <i>Mecanismo de la oxidación</i>	158
5.3.2. <i>Índice de oxidación</i>	159
5.3.3. <i>Solubilidad y difusión del oxígeno</i>	160
5.3.4. <i>Oxidación en el conformado</i>	160
5.3.5. <i>Termoxidación</i>	161
5.3.6. <i>Fotooxidación</i>	161
5.3.7. <i>Antioxidantes</i>	162
5.4. Biodegradación de polímeros.....	163
5.5. Polímeros biocompatibles erosionables.....	164
5.6. Introducción a la degradación de cerámicas.....	166
5.7. Consideraciones termodinámicas.....	167
5.7.1. <i>Materiales cerámicos oxídicos para contener metales fundidos</i>	167
5.7.2. <i>Estabilidad en vacío y en atmósferas inertes</i>	168
5.7.3. <i>Estabilidad en diferentes atmósferas</i>	169
5.8. Aplicación de los diagramas de equilibrio de fases a la degradación y corrosión de cerámicas.....	170
5.9. Aspectos cinéticos de la degradación de cerámicas.....	171
5.9.1. <i>Difusión molecular</i>	172
5.10. Mecanismos de corrosión en cerámicas.....	173
5.11. Ensayos de corrosión en cerámicas.....	173
Preguntas de autoevaluación.....	174
6. TRIBOLOGÍA.....	177
6.1. Introducción.....	177
6.2. Caracterización morfológica de las superficies de contacto.....	177
6.3. Fricción.....	180
6.4. Lubricación.....	184
6.5. Desgaste.....	186
6.5.1. <i>Parámetros de desgaste</i>	186
6.5.2. <i>Tipos y mecanismos de desgaste</i>	187
6.5.3. <i>Tribómetros</i>	191
Preguntas de autoevaluación.....	192
7. FALLOS EN SERVICIO: FRACTURA Y FATIGA.....	195
7.1. Fallos en servicio.....	195
7.2. Fractura en metales y aleaciones. Tenacidad.....	197
7.2.1. <i>Observación de superficies de fractura: Fractografía</i>	198
7.2.2. <i>Tenacidad a la fractura en condiciones de elasticidad lineal (MELF)</i>	199

7.2.3. Tenacidad a la fractura en condiciones de elastoplasticidad (MEPF)	205
7.2.4. Tenacidad en materiales. Factores.....	207
7.3. Fallo por fractura en cerámicas.....	208
7.3.1. Criterios de fallo determinista	209
7.3.2. Criterios probabilísticos. Comportamiento Weibull.....	209
7.4. Fallo por fatiga.....	211
7.4.1. Nucleación y propagación de grietas	212
7.4.2. Curvas tensión-vida (S-N).....	213
7.4.3. Límite de fatiga	214
7.4.4. Fatiga bajo control de la deformación: curvas ϵ -N	215
7.4.5. Fatiga bajo cargas de amplitud variable o aleatorias	218
7.4.6. Crecimiento de grietas en fatiga	219
Problemas resueltos.....	221
Problemas propuestos.....	224
Preguntas de autoevaluación.....	225
8. TERMOFLUENCIA E INTERACCIÓN FATIGA-TERMOFLUENCIA	229
8.1. Introducción.....	229
8.2. Termofluencia. Caracterización y parámetros relevantes	230
8.3. Mecanismos de deformación en termofluencia.....	232
8.3.1. Termofluencia potencial.....	233
8.3.2. Termofluencia difusional.....	234
8.3.3. Mapas de los mecanismos de deformación en termofluencia	234
8.4. Mecanismos de daño y tiempo hasta fractura.....	235
8.4.1. Relaciones empíricas de los datos de termofluencia	235
8.4.2. Evaluación de la termofluencia	237
8.5. La interacción de la fatiga con la termofluencia.....	240
8.5.1. Método de la partición del intervalo de la deformación.....	241
8.5.2. Suma lineal de los daños de fatiga y de termofluencia	244
Problemas resueltos.....	244
Problemas propuestos.....	247
Preguntas de autoevaluación.....	248
9. ENSAYOS MECÁNICOS	251
9.1. Introducción.....	251
9.2. Ensayo de tracción	252
9.2.1. Curva tensión-deformación nominal o ingenieril	252
9.2.2. Curva tensión-deformación verdadera o real	254
9.2.3. Ecuaciones constitutivas	255
9.3. Ensayos de compresión.....	257
9.4. Ensayo de torsión	258
9.5. Ensayo de dureza	259
9.5.1. Macro dureza	259
9.5.2. Microdureza	260

9.6. Ensayos de tenacidad	260
9.6.1. Ensayos de tenacidad al impacto	261
9.6.2. Ensayos de tenacidad a la fractura	261
9.6.3. Correlaciones	268
9.7. Ensayos de fatiga.....	268
9.7.1. Ensayo de nucleación de grietas. Curvas S-N	269
9.7.2. Determinación de límite de fatiga por el método Staircase	269
9.7.3. Ensayo de fatiga en control de la deformación. Curvas $\Delta\varepsilon$ -N	271
9.7.4. Ensayo de velocidad de crecimiento de grietas.....	272
9.8. Ensayo de termofluencia.....	273
9.9. Ensayos sobre chapa de conformado en frío.....	274
9.9.1. Ensayo de determinación del coeficiente de acritud n	274
9.9.2. Ensayo de determinación de los coeficientes de embutibilidad R y ΔR	275
Preguntas de autoevaluación.....	277
10. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	279
10.1. Introducción	279
10.2. Inspección visual	280
10.3. Líquidos penetrantes	280
10.3.1. Líquidos penetrantes y reveladores.....	280
10.3.2. Etapas del procedimiento	281
10.3.3. Interpretación de las indicaciones y aplicaciones	281
10.4. Partículas magnéticas	282
10.4.1. Indicaciones: Factores.....	282
10.4.2. Sistemas de magnetización.....	283
10.4.3. Partículas magnéticas.....	284
10.4.4. Indicaciones producidas por las partículas magnéticas.....	285
10.4.5. Métodos de inspección y sus limitaciones	285
10.4.6. Desmagnetización	285
10.5. Corrientes de “Eddy”, de Foucault o inducidas.....	286
10.5.1. Equipo de ensayo	286
10.5.2. Aplicaciones.....	287
10.6. Ultrasonidos	287
10.6.1. Fundamentos.....	287
10.6.2. Generación y captación de ondas ultrasónicas	289
10.6.3. Modos de ensayo	289
10.6.4. Calibración del equipo	290
10.6.5. Aplicaciones	290
10.7. Emisión acústica	292
10.8. Ensayos radiográficos y gammagráficos	293
10.8.1. Radiaciones ionizantes	293
10.8.2. Indicadores de calidad de imagen.....	295
10.8.3. Aplicaciones.....	295
10.9. Holografía óptica	296
10.10. Termografía infrarroja	297
Preguntas de autoevaluación.....	298

11. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES	301
11.1. Introducción	301
11.2. Técnicas espectroscópicas	302
11.2.1. Espectroscopía de electrones	303
11.2.2. Espectroscopía de iones.....	307
11.2.3. Espectroscopía de descarga luminiscente.....	309
11.3. Estructura: Difracción de rayos X en ángulo rasante	310
11.4. Medida de espesores.....	311
11.4.1. Calotest	311
11.4.2. Elipsometría.....	312
11.5. Técnicas de indentación.....	312
11.6. Técnicas de adhesión	315
11.7. Microscopía óptica confocal.....	316
11.8. Microscopías de proximidad.....	317
11.8.1. Microscopio de fuerzas atómicas.....	318
11.8.2. Microscopio túnel de barrido	322
11.8.3. Otros microscopios.....	323
11.8.4. Microscopías de proximidad en la caracterización de materiales	324
Preguntas de autoevaluación.....	325
12. SELECCIÓN DE MATERIALES EN EL DISEÑO	327
12.1. Introducción.....	327
12.2. La vida del material.....	328
12.3. Relaciones con el diseño	330
12.4. El proceso de selección	331
12.4.1. Las propiedades de los materiales con su estructura.....	334
12.4.2. Definición de las condiciones de servicio.....	335
12.5. Diseño conceptual: método de Ashby y programa CES EduPack.....	335
12.5.1. Funciones, objetivos y restricciones.....	335
12.5.2. Límites de las propiedades.....	335
12.5.3. Índice del material.....	336
12.5.4. El programa CES EduPack.....	336
12.5.5. Ejemplo práctico 1	337
12.5.6. Ejemplo práctico 2	340
12.5.7. Ejemplo práctico 3.....	342
12.5.8. Selección de materiales con forma	344
12.5.9. Otros aspectos de interés del programa de CES EduPack	345
Preguntas de autoevaluación.....	348
SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS PROPUESTOS.....	351
RESPUESTAS DE LAS PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN.....	353
SIGNIFICADO DE LOS ACRÓNIMOS.....	357