



Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

A cura di
MP. Pedefterri
L. Montanaro

P. Colombo
M.V. Diamanti
T. Manfredini
T. Valente



Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

William D. Callister, Jr.

Department of Metallurgical Engineering

The University of Utah

David G. Rethwisch

Department of Chemical and Biochemical Engineering

The University of Iowa

Edizione italiana rivista e integrata sulla base di

Scienza e Ingegneria dei Materiali, III ed.

a cura di

MP. Pedefterri, L. Montanaro

P. Colombo, M.V. Diamanti, T. Manfredini, T. Valente



Titolo originale:

William D. Callister & David G. Rethwisch
Materials Science and Engineering, 8th ed.
Copyright © 2011 John Wiley & Sons, Inc.

Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

Edizione italiana rivista e integrata sulla base di
Scienza e Ingegneria dei Materiali, III ed., EdiSES
Copyright © 2015 EdiSES S.r.l. – Napoli
a cura di
MP. Pedefterri, L. Montanaro
P. Colombo, M.V. Diamanti, T. Manfredini, T. Valente

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2019 2018 2017 2016 2015

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.

L'Editore

L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli eventuali aventi diritto.

Fotocomposizione:

doma book di Di Grazia Massimo – Napoli

Stampato presso la

Tipografia Socrate S.r.l.
Zona Ind. Regnano – Città di Castello (PG)

per conto della

EdiSES s.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli
Tel. 0817441706/07 Fax 0817441705

www.edises.it info@edises.it

ISBN 978 88 7959 8804

Autori

Edizione italiana a cura di:

Paolo Colombo *Università di Padova*

Maria Vittoria Diamanti *Politecnico di Milano*

Tiziano Manfredini *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

Laura Montanaro *Politecnico di Torino*

MariaPia Pedefterri *Politecnico di Milano*

Teodoro Valente *Università degli Studi di Roma “La Sapienza”*

Revisione e coordinamento:

MariaPia Pedefterri *Politecnico di Milano*

Laura Montanaro *Politecnico di Torino*



Prefazione

Il primo e primario obiettivo di questo libro è quello di trattare le basi fondamentali della materia a un livello adeguato agli studenti universitari che hanno già completato i corsi di base di matematica, chimica e fisica. A questo scopo, è stata usata una terminologia che sia familiare agli studenti che per la prima volta entrano in contatto con la disciplina di scienze e ingegneria dei materiali e sono stati definiti e spiegati tutti i termini non familiari.

Il secondo obiettivo è quello di presentare la materia in un ordine logico, dai concetti più semplici a quelli più complessi. Ogni capitolo, infatti, è costruito sulla base del contenuto dei precedenti.

Il terzo obiettivo riguarda la filosofia, che si è cercato di mantenere in tutto il testo: se bisogna trattare un argomento o un concetto, lo si deve trattare con un dettaglio tale che gli studenti abbiano l'opportunità di capirlo completamente, senza dover consultare altre fonti; a ciò si aggiunge che, per la maggior parte degli argomenti trattati, vengono citate applicazioni pratiche. La trattazione è condotta in modo chiaro e conciso per consentire un livello di comprensione appropriato.

Il quarto obiettivo è quello di inserire nel testo elementi volti ad agevolare il processo di apprendimento. Tali ausili didattici includono:

- Numerose illustrazioni a colori e fotografie, che aiutano a visualizzare gli argomenti trattati.
- Obiettivi di apprendimento, che focalizzano l'attenzione degli studenti su ciò che si dovrebbe apprendere studiando il capitolo.
- Inserti “Perché studiare...” e “Argomenti di approfondimento”, che mettono in risalto discussioni cruciali.
- Domande di “Verifica dei concetti”, che permettono agli studenti di verificare la propria comprensione degli argomenti studiati a un livello concettuale.
- Termini chiave e descrizioni delle equazioni evidenziati a margine per un riferimento immediato.
- Domande e problemi di fine capitolo, ideati in modo tale da far progressivamente sviluppare agli studenti la comprensione dei concetti e la familiarità con le tecniche.
- Risposte a problemi scelti, in modo che gli studenti possano controllare le proprie risposte.
- Glossario, lista dei simboli e bibliografia, che facilitano la comprensione degli argomenti trattati.

Il quinto obiettivo è quello di migliorare sia il processo di insegnamento che quello di apprendimento mediante l'uso delle più recenti tecnologie attualmente a disposizione della maggior parte dei docenti e degli studenti di ingegneria.

Uno degli strumenti didattici è uno schema delle interrelazioni tra lavorazione, struttura, proprietà e prestazioni per materiali differenti. La presentazione di una “cronologia per argomento” indica le posizioni (per sezione) in cui sono presenti discussioni che riguardano lavorazione, struttura, proprietà e prestazioni di ciascuno di questi tipi di materiali. Tali discussioni sono introdotte nelle sezioni “Perché studiare...” di determinati capitoli e anche in schemi nei sommari di fine capitolo.

Questa edizione dell'opera si arricchisce di una revisione attenta e mirata dei contenuti voluti dagli Autori W. D. Callister e D. G. Rethwisch, mantenendo però la forte impronta didascalica rivolta agli studenti universitari che affrontano per la prima volta lo studio dei fondamenti della scienza, della tecnologia e dell'ingegneria dei materiali.

La trattazione segue quindi fedelmente l'impronta originale degli Autori, dedicando attenzione particolare a evidenziare e valorizzare la stretta correlazione esistente tra la struttura dei materiali, ai vari livelli di scala dimensionale, le tecniche di trasformazione e lavorazione dei componenti, le loro proprietà e prestazioni in esercizio, per fornire all'ingegnere quei fondamentali strumenti di conoscenza e comprensione della natura e del comportamento dei materiali indispensabili per una selezione, una progettazione e un utilizzo consapevoli, efficaci e sostenibili.

La versione proposta vede tuttavia snellita la trattazione di alcuni aspetti, più teorici e fondamentali, lasciando a docenti e studenti la scelta, di volta in volta, di compiere il corrispondente percorso di approfondimento facendo riferimento ai molti testi che trattano esaustivamente questi temi.

D'altro canto, questa edizione si è invece posta l'obiettivo di argomentare, con accresciuta sistematicità e dovizia di riferimenti, le applicazioni ingegneristiche correnti delle varie categorie di materiali, particolarmente soffermandosi sul loro impiego nel mondo delle costruzioni e dell'ingegneria industriale.

Questo nuovo testo a cura di MariaPia Pederferri e Laura Montanaro, con il contributo al suo adattamento di Paolo Colombo, Maria Vittoria Diamanti, Tiziano Manfredini e Teodoro Valente, è stato arricchito da nuovi capitoli dedicati a materiali di interesse per l'Ingegneria Civile ed Industriale: il Capitolo 10 su leganti, calcestruzzo e malte curato da Laura Montanaro, il Capitolo 12 sul vetro curato da Paolo Colombo, il Capitolo 13 sul legno curato da Maria Vittoria Diamanti.

Materiale di supporto per i docenti

I docenti che utilizzano il testo a scopo didattico possono scaricare dal sito www.edises.it, previa registrazione all'area docenti, le immagini del libro in formato PowerPoint.

Indice generale

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUZIONE | 1 |
| 1.1 Prospettiva storica | 2 |
| 1.2 Scienza e ingegneria dei materiali | 2 |
| 1.3 Perché studiare la scienza e l'ingegneria dei materiali? | 4 |
| 1.4 Classificazione dei materiali | 5 |
| 1.5 Materiali avanzati | 10 |
| 1.6 Esigenze di materiali moderni | 12 |
| 1.7 Correlazioni fra lavorazione/struttura/proprietà/prestazioni | 13 |
| Sommario | 14 |
| Bibliografia | 15 |
| Domande e problemi | 16 |
| 2 STRUTTURA ATOMICA, LEGAMI INTERATOMICI, SOLIDI CRISTALLINI, IMPERFEZIONI | 17 |
| 2.1 Introduzione | 19 |
| <i>Struttura atomica</i> | 20 |
| 2.2 Concetti fondamentali | 20 |
| 2.3 La tavola periodica | 21 |
| <i>Legami atomici nei solidi</i> | 22 |
| 2.4 Legami interatomici primari | 22 |
| 2.5 Legami secondari o legami di van der Waals | 26 |
| <i>Strutture cristalline</i> | 26 |
| 2.6 Concetti fondamentali | 26 |
| 2.7 Celle unitarie | 28 |
| 2.8 Strutture cristalline dei metalli | 28 |
| 2.9 Calcolo della densità teorica | 32 |
| 2.10 Polimorfismo e allotropia | 33 |
| 2.11 Sistemi cristallini | 33 |
| 2.12 Piani cristallografici e densità planare | 36 |
| 2.13 Strutture cristalline compatte | 37 |
| <i>Materiali cristallini e non cristallini</i> | 38 |
| 2.14 Monocristalli | 38 |
| 2.15 Materiali policristallini | 39 |
| 2.16 Anisotropia | 39 |
| 2.17 Solidi non cristallini | 41 |
| <i>Difetti puntuali</i> | 42 |
| 2.18 Vacanze e autointerstiziali | 42 |
| 2.19 Impurezze nei solidi | 43 |

| | |
|---|------------|
| <i>Imperfezioni miste</i> | 44 |
| 2.20 Dislocazioni–difetti lineari | 44 |
| 2.21 Difetti di superficie | 48 |
| 2.22 Difetti di massa o di volume | 50 |
| 2.23 Determinazione della dimensione dei grani | 50 |
| 2.24 La diffusione allo stato solido | 52 |
| 2.25 Diffusione stazionaria | 54 |
| 2.26 Diffusione non stazionaria | 56 |
| 2.27 Fattori che influenzano la diffusione | 56 |
| Sommario | 57 |
| Bibliografia | 63 |
| Domande e problemi | 64 |
| 3 PROPRIETÀ MECCANICHE DEI METALLI | 68 |
| 3.1 Introduzione | 69 |
| 3.2 Concetti di sforzo e di deformazione | 70 |
| <i>Deformazione elastica</i> | 74 |
| 3.3 Comportamento sforzo-deformazione | 74 |
| 3.4 Anelasticità | 76 |
| 3.5 Proprietà elastiche dei materiali | 77 |
| <i>Deformazione plastica</i> | 79 |
| 3.6 Proprietà a trazione | 79 |
| 3.7 Sforzo e deformazione reali | 87 |
| 3.8 Recupero elastico dopo deformazione plastica | 89 |
| 3.9 Deformazione a compressione, a taglio e a torsione | 89 |
| 3.10 Durezza | 90 |
| <i>Variabilità delle proprietà e dei fattori di progettazione e di sicurezza</i> | 96 |
| 3.11 Variabilità delle proprietà dei materiali | 96 |
| 3.12 Fattori di progetto e di sicurezza | 98 |
| Sommario | 100 |
| Bibliografia | 104 |
| Domande e problemi | 104 |
| Problemi di progettazione | 110 |
| 4 DISLOCAZIONI E MECCANISMI PER AUMENTARE LA RESISTENZA | 111 |
| 4.1 Introduzione | 112 |
| <i>Dislocazioni e deformazione plastica</i> | 113 |
| 4.2 Concetti di base | 113 |
| 4.3 Caratteristiche delle dislocazioni | 115 |
| 4.4 Sistemi di scorrimento | 116 |
| 4.5 Deformazione plastica dei materiali policristallini | 117 |
| 4.6 Deformazione per geminazione | 118 |
| <i>Meccanismi di rafforzamento nei metalli</i> | 120 |
| 4.7 Rafforzamento per riduzione della dimensione del grano | 120 |
| 4.8 Rafforzamento per soluzione solida | 122 |
| 4.9 Incrudimento | 123 |

| | |
|--|------------|
| Recovery, ricristallizzazione e accrescimento del grano | 126 |
| 4.10 Recovery | 127 |
| 4.11 Ricristallizzazione | 127 |
| 4.12 Crescita del grano | 131 |
| Sommario | 133 |
| Bibliografia | 136 |
| Domande e problemi | 136 |
| Problemi di progettazione | 138 |
| 5 LA ROTTURA | 139 |
| 5.1 Introduzione | 140 |
| Frattura | 141 |
| 5.2 Fondamenti della frattura | 141 |
| 5.3 Frattura duttile | 141 |
| 5.4 Frattura fragile | 143 |
| 5.5 Principi di meccanica della frattura | 145 |
| 5.6 Valutazione della tenacità a frattura | 154 |
| Fatica | 158 |
| 5.7 Sforzi ciclici | 158 |
| 5.8 La curva $S-N$ | 160 |
| 5.9 Innesco e propagazione della cricca | 162 |
| 5.10 Fattori che influiscono sulla vita a fatica | 164 |
| 5.11 Effetti ambientali | 167 |
| Scorrimento a caldo o creep | 167 |
| 5.12 Comportamento a creep | 168 |
| 5.13 Effetti dello sforzo e della temperatura | 169 |
| 5.14 Metodi di estrapolazione dei dati | 171 |
| 5.15 Leghe per impieghi ad alta temperatura | 172 |
| Sommario | 173 |
| Bibliografia | 177 |
| Domande e problemi | 177 |
| Problemi di progettazione | 181 |
| 6 PROPRIETÀ ELETTRICHE, MECCANICHE E OTTICHE | 182 |
| 6.1 Introduzione | 183 |
| Proprietà elettriche | 184 |
| 6.2 Conduzione elettrica | 184 |
| 6.3 La legge di Ohm | 184 |
| 6.4 Conducibilità elettrica | 185 |
| 6.5 Resistività elettrica dei metalli | 186 |
| 6.6 Caratteristiche elettriche delle leghe commerciali | 188 |
| Semiconduttore | 189 |
| 6.7 Semiconduttore intrinseca | 189 |
| 6.8 Semiconduttore estrinseca | 189 |
| Conduzione elettrica nei ceramici ionici e nei polimeri | 190 |
| 6.9 Concetti di base | 190 |

| | |
|--|------------|
| Comportamento dielettrico | 190 |
| 6.10 Capacità | 191 |
| 6.11 Rigidità dielettrica | 192 |
| 6.12 Materiali dielettrici | 193 |
| Altre caratteristiche elettriche dei materiali | 193 |
| 6.13 Ferroelettricità | 193 |
| 6.14 Piezoelettricità | 193 |
| Proprietà termiche | 194 |
| 6.15 Capacità termica | 194 |
| 6.16 Espansione termica | 194 |
| 6.17 Conducibilità termica | 198 |
| 6.18 Tensioni termiche | 201 |
| Proprietà ottiche | 203 |
| 6.19 Concetti di base | 203 |
| 6.20 Radiazioni elettromagnetiche | 203 |
| 6.21 Interazione della luce con i solidi | 205 |
| Proprietà ottiche dei metalli | 205 |
| 6.22 Concetti di base | 205 |
| Proprietà ottiche dei non metalli | 206 |
| 6.23 Rifrazione e riflessione | 206 |
| 6.24 Colore | 209 |
| 6.25 Opacità e traslucenza negli isolanti | 210 |
| Sommario | 212 |
| Bibliografia | 217 |
| Domande e problemi | 218 |
| Problemi di progettazione | 221 |
| 7 SOLIDIFICAZIONE E TRASFORMAZIONI ALLO STATO SOLIDO | 222 |
| 7.1 Introduzione | 224 |
| 7.2 Definizioni e concetti di base | 224 |
| 7.3 Limite di solubilità | 224 |
| 7.4 Fasi | 225 |
| 7.5 Microstruttura | 226 |
| 7.6 Equilibri di fase e diagrammi di fase | 226 |
| 7.7 Sistemi binari isomorfi | 227 |
| 7.8 Interpretazione dei diagrammi di fase | 228 |
| 7.9 Evoluzione della microstruttura nelle leghe isomorfe | 230 |
| 7.10 Proprietà meccaniche delle leghe isomorfe | 234 |
| 7.11 Sistemi binari eutettici | 234 |
| 7.12 Evoluzione della microstruttura nelle leghe eutettiche | 240 |
| 7.13 Reazioni eutettoidi e peritettiche | 245 |
| Il sistema ferro-carbonio | 246 |
| 7.14 Il diagramma di fase ferro–carburo di ferro ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$) | 246 |
| 7.15 Evoluzione della microstruttura nelle leghe ferro–carbonio | 249 |
| 7.16 L'influenza di altri elementi di lega | 256 |

| | |
|--|------------|
| Trasformazioni di fase | 257 |
| 7.17 Concetti di base | 257 |
| 7.18 La cinetica delle trasformazioni di fase | 257 |
| Variazioni della microstruttura e delle proprietà nelle leghe ferro-carbonio | 258 |
| 7.19 Diagrammi di trasformazione isotermica | 259 |
| 7.20 Diagrammi di trasformazione in raffreddamento continuo | 268 |
| 7.21 Comportamento meccanico delle leghe ferro-carbonio | 271 |
| 7.22 Martensite rinvenuta | 274 |
| 7.23 Riepilogo delle trasformazioni di fase e delle proprietà meccaniche per le leghe ferro-carbonio | 277 |
| Sommario | 278 |
| Bibliografia | 283 |
| Domande e problemi | 284 |
| Problemi di progettazione | 291 |
| 8 MATERIALI METALLICI | 292 |
| 8.1 Introduzione | 293 |
| Tipi di leghe metalliche | 294 |
| 8.2 Leghe ferrose | 294 |
| 8.3 Leghe non ferrose | 308 |
| Lavorazione dei metalli | 318 |
| 8.4 Operazioni di formatura | 319 |
| 8.5 Fusione | 320 |
| 8.6 Altre tecniche | 322 |
| Trattamento termico dei metalli | 324 |
| 8.7 Processi di ricottura | 324 |
| 8.8 Trattamenti termici degli acciai | 326 |
| 8.9 Indurimento per precipitazione | 337 |
| Sommario | 342 |
| Bibliografia | 347 |
| Domande e problemi | 347 |
| Problemi di progettazione | 349 |
| 9 CORROSIONE DEI MATERIALI METALLICI | 351 |
| 9.1 Introduzione | 352 |
| 9.2 Considerazioni elettrochimiche | 353 |
| 9.3 Velocità di corrosione | 359 |
| 9.4 Previsione della velocità di corrosione | 360 |
| 9.5 Passività | 365 |
| 9.7 Forme di corrosione | 366 |
| 9.8 Fattori che influenzano la resistenza a corrosione e ambienti corrosivi | 374 |
| 9.9 Prevenzione della corrosione | 376 |
| Sommario | 378 |
| Bibliografia | 381 |
| Domande e problemi | 381 |
| Problemi di progettazione | 384 |

| | |
|--|------------|
| 10 LEGANTI, MALTE E CALCESTRUZZO | 385 |
| a cura di L. Montanaro | |
| 10.1 Introduzione | 386 |
| <i>Tipi di leganti</i> | 387 |
| 10.2 Leganti aerei | 387 |
| 10.3 Leganti idraulici | 390 |
| 10.4 Durabilità di calcestruzzi e malte | 407 |
| 10.5 Calcestruzzi speciali | 416 |
| Sommario | 418 |
| Bibliografia | 420 |
| Domande e problemi | 420 |
| 11 MATERIALI CERAMICI | 421 |
| 11.1 Introduzione | 422 |
| <i>Struttura dei ceramici</i> | 423 |
| 11.2 Strutture cristalline | 424 |
| 11.3 Ceramici formati da silicati | 433 |
| 11.4 Carbonio | 437 |
| 11.5 Imperfezioni nei ceramici | 441 |
| 11.6 Diffusione nei materiali ionici | 445 |
| 11.7 Diagrammi di fase dei ceramici | 445 |
| <i>Proprietà meccaniche</i> | 448 |
| 11.8 Frattura fragile dei ceramici | 449 |
| 11.9 Comportamento sforzo-deformazione | 453 |
| 11.10 Meccanismi di deformazione plastica | 455 |
| 11.11 Considerazioni meccaniche varie | 456 |
| <i>Tipi e applicazioni dei ceramici</i> | 459 |
| 11.12 Vetro-ceramici | 459 |
| 11.13 Prodotti argillosi | 460 |
| 11.14 Refrattari | 462 |
| 11.15 Abrasivi | 464 |
| 11.16 Ceramici avanzati | 465 |
| <i>Fabbricazione e lavorazione dei ceramici</i> | 468 |
| 11.17 Fabbricazione e lavorazione dei prodotti argillosi | 469 |
| 11.18 Pressatura delle polveri - sinterizzazione | 473 |
| 11.19 Colaggio a nastro | 475 |
| Sommario | 476 |
| Bibliografia | 481 |
| Domande e problemi | 482 |
| Problemi di progettazione | 486 |
| 12 VETRI | |
| a cura di P. Colombo | 487 |
| 12.1 Introduzione | 488 |
| 12.2 Proprietà del vetro | 490 |
| 12.3 Fabbricazione del vetro | 495 |
| 12.4 Principal prodotti vetrari per l'edilizia | 498 |
| 12.5 Altri prodotti vetrari utilizzati in edilizia | 508 |

| | |
|--|------------|
| Sommario | 511 |
| Bibliografia | 512 |
| Domande e problemi | 512 |
| Problemi di progettazione | 513 |
| 13 IL LEGNO | 514 |
| <i>a cura di M.V. Diamanti</i> | |
| 13.1 Introduzione | 515 |
| 13.2 Struttura del legno | 517 |
| 13.3 Caratteristiche | 522 |
| 13.4 Degrado | 533 |
| 13.5 Produzione del legno e dei suoi derivati | 538 |
| Sommario | 544 |
| Bibliografia | 547 |
| Domande e problemi | 547 |
| 14 POLIMERI | 549 |
| 14.1 Introduzione | 551 |
| 14.2 Molecole idrocarburiche | 551 |
| 14.3 Molecole polimeriche | 551 |
| 14.4 Chimica delle molecole polimeriche | 552 |
| 14.5 Peso molecolare | 555 |
| 14.6 Struttura molecolare | 557 |
| 14.7 Configurazioni molecolari | 558 |
| 14.8 Polimeri termoplastici e termoindurenti | 560 |
| 14.9 Copolimeri | 560 |
| 14.10 Cristallinità dei polimeri | 561 |
| <i>Comportamento meccanico dei polimeri</i> | 562 |
| 14.11 Comportamento sforzo-deformazione | 562 |
| 14.12 Deformazione macroscopica | 565 |
| 14.13 Deformazione viscoelastica | 565 |
| 14.14 Frattura dei polimeri | 568 |
| 14.15 Altre proprietà meccaniche | 569 |
| <i>Meccanismi di deformazione e di rafforzamento dei polimeri</i> | 570 |
| 14.16 Deformazione dei polimeri semicristallini | 571 |
| 14.17 Fattori che influenzano le proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini | 571 |
| 14.18 Deformazione degli elastomeri | 571 |
| <i>Fenomeni di cristallizzazione, fusione e transizione vetrosa nei polimeri</i> | 574 |
| 14.19 Fusione | 574 |
| <i>Tipi di polimeri</i> | 576 |
| 14.20 Plastiche | 576 |
| 14.21 Elastomeri | 578 |
| 14.22 Applicazioni varie | 580 |
| <i>Sintesi e lavorazione dei polimeri</i> | 582 |
| 14.23 Polimerizzazione | 582 |
| 14.24 Tecniche di formatura delle plastiche | 583 |
| 14.25 Produzione di fibre e film | 585 |

| | |
|---|------------|
| Sommario | 586 |
| Bibliografia | 590 |
| Domande e problemi | 591 |
| 15 COMPOSITI | 593 |
| 15.1 Introduzione | 594 |
| <i>Compositi rinforzati con particelle</i> | 596 |
| 15.2 Compositi rinforzati con particelle di grandi dimensioni | 596 |
| 15.3 Compositi rinforzati con particelle disperse | 599 |
| <i>Compositi fibro-rinforzati</i> | 599 |
| 15.4 Influenza della lunghezza delle fibre | 599 |
| 15.5 Influenza dell'orientazione e della concentrazione delle fibre | 601 |
| 15.6 La fase fibre | 607 |
| 15.7 La fase matrice | 607 |
| 15.8 Compositi a matrice polimerica | 608 |
| 15.9 Compositi a matrice metallica | 612 |
| 15.10 Compositi a matrice ceramica | 613 |
| 15.11 Compositi carbonio–carbonio | 615 |
| 15.12 Compositi ibridi | 615 |
| 15.13 Lavorazione dei compositi fibro-rinforzati | 616 |
| <i>Compositi strutturali</i> | 619 |
| 15.14 Compositi laminati | 619 |
| 15.15 Pannelli sandwich | 619 |
| Sommario | 621 |
| Bibliografia | 624 |
| Domande e problemi | 624 |
| Problemi di progettazione | 625 |
| Appendice A Sistema internazionale di unità di misura (SI) | A1 |
| Appendice B Proprietà di alcuni materiali ingegneristici | A3 |
| B.1 Densità | A3 |
| B.2 Modulo elastico | A6 |
| B.3 Rapporto di Poisson | A10 |
| B.4 Resistenza e duttilità | A11 |
| B.5 Tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana | A16 |
| B.6 Coefficiente lineare di espansione termica | A17 |
| B.7 Conducibilità termica | A20 |
| B.8 Calore specifico | A23 |
| B.9 Resistività elettrica | A26 |
| B.10 Composizioni delle leghe metalliche | A29 |
| Appendice C Strutture delle unità ripetitive di polimeri comuni | A31 |
| Appendice D Temperature di transizione vetrosa e di fusione di materiali polimerici comuni | A35 |
| GLOSSARIO | G1 |
| RISPOSTE A PROBLEMI SCELTI | R1 |
| INDICE ANALITICO | I1 |

Elenco dei simboli

| | |
|---|---|
| a = parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse x della cella unitaria | e^- = elettrone |
| a = lunghezza di una cricca superficiale | \mathcal{E} = intensità del campo elettrico |
| A = area | E = energia |
| \AA = angstrom | E = modulo elastico o di Young |
| $A\%$ = duttilità, come allungamento percentuale | E_f = energia di Fermi |
| A_i = peso atomico dell'elemento i | E_g = energia della banda di separazione |
| $\%at$ = percentuale atomica | $E_r(t)$ = modulo di rilassamento |
| b = parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse y della cella unitaria | erf = funzione di errore gaussiana |
| \mathbf{b} = vettore di Burgers | es.c = struttura cristallina esagonale compatta |
| c = parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse z della cella unitaria | $\exp = e$, la base dei logaritmi naturali |
| c = velocità delle radiazioni elettromagnetiche nel vuoto | F = forza, interatomica o meccanica |
| C = capacità | \mathcal{F} = costante di Faraday |
| C_i = concentrazione (composizione) della componente i in % in peso | FIA = fattore di impaccamento atomico |
| C'_i = concentrazione (composizione) della componente i in % atomica | G = modulo di taglio |
| C_v, C_p = capacità termica a volume costante e a pressione costante | h = costante di Planck |
| ccc = struttura cristallina cubica a corpo centrale | H = resistenza del campo magnetico |
| cfc = struttura cristallina cubica a facce centrali | HB = durezza Brinell |
| CVN = Charpy con intaglio a V | HK = durezza Knoop |
| d = diametro | (hkl) = indici di Miller per un piano cristallografico |
| d = diametro medio del grano | HRB, HRF = durezza Rockwell: scale B e F |
| D = coefficiente di diffusione | HR15N, HR45W = durezza Rockwell superficiale: scale 15N e 45W |
| D = spostamento dielettrico | HV = durezza Vickers |
| d_{hkl} = distanza interplanare per piani con indici di Miller h, k e l | i = densità di corrente |
| DP = grado di polimerizzazione | I = corrente elettrica |
| e = carica elettrica per elettrone | I = intensità della radiazione elettromagnetica |
| | i_c = densità di corrente di corrosione |
| | J = flusso di diffusione |
| | J = densità di corrente elettrica |
| | k = costante di Boltzmann |
| | k = conducibilità termica |
| | K_c = tenacità a frattura |

| | | |
|------------------|--|--|
| K_{lc} | = tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana per apertura della cricca secondo il modo I | $S\%$ = duttilità, come riduzione percentuale della sezione |
| l | = lunghezza | t = tempo |
| l_c | = lunghezza critica della fibra | T = temperatura |
| LF% | = percentuale di lavorazione a freddo | T_f = temperatura di fusione |
| \ln | = logaritmo naturale | T_g = temperatura di transizione vetrosa |
| \log | = logaritmo in base 10 | t_r = tempo di vita a rottura |
| \overline{M}_n | = peso molecolare medio numerico di un polimero | TEM = microscopia elettronica (o microscopio elettronico) a trasmissione |
| \overline{M}_w | = peso molecolare medio ponderale di un polimero | U_r = modulo di resilienza |
| mol% | = percentuale molare | $[uvw]$ = indici per una direzione cristallografica |
| n | = numero quantico principale | v = velocità |
| n | = numero di atomi per cella unitaria | V = differenza di potenziale elettrico (voltaggio) |
| n | = esponente di incrudimento | V_C = volume della cella unitaria |
| n | = numero di elettroni in una reazione elettrochimica | V_C = potenziale di corrosione |
| n | = numero di elettroni di conduzione per metro cubo | V_H = tensione di Hall |
| n | = indice di rifrazione | V_i = frazione di volume della fase i |
| n' | = per i ceramici, il numero di unità formula per cella unitaria | %vol = percentuale in volume |
| N | = numero di cicli di fatica | VPC = velocità di penetrazione di corrosione |
| N_A | = numero di Avogadro | W_i = frazione di massa della fase i |
| N_f | = vita a fatica | x = lunghezza |
| n_i | = concentrazione intrinseca dei portatori di carica (elettroni e lacune) | x = coordinata spaziale |
| p | = numero di lacune per metro cubo | y = coordinata spaziale |
| P | = polarizzazione dielettrica | Y = parametro o funzione adimensionale nell'espressione della tenacità alla frattura |
| % peso | = percentuale in peso | z = coordinata spaziale |
| Q | = energia di attivazione | α = parametro reticolare: angolo fra gli assi $y-z$ della cella unitaria |
| Q | = quantità di carica immagazzinata | α, β, γ = designazioni di fasi |
| r | = distanza interatomica | α_l = coefficiente lineare di espansione termica |
| r | = velocità di reazione | β = parametro reticolare: angolo fra gli assi $x-z$ della cella unitaria |
| R | = raggio atomico | γ = parametro reticolare: angolo fra gli assi $x-y$ della cella unitaria |
| R | = costante dei gas | γ = deformazione di taglio |
| r_A, r_C | = raggi ionici dei cationi e degli anioni | Δ = variazione finita del parametro scritto di seguito |
| rapporto P-B | = rapporto Pilling–Bedworth | ϵ = deformazione nominale |
| S | = ampiezza di sforzo | ϵ = permittività dielettrica |
| | | ϵ_r = costante dielettrica o permittività relativa |

$\dot{\epsilon}_s$ = velocità di creep stazionario
 ϵ_T = deformazione reale
 η = viscosità
 η = sovratensione
 θ = angolo di diffrazione di Bragg
 θ_D = temperatura di Debye
 λ = lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica
 μ_e = mobilità degli elettroni
 μ_h = mobilità delle lacune
 ν = rapporto di Poisson
 ν = frequenza della radiazione elettromagnetica
 ρ = densità
 ρ = resistività elettrica
 ρ_t = raggio di curvatura all'apice della cricca
 σ = sforzo nominale, di trazione o di compressione
 σ = conducibilità elettrica
 σ^* = resistenza a trazione della fibra (composito)
 σ_c = sforzo critico per la propagazione di una cricca
 σ_{fs} = resistenza a flessione
 σ_m = sforzo massimo
 σ_m = sforzo medio
 σ'_m = sollecitazione sulla matrice corrispondente alla rottura del composito
 σ_R = resistenza a rottura
 σ_s = limite di snervamento

σ_T = sforzo reale
 σ_w = sforzo di sicurezza o di lavoro
 τ = sforzo di taglio
 τ_c = forza di legame all'interfaccia fibra–matrice o resistenza allo snervamento di taglio della matrice
 τ_{stic} = sforzo di taglio indotto critico

PEDICI

c = composito
 cd = composito a fibre discontinue
 cl = direzione longitudinale (composito fibroso allineato)
 ct = direzione trasversale (composito fibroso allineato)
 f = finale
 f = alla frattura
 f = fibra
 i = istantaneo
 m = matrice
 m, \max = massimo
 \min = minimo
 0 = originale
 0 = all'equilibrio
 0 = nel vuoto

riale sia altamente amorf o, se semicristallino, che abbia cristalliti molto piccoli. I fluorocarburi hanno un basso coefficiente di attrito e sono estremamente resistenti all'attacco di gran parte degli agenti chimici, anche a temperature relativamente alte. Essi sono usati come rivestimenti per utensili da cucina antiaderenti, per cuscinetti e guaine isolanti e per componenti elettronici ad alta temperatura.

Tabella 14.4 Nomi commerciali, caratteristiche e applicazioni tipiche di alcuni materiali plasticci

| <i>Tipo di materiale</i> | <i>Nome commerciale</i> | <i>Principali caratteristiche di applicazione</i> | <i>Applicazioni tipiche</i> |
|---------------------------------------|---|--|--|
| | | <i>Termoplastiche</i> | |
| Acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS) | Abson Cycolac Kralastic Lustran Novodur Tybrne | Rilevante resistenza e tenacità, resistente alla distorsione da calore; buone proprietà elettriche; infiammabile e solubile in alcuni solventi organici | Rivestimenti di frigoriferi, strumenti per giardinaggio, giocattoli, dispositivi di sicurezza delle autostrade |
| Acrilici [poli(metilmetacrilato)] | Acrylite Diakon Lucite Plexiglas | Rilevante trasparenza e resistenza agli agenti atmosferici; proprietà meccaniche solo discrete | Lenti, rivestimenti trasparenti per aerei, dispositivi per disegno, insegne all'aperto |
| Fluorocarburi (PTFE o TFE) | Teflon Fluon Halar Hostaflon TF Neoflon | Chimicamente inerti in quasi tutti gli ambienti, eccellenti proprietà elettriche; basso coefficiente di attrito; possono essere usati sino a 260°C; relativamente deboli e scarse proprietà di scorimento a freddo | Guarnizioni anticorrosive, tubi e valvole per l'industria chimica; cuscinetti, rivestimenti antiaderenti, parti elettroniche ad alta temperatura |
| Poliammidi (nylon) | Nylon Baylor Durethan Herox Nomex Ultramid Zytel | Buona resistenza meccanica, resistenza all'abrasione e tenacità; basso coefficiente di attrito; assorbe l'acqua e alcuni altri liquidi | Cuscinetti, ingranaggi, camme, boccole, maniglie, guaine isolanti per fili e cavi |
| Policarbonati | Calibre Iupilon Lexan Makrolon Merlon | Dimensionalmente stabili; scarso assorbimento d'acqua; trasparenti; ottima resistenza agli urti e duttilità; resistenza non eccezionale agli agenti chimici | Elmetti di protezione, lenti, globi diffusori di luce, supporti per pellicole fotografiche |
| Polietileni | Alathon Alkathene Fortiflex Hi-fax Petrothene Rigidex Rotothene Zendel | Resistenti chimicamente e isolanti elettrici; tenace e con coefficiente d'attrito relativamente basso; bassa resistenza meccanica e bassa resistenza agli agenti atmosferici | Bottiglie flessibili, giocattoli, bicchieri, parti di batterie, portaghiaccio, pellicole per avvolgere |
| Polipropileni | Herculon Meraklon Moplen Poly-pro Pro-fax Propak Propathene | Resistenti alla deformazione da calore; eccellenti proprietà elettriche e resistenza alla fatica; chimicamente inerti; relativamente poco costoso; bassa resistenza alla luce UV | Bottiglie sterilizzabili, pellicole di imballaggio, involucri di televisori, valigie |

Tabella 14.4 (Continua)

| <i>Tipo di materiale</i> | <i>Nome commerciale</i> | <i>Principali caratteristiche di applicazione</i> | <i>Applicazioni tipiche</i> |
|--------------------------------|--|---|--|
| Termoplastiche | | | |
| Polistireni | Carinex Dylene Hostyren Lustrex Styron Vestyron | Eccellenti proprietà elettriche e trasparenza ottica; buona stabilità dimensionale e termica; relativamente poco costosi | Piastrelle da parete, contenitori per batterie, giocattoli, pannelli da lampade per interni, applicazioni per l'edilizia |
| Vinilici | Darvic Exon Geon Pliovic Saran Tygon Vista | Buoni materiali di impiego generale e a basso costo; normalmente rigidi, ma possono essere flessibili se si aggiungono plastificanti; spesso copolimerizzati, suscettibili a deformazione se scaldati | Coperture per pavimenti, tubi, isolanti di fili elettrici, tubi per innaffiare, dischi per fonografo |
| Poliesteri (PET o PETE) | Celanar Dacron Eastapak Hylar Melinex Mylar Petric | Una delle più tenaci pellicole plastiche; eccellente resistenza alla fatica e allo strappo, resistenza a umidità, acidi, grassi, oli e solventi | Nastri magnetici di registrazione; indumenti, cordature di pneumatici per autoveicoli, contenitori per bevande |
| Polimeri termoindurenti | | | |
| Epossidi | Araldite Epikote Epon Epi-rez Lekutherm Lytex | Eccellente combinazione di proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione; dimensionalmente stabili; buona adesività; costo relativamente basso; buone proprietà elettriche | Stampi elettrici, lavandini, adesivi, rivestimenti protettivi, usati con fibre di vetro per laminati |
| Resine fenoliche | Bakelite Amberol Arofene Durite Resinox | Eccellente stabilità termica sopra i 150°C; possono essere combinate con un gran numero di resine, filler, etc.; di basso costo | Coperture di motori, telefoni, distributori automatici, impianti elettrici |
| Poliesteri | Aropol Baygal Derakane Laminac Selectron | Eccellenti proprietà elettriche e basso costo; possono essere formulati per uso a temperatura ambiente o ad alte temperature; spesso rinforzati con fibre | Elmetti, barche in vetroresina, componenti della carrozzeria di auto, sedie, ventilatori |

Fonte: Da C. A. Harper (Editor), *Handbook of Plastics and Elastomers*. Copyright © 1975 by McGraw-Hill Book Company. Riprodotta per gentile concessione.

14.21 ELASTOMERI

Le caratteristiche e il meccanismo di deformazione degli elastomeri sono stati illustrati in precedenza, per cui ora si parlerà dei diversi tipi di elastomeri.

La Tabella 14.5 riporta le proprietà e le applicazioni degli elastomeri più comuni; queste proprietà sono tipiche e, ovviamente, dipendono dal grado di vulcanizzazione e dall'utilizzo o meno di rinforzi. La gomma naturale è ancora largamente utilizzata, perché presenta un buon insieme di proprietà ampie. L'elastomero sintetico più importante è, invece, l'SBR, che viene usato, rinforzato con nerofumo, soprattutto nei pneumatici delle automobili. Un altro elastomero sintetico di uso comune è l'NBR, che resiste molto bene al degrado e al rigonfiamento.

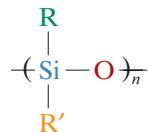
Tabella 14.5 Caratteristiche più importanti e applicazioni tipiche di cinque elastomeri commerciali

| <i>Tipo chimico</i> | <i>Nome commerciale (comune)</i> | <i>Allungamento (%)</i> | <i>Campo di temperatura di utilizzo (°C e K)</i> | <i>Principali caratteristiche di applicazione</i> | <i>Applicazioni tipiche</i> |
|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--|---|---|
| Poliisoprene naturale | Gomma naturale (NR) | 500-760 | Da -60 a 120 (da 213 a 393) | Eccellenti proprietà fisiche; buona resistenza a taglio, foratura e abrasione; bassa resistenza a calore, ozono e olio; buone proprietà elettriche | Gomme d'auto e tubi; tacchi e suole; guarnizioni |
| Stirene-butadiene copolimero | GRS, Buna S (SBR) | 450-500 | Da -60 a 120 (da 213 a 393) | Buone proprietà fisiche; eccellente resistenza alla abrasione, non resistente a olio, ozono e agenti atmosferici; proprietà elettriche buone, ma non eccellenti | Le stesse della gomma naturale |
| Copolimero acrilonitrile-butadiene | Buna A, Nitrile (NBR) | 400-600 | Da -50 a 150 (da 223 a 423) | Eccellente resistenza agli oli vegetali, animali e di petrolio; scadenti proprietà a bassa temperatura; proprietà elettriche non eccellenti | Tubi flessibili per benzina, prodotti chimici e oli; guarnizioni circolari; suole e tacchi |
| Cloroprene | Neoprene (CR) | 100-800 | Da -50 a 105 (da 223 a 378) | Eccellente resistenza all'ozono, al calore e agli agenti atmosferici; buona resistenza all'olio; eccellente resistenza alla fiamma; nelle applicazioni elettriche è inferiore alla gomma naturale | Cavi e fibre; rivestimenti di serbatoi chimici; cinghie, tubi flessibili e guarnizioni |
| Polisilossano | Silicone (VMQ) | 100-800 | Da -115 a 315 (da 158 a 588) | Eccellente resistenza ad alte e basse temperature; bassa resistenza meccanica; eccellenti proprietà elettriche | Isolamento per alta e bassa temperatura; sigilli; membrane; tubazioni per usi medici e alimentari |

Fonti: Da C. A. Harper (Editor), *Handbook of Plastics and Elastomers*. Copyright © 1975 by McGraw-Hill Book Company, riproduzione autorizzata; e *Materials Engineering's Materials Selector*, Copyright Penton/IPC.

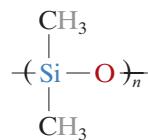
Per molte applicazioni (per esempio, pneumatici delle automobili), le proprietà meccaniche delle gomme, anche se vulcanizzate, non sono soddisfacenti in termini di resistenza a trazione, resistenza all'abrasione, resistenza allo strappo e rigidità. Queste caratteristiche possono essere ulteriormente migliorate con additivi, quali il nerofumo.

È necessario, infine, accennare alle gomme siliconiche. Per questi materiali, la catena di base alterna atomi di silicio e ossigeno:



dove R e R' rappresentano gli atomi legati lateralmente alla struttura principale, quali l'idrogeno, o gruppi di atomi come il CH₃. Per esempio, il polidimetilsilossano

ha l'unità ripetitiva seguente:



Naturalmente, in quanto elastomeri, questi materiali presentano legami trasversali tra le catene.

Gli elastomeri siliconici posseggono un alto grado di flessibilità a basse temperature [sino a -90°C (183 K)] e sono ancora stabili a temperature elevate, dell'ordine dei 250°C (523 K). Inoltre, essi sono resistenti agli agenti atmosferici e agli oli lubrificanti, cosa che li rende particolarmente adatti per applicazioni nei motori automobilistici. La biocompatibilità è un altro dei loro vantaggi e, perciò, vengono spesso impiegati nel settore medicale, come ad esempio per tubi che portano il sangue. Un'ulteriore caratteristica attraente è che alcune gomme al silicone vulcanizzano a temperatura ambiente (gomme RTV).



Verifica dei concetti 14.2

Nei mesi invernali, la temperatura in alcune zone dell'Alaska può scendere al di sotto di -55°C (218 K). In queste condizioni, quale elastomero, fra l'isoprene naturale, lo stirene-butadiene, l'acrilonitrile butadiene, il cloroprene e il polisilossano, sarebbe più adatto per gli pneumatici delle automobili? Perché?



Verifica dei concetti 14.3

I polimeri siliconici possono essere ottenuti allo stato liquido a temperatura ambiente. Citare le differenze nella struttura molecolare tra questi e gli elastomeri siliconici.

14.22 APPLICAZIONI VARIE

Fibre

fibra

Le **fibre** polimeriche sono costituite da polimeri in grado di essere filati in lunghi filamenti che presentano un rapporto lunghezza/diametro di almeno 100:1. La maggior parte delle fibre polimeriche commerciali è utilizzata nell'industria tessile, per realizzare stoffe e tessuti. Le fibre aramidiche sono invece impiegate nei materiali compositi. Per essere utilizzata come materiale tessile, una fibra polimerica deve avere proprietà fisiche e chimiche ben determinate. Durante l'uso, infatti, le fibre possono subire vari tipi di deformazioni meccaniche, per stiramento, torsione, taglio e abrasione. Di conseguenza, le fibre devono presentare elevata resistenza a trazione (per un ampio intervallo di temperatura) e elevato modulo elastico, insieme a resistenza all'abrasione. Queste proprietà sono governate dalla struttura chimica delle catene del polimero ed anche dal processo di filatura della fibra.

Rivestimenti

I materiali vengono spesso protetti con dei rivestimenti, che hanno il compito di assolvere a più funzioni: (1) proteggere da un ambiente che può corrodere o comunque deteriorare, (2) migliorare l'aspetto estetico e (3) isolare elettricamente. Diversi componenti dei materiali di rivestimento sono polimeri, la maggior parte dei quali di origine organica. Questi rivestimenti organici possono essere suddivisi in varie classi: pitture, vernici, smalti, lacche e gommalacca.

Molti dei comuni rivestimenti sono *lattici*. Un lattice è una sospensione stabile di piccole particelle polimeriche insolubili disperse in acqua. Questi materiali si stanno sempre più diffondendo, perché non contengono grandi quantità di solventi organici che poi vengono emessi nell'ambiente – cioè presentano basse emissioni di composti organici volatili (VOC). I composti organici volatili reagiscono con l'atmosfera per produrre smog. I grandi utilizzatori di rivestimenti, come le industrie automobilistiche, continuano a ridurre le emissioni di VOC per osservare le norme ambientali.

Adesivi

adesivo

Un **adesivo** è una sostanza che viene usata per unire le superfici di due materiali solidi (chiamati *aderendi*). I meccanismi responsabili dell'adesione sono di due tipi: meccanico e chimico. Nell'adesione meccanica si verifica una vera e propria penetrazione dell'adesivo nei pori e nelle scabrosità delle due superfici. L'adesione chimica, invece, si basa sull'instaurarsi di forze intermolecolari tra l'adesivo e i materiali da unire; tali forze possono essere di tipo covalente o di van der Waals; se l'adesivo contiene gruppi polari, ne derivano legami di van der Waals migliori.

Sebbene gli adesivi naturali (colla animale, caseina, amido e colofonia) siano ancora usati in molte applicazioni, si trovano oggi sul mercato numerosi nuovi adesivi basati su polimeri sintetici, quali poliuretani, polisilossani (siliconi), resine epoxidiche, poliimmidi, acrilici e materiali gommosi. Gli adesivi vengono usati per unire materiali di diverso tipo, quali metalli, ceramici, polimeri, compositi, pelle, ecc. La scelta dell'adesivo da impiegare dipende dai seguenti fattori: (1) tipi di materiali da unire e loro porosità; (2) proprietà adesive richieste (vale a dire, se il legame debba essere temporaneo o permanente); (3) temperature massime e minime a cui può essere assoggettato; (4) condizioni di lavorazione.

Gli adesivi presentano alcuni vantaggi rispetto ad altre tecniche di giunzione (ad esempio, rispetto alla rivettatura, alla bullonatura e alla saldatura per fusione), quali un peso minore, la capacità di collegare tra loro materiali dissimili e componenti soffili, una migliore resistenza alla fatica e minori costi di produzione. Rappresentano, inoltre, la tecnologia ottimale nel caso in cui diventi essenziale posizionare con grande precisione i componenti e avere elevata velocità di adesione. Il principale svantaggio dei giunti adesivi è rappresentato dalle limitazioni nella temperatura di utilizzo; i polimeri mantengono la loro integrità meccanica solamente a temperature relativamente basse e la resistenza diminuisce rapidamente al crescere della temperatura. La temperatura massima possibile per un uso continuativo di alcuni dei più recenti polimeri è 300°C. I giunti adesivi si possono trovare in molte applicazioni, specialmente nell'industria aerospaziale, automobilistica ed edile, nel settore degli imballaggi e in alcuni articoli casalinghi.

Film

In tempi relativamente recenti, i materiali polimerici hanno trovato largo impiego nella produzione di *film* sottili. Questi hanno spessori tra 0.025 e 0.125 mm e sono fabbricati e impiegati diffusamente in forma di sacchi per confezionare non solo prodotti alimentari, ma anche altri prodotti, come tessuti e capi di abbigliamento e numerosi altri. Tra le caratteristiche dei materiali usati come film che si ritengono importanti, vi sono bassa densità, alto grado di flessibilità, elevate resistenze a rottura, alta resistenza allo strappo, resistenza all'umidità e ad agenti chimici, bassa permeabilità ad alcuni gas, specialmente al vapor d'acqua. Alcuni dei polimeri che soddisfano questi criteri, e che sono quindi prodotti sotto forma di film, sono il polietilene, il polipropilene, il cellofan e l'acetato di cellulosa.

Schiume

schiuma

Le **schiume** sono materiali plastici contenenti una percentuale in volume relativamente alta di piccoli pori e bolle d'aria intrappolate. Vengono usati in forma di schiume sia i polimeri termoplastici che i termoindurenti, quali il poliuretano, la gomma, il polistirene e il polivinilcloruro. Le schiume sono usate comunemente come imbottiture nelle auto e nell'arredamento, oltre che negli imballaggi e come isolanti

termici. Il processo di espansione viene spesso realizzato introducendo un agente schiumogeno che, per riscaldamento, si decomponga, liberando un gas. Le bolle di gas diffondono da un capo all'altro della massa fluida e, dopo raffreddamento, restano in forma di porosità, dando origine a una struttura spugnosa. Viene prodotto lo stesso effetto sciogliendo un gas inerte in un polimero fuso sotto alta pressione. Quando la pressione viene rapidamente ridotta, il gas fuoriesce dalla soluzione e forma bolle e pori, che rimangono intrappolati nel solido nel corso del raffreddamento.

Sintesi e lavorazione dei polimeri

Le grandi macromolecole dei polimeri commercialmente interessanti devono essere sintetizzate a partire da sostanze che hanno molecole più piccole mediante un processo detto di polimerizzazione. Le proprietà di un polimero possono, inoltre, essere modificate o migliorate con l'aggiunta di additivi. Infine, un pezzo finito, nella forma desiderata, deve poter essere modellato con il processo di formatura. Questa sezione tratta dei processi di polimerizzazione, dei diversi additivi e delle specifiche procedure di formatura.

14.23 POLIMERIZZAZIONE

La sintesi di queste grandi molecole (polimeri) è chiamata *polimerizzazione* e consiste nel processo attraverso il quale monomeri vengono uniti insieme per generare lunghe catene composte da unità ripetitive. In generale, le materie prime per i polimeri sintetici sono ricavate dai derivati del carbonio, del gas naturale e del petrolio. Le reazioni attraverso le quali avviene la polimerizzazione si possono raggruppare, in funzione del meccanismo di reazione, in due classi generali, l'addizione e la condensazione, come mostrato di seguito.

Polimerizzazione per addizione

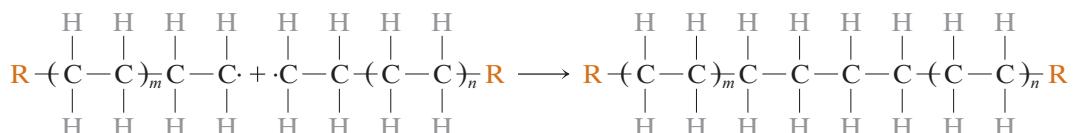
polimerizzazione per addizione

La **polimerizzazione per addizione** (a volte chiamata *polimerizzazione per reazione a catena*) è un processo attraverso il quale unità monomeriche vengono aggiunte una alla volta in modo simile a una catena per formare una macromolecola lineare; la composizione della molecola prodotta risulta un multiplo esatto del monomero reagente.

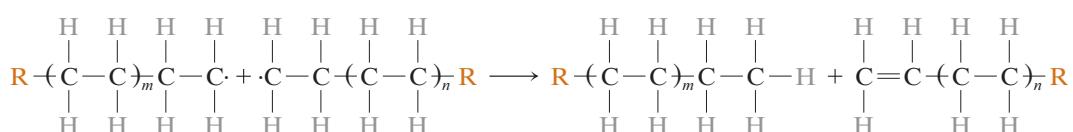
Nella polimerizzazione per addizione si distinguono tre stadi: iniziazione, propagazione e terminazione. Durante la fase di iniziazione si verifica una reazione tra un iniziatore (o catalizzatore) e l'unità monomerica, che dà origine a un centro attivo, in grado di propagarsi successivamente.

Durante la propagazione, la molecola cresce in modo lineare mediante addizioni successive di unità monomeriche alla catena molecolare attiva.

La propagazione può finire o terminare in diverse maniere. Un primo caso si ha quando le estremità attive di due catene in fase di propagazione reagiscono o si legano tra loro e formano una molecola secondo la seguente reazione:



L'altra possibilità di terminazione prevede che due molecole in crescita reagiscano tra loro a formare due "catene morte" e in questo modo termina la crescita di ciascuna catena:



La polimerizzazione per addizione viene impiegata per la sintesi del polietilene, del polipropilene, del polivinilcloruro e del polistirene e di gran parte dei copolimeri.

Polimerizzazione per condensazione

polimerizzazione per condensazione

La **polimerizzazione per condensazione** (o *reazione a stadi*) porta alla formazione di polimeri mediante reazioni chimiche intermolecolari in fasi successive (o stadi), che possono interessare più di un tipo di monomero; con questo processo generalmente si ottiene un prodotto di reazione secondario a basso peso molecolare, come ad esempio l'acqua, che viene poi eliminato. Questo processo è ripetuto in successione. I tempi di reazione per la polimerizzazione per condensazione sono generalmente più lunghi di quelli per addizione.

14.24 TECNICHE DI FORMATURA DELLE PLASTICHE

Per la formatura dei materiali polimerici vengono impiegate numerose tecniche. Il metodo prescelto per un dato polimero dipende da diversi fattori: (1) se il materiale è termoplastico o termoindurente; (2) se termoplastico, la temperatura alla quale rammollisce; (3) la stabilità agli agenti atmosferici del materiale durante la formatura; (4) la geometria e le dimensioni del prodotto finito. Vi sono, inoltre, molte affinità tra queste tecniche e quelle utilizzate per produrre metalli e ceramici.

La produzione di materiali polimerici avviene normalmente a temperature elevate e spesso sotto pressione. I termoplastici vengono lavorati a temperature superiori alla loro temperatura di transizione vetrosa, se amorfi, o sopra la loro temperatura di fusione, se semicristallini; durante il raffreddamento, il manufatto deve essere mantenuto sotto pressione per mantenere la forma voluta. Il significativo beneficio economico che si ottiene con l'uso dei termoplastici deriva dal fatto che si possono riciclare; gli scarti a fine vita in polimero termoplastico possono essere, infatti, rifiuti e dar luogo a nuovi prodotti.

La fabbricazione di polimeri termoindurenti viene realizzata di norma in due stadi. Prima viene preparato un polimero lineare (a volte chiamato prepolidero) allo stato liquido, con basso peso molecolare. Questo materiale viene poi trasformato nel prodotto finito duro e rigido in una seconda fase di lavorazione, che normalmente viene effettuata in uno stampo della forma desiderata. Questa seconda fase, chiamata *cura* o *reticolazione*, può avvenire con riscaldamento e/o aggiunta di catalizzatori e, comunque, spesso sotto pressione. Durante la cura, avvengono modificazioni chimiche e strutturali a livello molecolare e si forma una struttura reticolata. Dopo la cura, i polimeri termoindurenti possono essere rimossi dallo stampo ancora caldi, in quanto essi sono oramai dimensionalmente stabili. I termoindurenti sono difficili da riciclare, non fondono, sono utilizzabili a temperature più alte dei termoplastici e sono chimicamente più inertii.

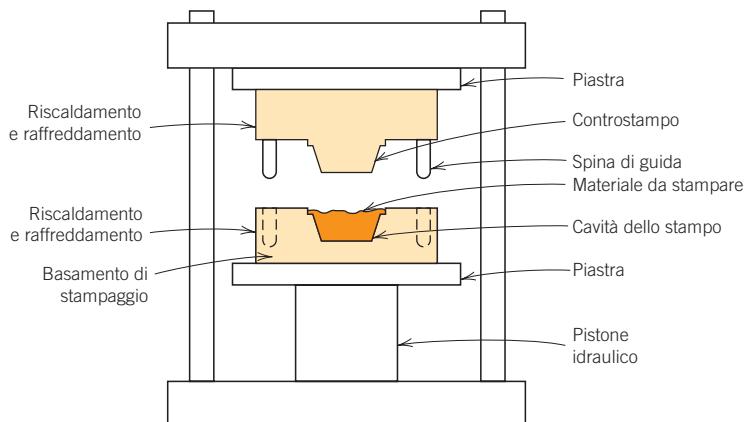
stampaggio

Lo **stampaggio** è il metodo più comune per produrre manufatti plastici. Tra le diverse tecniche di stampaggio usate, vi sono la compressione, il trasferimento, il soffiaggio, l'iniezione e l'estruzione. In ciascuna di esse, si forza della plastica granulare o finemente macinata, a elevate temperature e sotto pressione, a fluire entro uno stampo cavo, a riempirlo e ad assumerne la forma.

Stampaggio a compressione e a trasferimento

Nello stampaggio a compressione, si dispone tra il maschio e la femmina dello stampo la quantità necessaria di polimero perfettamente miscelato con gli additivi necessari, come mostrato in Figura 14.21. Entrambi gli elementi dello stampo sono riscaldati, ma solo uno di essi è mobile. Si chiude lo stampo e si applicano calore e pressione, in modo che il materiale plastico diventi viscoso e si adatti alla forma dello stampo. Prima dello stampaggio, le materie prime possono essere mescolate e pressate a freddo in dischetti (*preforme*). Il preriscaldamento della preforma riduce il tempo e la pressione di stampaggio, migliora il tempo di vita dello stampo e produce pezzi finiti più uniformi.

Figura 14.21 Schema di un sistema per stampaggio a compressione. (Da F. W. Billmeyer, Jr., *Textbook of Polymer Science*, 3rd edition. Copyright © 1984 by John Wiley & Sons, New York. Ristampa autorizzata da John Wiley & Sons, Inc.).



Questa tecnica di stampaggio si presta alla fabbricazione di polimeri sia termoplastici che termoindurenti; per i termoplastici è però più lunga e costosa delle altre tecniche comunemente usate, quali l'estruzione e lo stampaggio a iniezione, discusse in seguito.

Nello stampaggio a trasferimento, una variante della tecnica a compressione, gli ingredienti solidi vengono dapprima fusi in una camera di trasferimento riscaldata. Quando il materiale fuso viene iniettato nella camera di stampaggio, la pressione risulta distribuita più uniformemente su tutte le superfici. Questo processo è applicato anche per i polimeri termoindurenti e per i manufatti con geometrie complesse.

Stampaggio a iniezione

Lo stampaggio a iniezione, l'analogo per i polimeri della pressofusione dei metalli, è la tecnica più largamente usata per la produzione di termoplastici. Uno schema in sezione del sistema utilizzato viene illustrato nella Figura 14.22. La quantità appropriata di materiale granulare viene introdotta, attraverso una tramoggia di alimentazione, in un cilindro ed è poi spinta da un pistone in una camera riscaldante; all'interno della camera, un nucleo spanditore posto al centro (spreader) costringe il polimero a passare lungo le pareti del cilindro di alimentazione, in modo da ottenere un migliore contatto con la parete calda. Ne consegue che il materiale termoplastico fonde rapidamente e forma un liquido viscoso. La plastica fusa è quindi forzata dal pistone a passare, attraverso un ugello, nell'annessa cavità di stampaggio; la pressione viene mantenuta sino a che l'oggetto da stampare si è solidificato. A questo punto si apre lo stampo, si estraе il pezzo, si richiude lo stampo e si ripete l'intero ciclo. Probabilmente la prestazione più notevole di questa tecnica è la velocità con la quale si possono produrre i pezzi. Per i termoplastici, la solidificazione della carica iniettata è quasi immediata; di conseguenza, il tempo di ciclo di questo processo è breve (in genere dai 10 ai 30 s). I polimeri termoindurenti possono anch'essi essere stampati a iniezione; la cura ha luogo mentre il materiale è sotto pressione in uno stampo riscaldato, il che dà luogo a tempi di ciclo più lunghi rispetto ai termoplastici. Questo processo è talvolta chiamato *stampaggio a iniezione e reazione* (Reaction Injection Molding = RIM) ed è comunemente usato per materiali come il poliuretano.

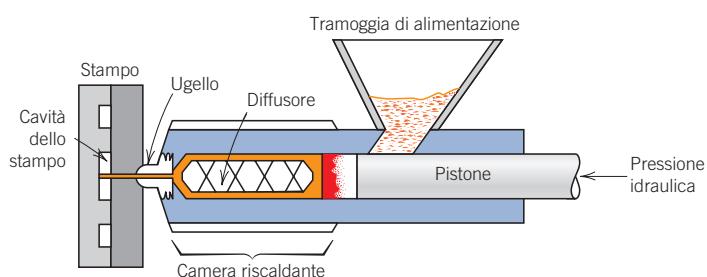


Figura 14.22 Schema di un'apparecchiatura per stampaggio a iniezione. (Da F. W. Billmeyer, Jr., *Textbook of Polymer Science*, 2nd edition. Copyright © 1971 by John Wiley & Sons, New York. Ristampa autorizzata da John Wiley & Sons, Inc.).

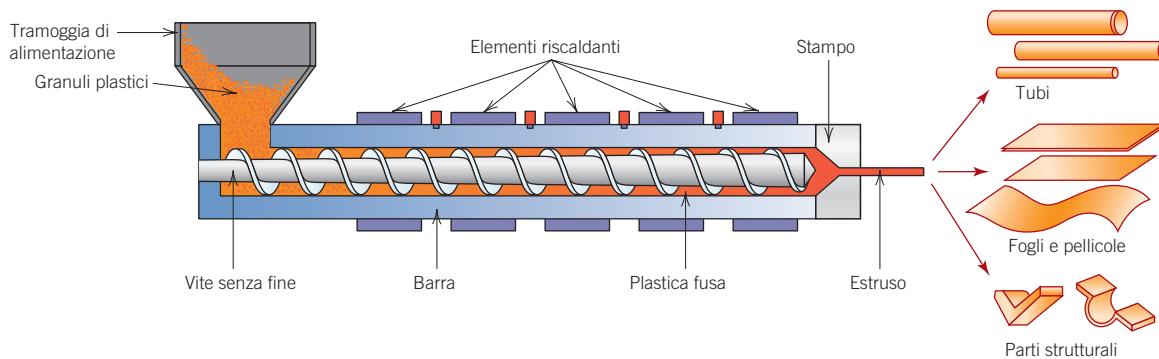


Figura 14.23 Schema di un estrusore. (Ristampa autorizzata da *Encyclopædia Britannica*, © 1997 di Encyclopædia Britannica, Inc.).

Estrusione

Il processo di stampaggio per estrusione consiste nel far passare, sotto pressione, un termoplastico viscoso attraverso uno stampo aperto all'estremità, in modo del tutto simile all'estrusione dei metalli. Il materiale termoplastico, in forma granulare, viene spinto da una vite senza fine attraverso una camera dove viene compattato e fuso, così da formare una carica continua di fluido viscoso (Figura 14.23). L'estrusione avviene quando questa massa fusa è forzata a passare attraverso una filiera. La solidificazione del pezzo estruso è accelerata da soffi d'aria o da spruzzi d'acqua. La tecnica è particolarmente adatta per produrre pezzi continui a geometrie trasversali costanti, per esempio barre, tubi, tubi da innaffiamento, fogli e filamenti.

Stampaggio per soffiatura

Il processo di stampaggio per soffiatura, utilizzato per la fabbricazione di contenitori di plastica, è simile a quello usato per soffiare le bottiglie di vetro. Dapprima viene estruso un semilavorato tubolare. Quando è ancora in uno stato semifuso, il semilavorato viene messo in uno stampo formato da due elementi che ha la configurazione desiderata del contenitore da produrre. Soffiando aria o vapore a pressione all'interno del semilavorato, lo si costringe a modellarsi sullo stampo, ottenendo il manufatto desiderato. Naturalmente, si devono regolare attentamente la temperatura e la viscosità del semilavorato cavo.

Colata

Come i metalli, anche i materiali polimerici possono essere lavorati per getto; ciò avviene quando un materiale plastico fuso viene versato in uno stampo e lasciato solidificare. Sia i termoplastici che i termoindurenti possono essere prodotti per getto. Per i termoplastici, la solidificazione avviene per raffreddamento dallo stato fuso; per i termoindurenti, invece, l'indurimento si ottiene con la polimerizzazione, o processo di cura, che di norma richiede un'elevata temperatura.

14.25 PRODUZIONE DI FIBRE E FILM

Fibre

filatura

Il processo con cui da un materiale polimerico si producono fibre viene detto **filatura**. Le fibre in genere vengono filate a partire dallo stato fuso, con un processo chiamato *filatura per estrusione*. Il materiale da filare è dapprima riscaldato sino a formare un liquido relativamente viscoso. Poi è spinto ad attraversare una piastra chiamata *filiera*, che contiene numerosi piccoli fori tondi. Quando il materiale fuso passa attraverso ciascuno di tali orifizi, si forma una singola fibra, che solidifica rapidamente grazie al raffreddamento con getti d'aria o con un bagno d'acqua.

È possibile incrementare la resistenza meccanica delle fibre con un processo post-formatura chiamato *stiramento*. Lo stiramento consiste nell'allungare meccanicamente in modo permanente una fibra nella direzione del suo asse. Con questo

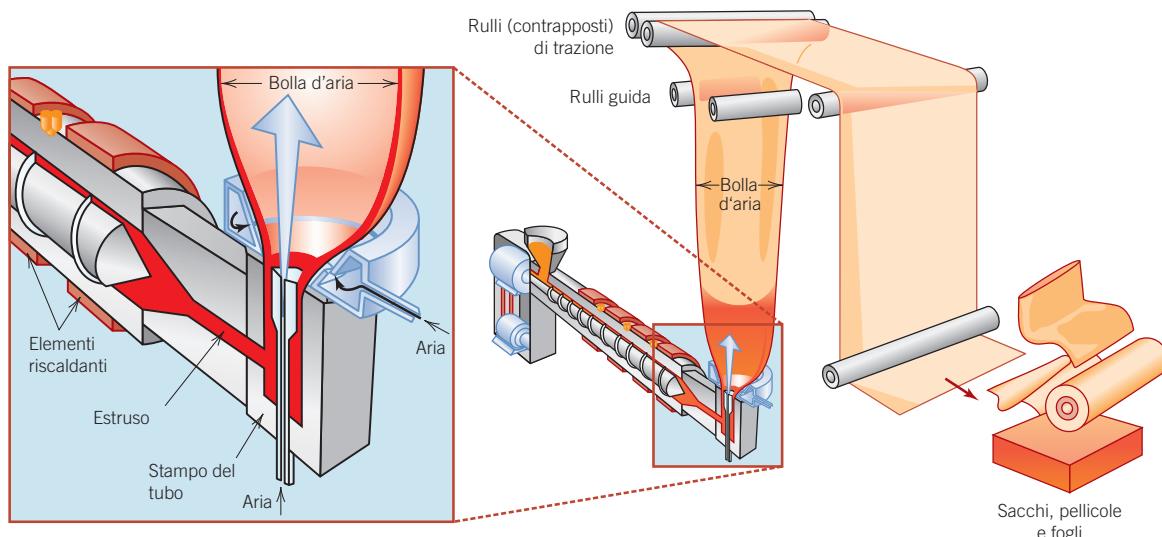


Figura 14.24 Schema di un'apparecchiatura usata per la formatura di film polimerici sottili. (Ristampa autorizzata da Encyclopædia Britannica, © 1997 by Encyclopædia Britannica, Inc.).

processo, le catene molecolari si orientano nella direzione dello stiramento (Figura 14.17f) e si migliorano così la resistenza a trazione, il modulo elastico e la tenacità. La sezione trasversale delle fibre filate da fuso e stirate è quasi circolare e le proprietà si presentano uniformi attraverso tutta la sezione.

Film

Molti film vengono prodotti per semplice estrusione attraverso una sottile fessura, cui può seguire una laminazione (calandratura) o trafilatura, che serve a ridurre lo spessore e ad aumentare la resistenza meccanica. In alternativa, la pellicola può essere prodotta per soffiatura: da uno stampo anulare viene estruso un tubo continuo; poi, mantenendo all'interno del tubo un gas a una pressione accuratamente controllata e stirando la pellicola in direzione assiale mentre esce dallo stampo, il materiale si espande intorno a questa bolla d'aria intrappolata come un palloncino (Figura 14.24). Ne consegue che lo spessore della parete si riduce in modo continuo, sino a produrre una sottile pellicola cilindrica che può essere sigillata all'estremità per produrre sacchi per rifiuti o può essere tagliata e stesa per formare una pellicola. Questo processo viene chiamato *processo di stiramento biassiale* ed è in grado di produrre film che sono resistenti in entrambe le direzioni di stiro. Alcuni dei film più recenti sono prodotti per coestrusione, cioè vengono estrusi simultaneamente multistrati di più tipi di polimeri.

SOMMARIO

Molecole polimeriche

- La maggior parte dei materiali polimerici è composta da catene molecolari molto lunghe, che portano lateralmente vari atomi (O, Cl, ecc.) o gruppi organici come metile, etile o fenile.
- Queste macromolecole sono composte da unità ripetitive, entità strutturali più piccole, che si ripetono lungo tutta la catena.

Chimica delle molecole polimeriche

- Le unità ripetitive di alcuni polimeri semplici (polietilene, politetrafluoroetilene, polivinilcloruro, polipropilene, ecc.) sono riportate in Tabella 14.1.
- Un omopolimero presenta una struttura contenente la stessa unità ripetitiva. Le catene dei copolimeri sono costituite invece da due o più unità ripetitive diverse.

William D. Callister • David G. Rethwisch

Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

Accedi all'ebook e ai contenuti digitali ➤ Espandi le tue risorse ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi. L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.