

William D. Callister • David G. Rethwisch



Materiali per l'Ingegneria Civile ed Industriale

A cura di
MP. Pedferri
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. Pedferri, 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. Pedferri, 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 Sograte 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

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 Peddeferri *Politecnico di Milano*

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

Revisione e coordinamento:

MariaPia Peddeferri *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 esaurientemente 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 Pedferri 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

Imperfezioni miste	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
Deformazione elastica	74
3.3 Comportamento sforzo-deformazione	74
3.4 Anelasticità	76
3.5 Proprietà elastiche dei materiali	77
Deformazione plastica	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
Variabilità delle proprietà e dei fattori di progettazione e di sicurezza	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
Dislocazioni e deformazione plastica	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
Meccanismi di rafforzamento nei metalli	120
4.7 Rafforzamento per riduzione della dimensione del grano	120
4.8 Rafforzamento per soluzione solida	122
4.9 Incrudimento	123

<i>Recovery, ricristallizzazione e accrescimento del grano</i>	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
<i>Frattura</i>	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
<i>Fatica</i>	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
<i>Scorrimento a caldo o creep</i>	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
<i>Proprietà elettriche</i>	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
<i>Semiconduzione</i>	189
6.7 Semiconduzione intrinseca	189
6.8 Semiconduzione estrinseca	189
<i>Conduzione elettrica nei ceramici ionici e nei polimeri</i>	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 ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$)	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 isoterma	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	487
	a cura di P. Colombo	
12.1	Introduzione	488
12.2	Proprietà del vetro	490
12.3	Fabbricazione del vetro	495
12.4	Principali 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
a cura di M.V. Diamanti	
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
-------------------	-----

Compositi rinforzati con particelle **596**

15.2 Compositi rinforzati con particelle di grandi dimensioni	596
15.3 Compositi rinforzati con particelle disperse	599

Compositi fibro-rinforzati **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

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

<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 Cyclac 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 scorrimento a freddo	Guarnizioni anticorrosive, tubi e valvole per l'industria chimica; cuscinetti, rivestimenti antiaderenti, parti elettroniche ad alta temperatura
Poliammidi (nylon)	Nylon Baylon Durethan Heriox 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 Vestylon	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 Petra	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 Arofen 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 ambite. 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.

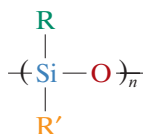
Tabella 14.5 Caratteristiche più importanti e applicazioni tipiche di cinque elastomeri commerciali

<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.

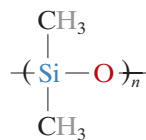
Per molte applicazioni (per esempio, pneumatici delle automobili), le proprietà meccaniche delle gomme, anche se vulcanizzate, non sono soddisfacenti in termini di resistenza a trazione, resistenza all'abrasione, resistenza allo strappo e rigidità. Queste caratteristiche possono essere ulteriormente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

È necessario, infine, accennare alle gomme silconiche. 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 medico, 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 gommialacca.

Molti dei comuni rivestimenti sono *lattice*. 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 epossidiche, 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 sottili, 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 decompone, 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 carbone, 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

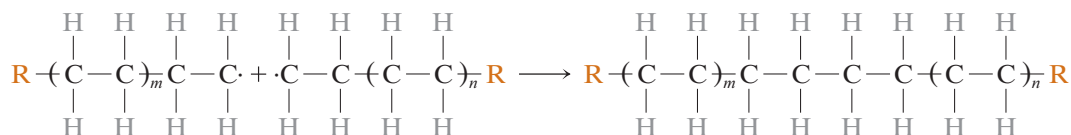
polimerizzazione per addizione

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.

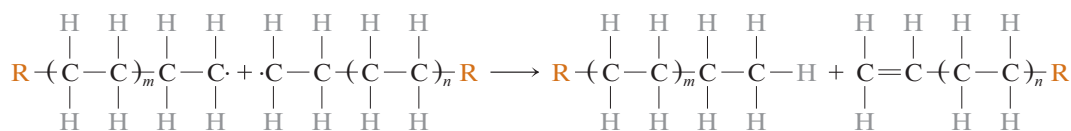
Nella polimerizzazione per addizione si distinguono tre stadi: iniziazione, propagazione e terminazione. Durante la fase di iniziazione si verifica una reazione tra un iniziatore (o catalizzatore) e l'unità monomerica, che dà origine a un centro attivo, in grado di propagarsi successivamente.

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, rifusi 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 prepolimero) 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 inerti.

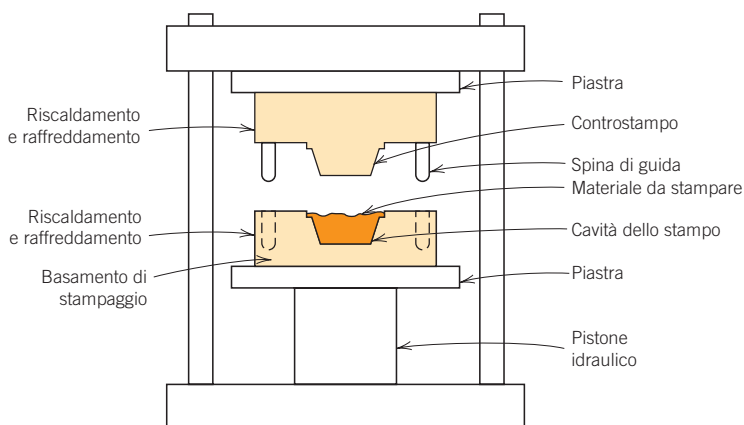
stampaggio

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'estrusione. In ciascuna di esse, si forza della plastica granulata 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'estrusione 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 riscaldata; 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 estrae 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.

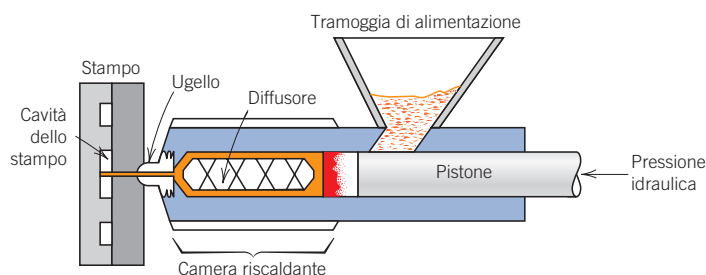


Figura 14.22 Schema di un'apparecchiatura per stampaggio a iniezione. (Da F. W. Billmeyer, Jr., *Textbook of Polymer Science*, 2nd edition. Copyright © 1971 by John Wiley & Sons, New York. Ristampa autorizzata da John Wiley & Sons, Inc.).

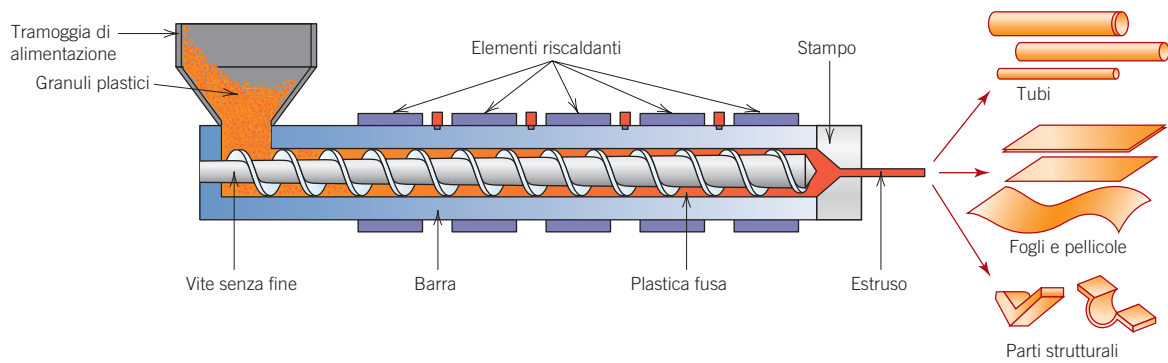


Figura 14.23 Schema di un estrusore. (Ristampa autorizzata da *Encyclopædia Britannica*, © 1997 di Encyclopædia Britannica, Inc.).

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

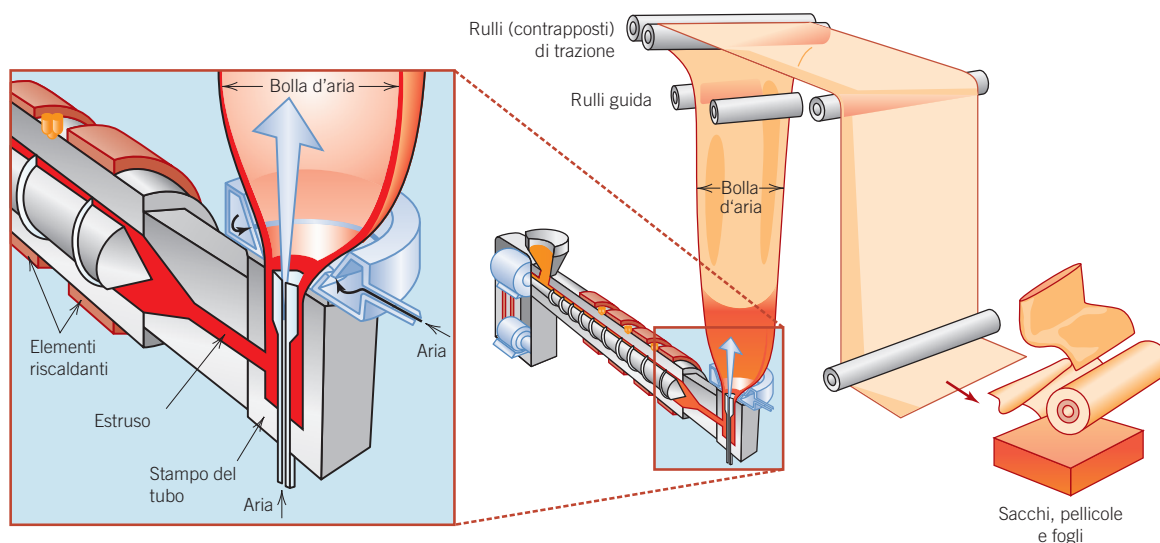


Figura 14.24 Schema di un'apparecchiatura usata per la formatura di film polimerici sottili. (Ristampa autorizzata da *Encyclopædia Britannica*, © 1997 by *Encyclopædia Britannica, Inc.*).

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**.

