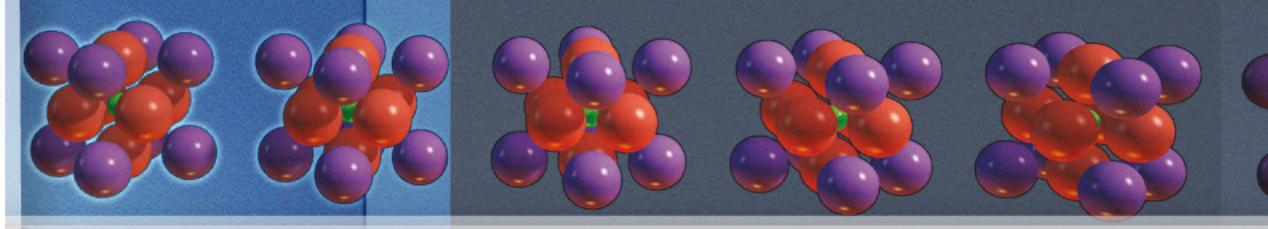


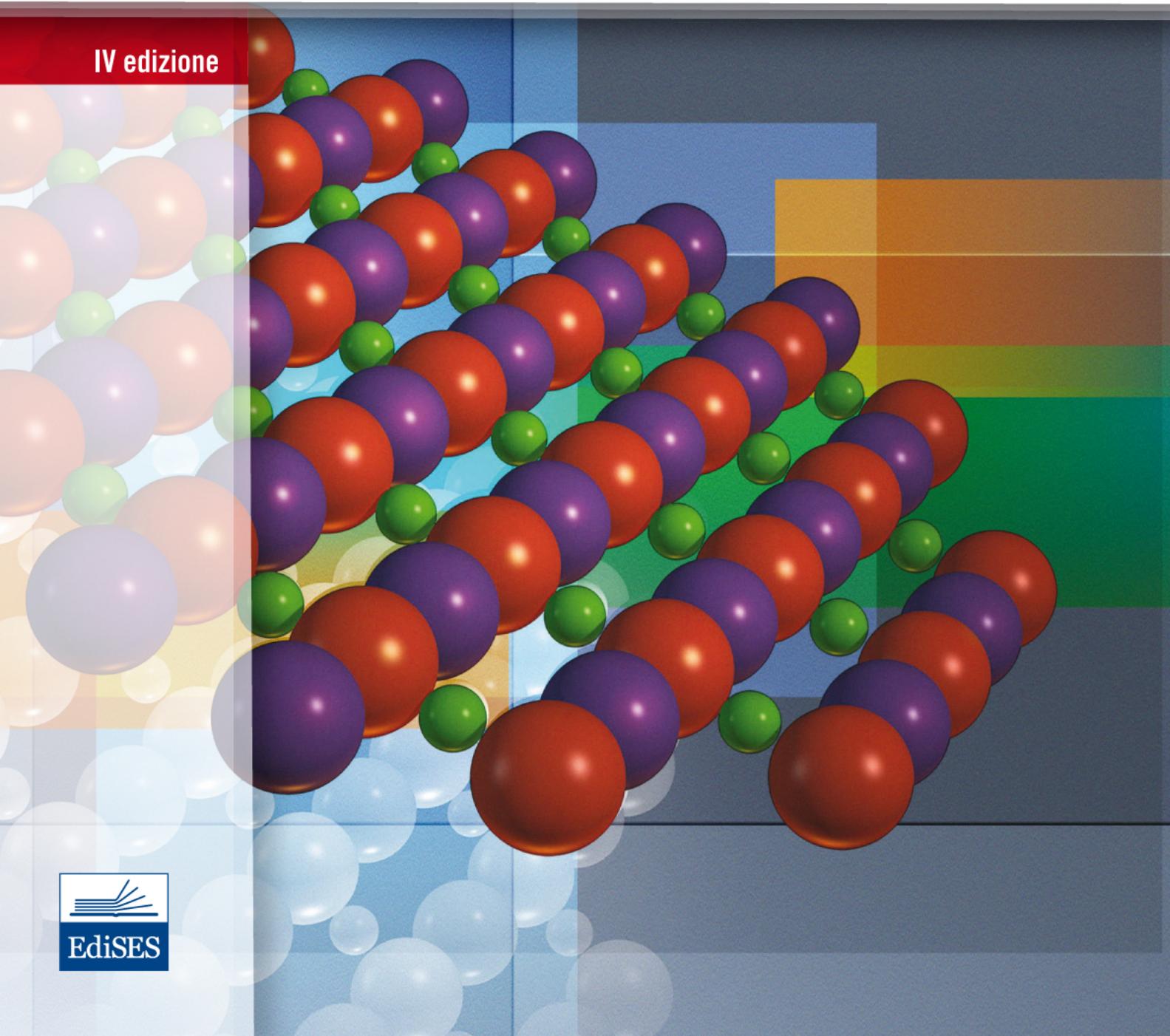
Comprende versione
ebook



William D. Callister Jr. • David G. Rethwisch

Scienza ed Ingegneria dei Materiali

IV edizione



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse
un libro che **non pesa**
e si **adatta** alle dimensioni
del tuo lettore!

▼
COLLEGATI AL SITO
EDISES.IT

▼
ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

▼
SEGUI LE
ISTRUZIONI

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edises.it**
e accedere alla **versione digitale** del testo e al **materiale didattico**.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.
L'accesso al materiale didattico sarà consentito **per 18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edises.it** e segui queste semplici istruzioni

▼
Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

▼
Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito o autenticati tramite facebook
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edises.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*

Quarta Edizione

Scienza ed Ingegneria dei Materiali

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*



Titolo originale:

William D. Callister Jr & David G. Rethwisch
Materials Science and Engineering, 10th ed.
Copyright © 2018 John Wiley & Sons, Inc.

Scienza ed Ingegneria dei Materiali, IV ed.

Copyright © 2019, EdiSES s.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2024 2023 2022 2021 2020 2019

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

A norma di legge, le pagine di questo volume non possono essere fotocopiate o ciclostilate o comunque riprodotte con alcun mezzo meccanico. La Casa Editrice sarebbe particolarmente spiacente di dover promuovere, a sua tutela, azioni legali verso coloro che arbitrariamente non si adeguano a tale norma.

L'Editore

Impaginazione:

V colore di Francesco Omaggio - Pordenone

Fotoincisione e stampa:

Tipolitografia Sograte s.r.l.
Zona Ind. Rognano – Città di Castello (PG)

per conto della:

EdiSES S.r.l – Piazza Dante, 89 – Napoli
www.edises.it info@edises.it

ISBN 978 88 3319 043 3

Autori

Hanno collaborato all'edizione italiana:

GIANLUCA CICALA

Università degli Studi di Catania

BRUNO DE GENNARO

Università degli Studi di Napoli

ERNESTO DI MAIO

Università degli Studi di Napoli

EMANUELE GALVANETTO

Università degli Studi di Firenze

MASSIMO GUGLIELMI

Università degli Studi di Padova

GIULIO MALUCELLI

Politecnico di Torino

ALESSANDRO MARTUCCI

Università degli Studi di Padova

ALESSANDRO PISTONE

Università degli Studi di Messina

ANTONINO POLLICINO

Università degli Studi di Catania

EDOARDO PROVERBIO

Università degli Studi di Messina

ANDREA SACCANI

Università degli Studi di Bologna

Revisione a cura di:

MARIAPIA PEDEFERRI

Politecnico di Milano

TEODORO VALENTE

Università degli Studi di Roma - Sapienza

Hanno collaborato alla precedente edizione:

CLAUDIO CANEVA, MARIA VITTORIA DIAMANTI, GIUSEPPE MENSITIERI, MARCO ORMELLESE

In questa quarta edizione abbiamo mantenuto gli obiettivi e l'approccio all'insegnamento della scienza e ingegneria dei materiali che sono stati seguiti nelle edizioni precedenti. Gli obiettivi sono i seguenti:

- Presentare gli argomenti fondamentali con un livello di approfondimento adeguato a studenti universitari.
- Presentare gli argomenti in ordine logico, dal più semplice al più complesso.
- Se un argomento o concetto è importante, allora viene trattato con un dettaglio che permetta la sua completa comprensione da parte dello studente, senza che debba ricorrere ad altre fonti.
- Nel testo sono presenti delle parti che aiutano il processo di apprendimento che includono: fotografie/illustrazioni, obiettivi di apprendimento, “Perché studiare...”, argomenti di approfondimento, verifica dei concetti, sommario, sommario delle equazioni, lista dei simboli, glossario, domande e problemi e infine risposte a problemi selezionati.

Contenuti nuovi e rivisitati

Questa nuova edizione contiene alcune nuove sezioni, oltre ad alcune sezioni che sono state ampliate/revisionate:

- Una nuova discussione sui grafici di selezione dei materiali (Capitolo 1)
- Revisione dell'esempio di progetto 8.1, “Specifiche di un materiale per un serbatoio sferico pressurizzato”.
- Nuove discussioni sulla stampa 3D nei Capitoli 11 (metalli), 13 (ceramiche) e 15 (polimeri).
- Nuove discussioni sui biomateriali nei Capitoli 11 (metalli), 13 (ceramiche) e 15 (polimeri).
- Una nuova sezione che riguarda il diamante policristallino (Capitolo 13)
- Revisione della discussione dell'effetto Hall (Capitolo 18)
- Revisione ed espansione della discussione sulle problematiche del riciclo nella scienza e ingegneria dei materiali (Capitolo 22)
- Tutti i problemi che richiedono calcoli sono stati revisionati

Risorse digitali e risorse per i docenti

L'acquisto del libro dà diritto all'accesso a una versione digitale del testo (e-book), arricchito dalle risposte alle sezioni “Verifica dei concetti”. Segui le istruzioni all'inizio del libro per sfruttare questo materiale.

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

Elenco dei simboli XIII

1. Introduzione 1

- Obiettivi di apprendimento 2
- 1.1 Prospettiva storica 2
- 1.2 Scienza e ingegneria dei materiali 3
- 1.3 Perché studiare la scienza e l'ingegneria dei materiali? 5
- 1.4 Classificazione dei materiali 7
- 1.5 Materiali avanzati 14
- 1.6 Necessità dei materiali moderni 16
- Sommario 17
- Bibliografia 18

2. Struttura atomica e legami interatomici 19

- Obiettivi di apprendimento 20
- 2.1 Introduzione 20
- STRUTTURA ATOMICA 20
- 2.2 Concetti fondamentali 20
- 2.3 Gli elettroni negli atomi 22
- 2.4 La tavola periodica 28
- LEGAMI ATOMICI NEI SOLIDI 30
- 2.5 Forze ed energie di legame 30
- 2.6 Legami interatomici primari 32
- 2.7 Legami secondari o legami di Van der Waals 39
- 2.8 Legami misti 43
- 2.9 Molecole 44
- 2.10 Correlazioni tipo di legame – classificazione dei materiali 44
- Sommario 45
- Sommario delle equazioni 46
- Lista dei simboli 46
- Termini e concetti importanti 46
- Bibliografia 47

3. La struttura dei solidi cristallini 48

- Obiettivi di apprendimento 49
- 3.1 Introduzione 49
- STRUTTURE CRISTALLINE 49
- 3.2 Concetti fondamentali 49
- 3.3 Celle unitarie 50
- 3.4 Strutture cristalline dei metalli 51
- 3.5 Calcolo della densità 57
- 3.6 Polimorfismo e allotropia 57
- 3.7 Sistemi cristallini 59
- PUNTI, DIREZIONI E PIANI CRISTALLOGRAFICI 61

- 3.8 Coordinate dei punti 61
- 3.9 Direzioni cristallografiche 64
- 3.10 Piani cristallografici 70
- 3.11 Densità lineare e planare 76
- 3.12 Strutture cristalline compatte 77
- MATERIALI CRISTALLINI E NON CRISTALLINI 79
- 3.13 Monocristalli 79
- 3.14 Materiali policristallini 79
- 3.15 Anisotropia 81
- 3.16 Diffrazione a raggi X: determinazione delle strutture cristalline 82
- 3.17 Solidi non cristallini 87
- Sommario 88
- Sommario delle equazioni 90
- Lista dei simboli 90
- Termini e concetti importanti 91
- Bibliografia 91

4. Imperfezioni nei solidi 92

- Obiettivi di apprendimento 93
- 4.1 Introduzione 93
- DIFETTI PUNTUALI 93
- 4.2 Vacanze e autointerstiziali 93
- 4.3 Impurezze nei solidi 95
- 4.4 Descrizione della composizione 98
- MISCELLANEA DI IMPERFEZIONI 102
- 4.5 Dislocazioni – difetti lineari 102
- 4.6 Difetti interfacciali 105
- 4.7 Difetti di massa o di volume 109
- 4.8 Vibrazioni atomiche 109
- ESAMI AL MICROSCOPIO 110
- 4.9 Concetti basilari di microscopia 110
- 4.10 Tecniche microscopiche 111
- 4.11 Determinazione della dimensione dei grani 115
- Sommario 118
- Sommario delle equazioni 119
- Lista dei simboli 120
- Termini e concetti importanti 120
- Bibliografia 120

5. Diffusione 121

- Obiettivi di apprendimento 122
- 5.1 Introduzione 122
- 5.2 Meccanismi di diffusione 123
- 5.3 Prima legge di Fick 124
- 5.4 Seconda legge di Fick - Diffusione non stazionaria 126

VIII • Indice generale

- 5.5 Fattori che influenzano la diffusione 130
5.6 Diffusione nei materiali semiconduttori 135
5.7 Altri modi di diffondere 139
Sommario 139
Sommario delle equazioni 140
Lista dei simboli 141
Termini e concetti importanti 141
Bibliografia 141
- 6. Proprietà meccaniche dei metalli 142**
- Obiettivi di apprendimento 143
6.1 Introduzione 143
6.2 Concetti di sforzo e di deformazione 144
- DEFORMAZIONE ELASTICA 148**
- 6.3 Comportamento sforzo-deformazione 148
6.4 Anelasticità 151
6.5 Proprietà elastiche dei materiali 151
- DEFORMAZIONE PLASTICA 154**
- 6.6 Proprietà a trazione 154
6.7 Sforzo e deformazione reali 161
6.8 Recupero elastico dopo deformazione plastica 164
6.9 Deformazione a compressione, a taglio e a torsione 165
6.10 Durezza 165
- VARIABILITÀ DELLE PROPRIETÀ E DEI FATTORE DI PROGETTAZIONE E DI SICUREZZA 171**
- 6.11 Variabilità delle proprietà dei materiali 171
6.12 Fattori di progetto e di sicurezza 173
Sommario 177
Sommario delle equazioni 178
Lista dei simboli 179
Termini e concetti importanti 179
Bibliografia 179
- 7. Dislocazioni e meccanismi per aumentare la resistenza 180**
- Obiettivi di apprendimento 181
7.1 Introduzione 181
- DISLOCAZIONI E DEFORMAZIONE PLASTICA 181**
- 7.2 Concetti di base 182
7.3 Caratteristiche delle dislocazioni 184
7.4 Sistemi di scorrimento 185
7.5 Scorrimento nei monocrystalli 187
7.6 Deformazione plastica dei materiali policristallini 190
7.7 Deformazione per geminazione 192
- MECCANISMI DI AUMENTO DELLA RESISTENZA NEI METALLI 193**
- 7.8 Aumento della resistenza per riduzione della dimensione del grano 193
7.9 Aumento della resistenza per soluzione solida 195
7.10 Incrudimento 196
- RECOVERY, RICRISTALLIZZAZIONE E ACCRESCIMENTO DEL GRANO 199**
- 7.11 Recovery 199
7.12 Ricristallizzazione 200
7.13 Ingrossamento del grano 204
Sommario 206
Sommario delle equazioni 208
Lista dei simboli 208
Termini e concetti importanti 208
Bibliografia 208
- 8. La rottura 209**
- Obiettivi di apprendimento 210
8.1 Introduzione 210
- FRATTURA 211**
- 8.2 Fondamenti della frattura 211
8.3 Frattura duttile 211
8.4 Frattura fragile 213
8.5 Principi di meccanica della frattura 215
8.6 Valutazione della tenacità alla frattura 224
- FATICA 229**
- 8.7 Sforzi ciclici 229
8.8 La curva S-N 231
8.9 Innesco e propagazione della cricca 235
8.10 Fattori che influiscono sulla vita a fatica 237
8.11 Effetti ambientali 239
- SCORRIMENTO A CALDO O CREEP 240**
- 8.12 Comportamento a creep 240
8.13 Effetti dello sforzo e della temperatura 241
8.14 Metodi di estrapolazione dei dati 244
8.15 Leghe per impieghi ad alta temperatura 245
Sommario 246
Sommario delle equazioni 248
Lista dei simboli 249
Termini e concetti importanti 249
Bibliografia 249
- 9. Diagrammi di fase 251**
- Obiettivi di apprendimento 252
9.1 Introduzione 252
- DEFINIZIONI E CONCETTI DI BASE 252**
- 9.2 Limite di solubilità 253
9.3 Fasi 254
9.4 Microstruttura 254
9.5 Equilibri di fase 254
9.6 Diagrammi di fase ad un componente 255
- DIAGRAMMI DI FASE BINARI 256**
- 9.7 Sistemi binari isomorfi 257
9.8 Interpretazione dei diagrammi di fase 259
9.9 Evoluzione della microstruttura nelle leghe isomorfe 263
9.10 Proprietà meccaniche delle leghe isomorfe 266
9.11 Sistemi binari eutettici 266

- 9.12 Evoluzione della microstruttura nelle leghe eutetiche 272
- 9.13 Diagrammi di equilibrio con fasi o composti intermedi 279
- 9.14 Reazioni eutettoidi e peritettiche 282
- 9.15 Trasformazioni di fase congruenti 283
- 9.16 Ceramicci e diagrammi di fase ternari 284
- 9.17 La regola delle fasi di Gibbs 284
- IL SISTEMA FERRO-CARBONIO 287**
- 9.18 Il diagramma di fase ferro-carburo di ferro (Fe- Fe_3C) 287
- 9.19 Evoluzione della microstruttura nelle leghe ferro-carbonio 290
- 9.20 L'influenza di altri elementi di lega 298
Sommario 298
Sommario delle equazioni 300
Lista dei simboli 301
Termini e concetti importanti 301
Bibliografia 302
-
- 10 Trasformazioni di fase: Evoluzione della microstruttura e modificazioni delle proprietà meccaniche 303**
- Obiettivi di apprendimento 304
- 10.1 Introduzione 304
- TRASFORMAZIONI DI FASE 304**
- 10.2 Concetti di base 304
- 10.3 La cinetica delle trasformazioni di fase 305
- 10.4 Stati metastabili e stati di equilibrio 316
- VARIAZIONI DELLA MICROSTRUTTURA E DELLE PROPRIETÀ NELLE LEGHE FERRO-CARBONIO 317**
- 10.5 Diagrammi di trasformazione isoterma 317
- 10.6 Diagrammi di trasformazione in raffreddamento continuo 328
- 10.7 Comportamento meccanico delle leghe ferro-carbonio 331
- 10.8 Martensite rinvenuta 335
- 10.9 Riepilogo delle trasformazioni di fase e delle proprietà meccaniche per le leghe ferro-carbonio 338
Sommario 344
Sommario delle equazioni 345
Lista dei simboli 346
Termini e concetti importanti 346
Bibliografia 346
-
- 11 Processi di lavorazione e applicazioni delle leghe metalliche 347**
- Obiettivi di apprendimento 348
- 11.1 Introduzione 348
- TIPI DI LEGHE METALLICHE 349**
- 11.2 Leghe ferrose 349
- 11.3 Leghe non ferrose 361
- LAVORAZIONE DEI METALLI 373**
- 11.4 Operazioni di formatura 373
- 11.5 Fusione 375
- 11.6 Altre tecniche 376
- 11.7 Stampa 3D 378
- TRATTAMENTO TERMICO DEI METALLI 382**
- 11.8 Processi di ricottura 382
- 11.9 Trattamenti termici degli acciai 384
- 11.10 Indurimento per precipitazione 394
Sommario 401
Termini e concetti importanti 403
Bibliografia 403
-
- 12 Struttura e proprietà dei ceramicci 405**
- Obiettivi di apprendimento 406
- 12.1 Introduzione 406
- STRUTTURA DEI CERAMICI 406**
- 12.2 Strutture cristalline 407
- 12.3 Ceramicci formati da silicati 415
- 12.4 Carbonio 419
- 12.5 Imperfezioni nei ceramicci 420
- 12.6 Diffusione nei materiali ionici 424
- 12.7 Diagrammi di fase dei ceramicci 425
- PROPRIETÀ MECCANICHE 428**
- 12.8 Frattura fragile dei ceramicci 429
- 12.9 Comportamento sforzo-deformazione 433
- 12.10 Meccanismi di deformazione plastica 435
- 12.11 Considerazioni meccaniche varie 437
Sommario 439
Sommario delle equazioni 440
Lista dei simboli 441
Termini e concetti importanti 441
Bibliografia 441
-
- 13 Produzione e impieghi dei ceramicci 442**
- Obiettivi di apprendimento 443
- 13.1 Introduzione 443
- TIPI E APPLICAZIONI DEI CERAMICI 444**
- 13.2 Vetri 444
- 13.3 Vetro-ceramicci 444
- 13.4 Prodotti argillosi 446
- 13.5 Refrattari 446
- 13.6 Abrasivi 449
- 13.7 Leganti 451
- 13.8 Biomateriali ceramici 452
- 13.9 I carboni 453
- 13.10 Ceramicci avanzati 456
- FABBRICAZIONE E LAVORAZIONE DEI CERAMICI 461**
- 13.11 Fabbricazione e lavorazione dei vetri e dei vetro-ceramicci 462
- 13.12 Fabbricazione e lavorazione dei prodotti argillosi 466
- 13.13 Pressatura delle polveri - sinterizzazione 471
- 13.14 Colaggio a nastro 473

X • Indice generale

- 13.15 Stampa 3D dei materiali ceramici 474
Sommario 476
Termini e concetti importanti 478
Bibliografia 478
- 14. Le strutture dei polimeri 479**
- Obiettivi di apprendimento 480
14.1 Introduzione 480
14.2 Molecole idrocarburiche 480
14.3 Molecole polimeriche 483
14.4 Chimica delle molecole polimeriche 483
14.5 Peso molecolare 487
14.6 Forma delle molecole 490
14.7 Struttura molecolare 492
14.8 Configurazioni molecolari 493
14.9 Polimeri termoplastici e termoindurenti 496
14.10 Copolimeri 497
14.11 Cristallinità dei polimeri 498
14.12 Cristalli polimerici 502
14.13 Difetti nei polimeri 504
14.14 Diffusione nei materiali polimerici 505
Sommario 507
Sommario delle equazioni 509
Lista dei simboli 509
Termini e concetti importanti 510
Bibliografia 510
- 15. Caratteristiche, applicazioni e lavorazione dei polimeri 511**
- Obiettivi di apprendimento 512
15.1 Introduzione 512
- COMPORTAMENTO MECCANICO DEI POLIMERI 512**
- 15.2 Comportamento sforzo-deformazione 512
15.3 Deformazione macroscopica 515
15.4 Deformazione viscoelastica 515
15.5 Frattura dei polimeri 519
15.6 Altre proprietà meccaniche 521
- MECCANISMI DI DEFORMAZIONE E DI RAFFORZAMENTO DEI POLIMERI 522**
- 15.7 Deformazione dei polimeri semicristallini 522
15.8 Fattori che influenzano le proprietà meccaniche dei polimeri semicristallini 524
15.9 Deformazione degli elastomeri 528
- FENOMENI DI CRISTALLIZZAZIONE, FUSIONE E TRANSIZIONE VETROSA NEI POLIMERI 530**
- 15.10 Cristallizzazione 531
15.11 Fusione 532
15.12 Transizione vetrosa 532
15.13 Temperature di fusione e di transizione vetrosa 532
15.14 Fattori che influenzano le temperature di fusione e di transizione vetrosa 534
- TIPI DI POLIMERI 536**
- 15.15 Plastiche 536
- 15.16 Elastomeri 539
15.17 Fibre 541
15.18 Applicazioni varie 542
15.19 Biomateriali polimerici 543
15.20 Materiali polimerici avanzati 545
- SINTESI E LAVORAZIONE DEI POLIMERI 549**
- 15.21 Polimerizzazione 549
15.22 Additivi dei polimeri 551
15.23 Tecniche di formatura delle plastiche 553
15.24 Produzione di elastomeri 555
15.25 Produzione di fibre e film 555
15.26 Stampa 3D dei polimeri 557
Sommario 560
Sommario delle equazioni 562
Lista dei simboli 562
Termini e concetti importanti 563
Bibliografia 563
- 16. Compositi 564**
- Obiettivi di apprendimento 565
16.1 Introduzione 565
- COMPOSITI RINFORZATI CON PARTICELLE 567**
- 16.2 Compositi rinforzati con particelle di grandi dimensioni 567
16.3 Compositi rinforzati con particelle disperse 571
- COMPOSITI FIBRO-RINFORZATI 572**
- 16.4 Influenza della lunghezza delle fibre 572
16.5 Influenza dell'orientazione e della concentrazione delle fibre 573
16.6 La fase fibra 581
16.7 La fase matrice 583
16.8 Compositi a matrice polimerica 583
16.9 Compositi a matrice metallica 589
16.10 Compositi a matrice ceramica 590
16.11 Compositi carbonio-carbonio 592
16.12 Compositi ibridi 592
16.13 Lavorazione dei compositi fibro-rinforzati 593
- COMPOSITI STRUTTURALI 595**
- 16.14 Compositi laminati 595
16.15 Pannelli sandwich 597
16.16 Nanocompositi 600
Sommario 602
Sommario delle equazioni 605
Lista dei simboli 606
Termini e concetti importanti 606
Bibliografia 606
- 17. Corrosione e degrado dei materiali 607**
- Obiettivi di apprendimento 608
17.1 Introduzione 608
- CORROSIONE DEI METALLI 609**

- 17.2 Considerazioni elettrochimiche 609
- 17.3 Velocità di corrosione 615
- 17.4 Previsione della velocità di corrosione 617
- 17.5 Passività 624
- 17.6 Effetti ambientali 625
- 17.7 Forme di corrosione 625
- 17.8 Ambienti corrosivi 633
- 17.9 Prevenzione della corrosione 633
- 17.10 Ossidazione 636

CORROSIONE DEI MATERIALI CERAMICI 639

DEGRADO DEI POLIMERI 639

- 17.11 Rigonfiamento e dissoluzione 640
- 17.12 Rottura di legame 642
- 17.13 Alterazione da parte dell'atmosfera 643
 - Sommario* 644
 - Sommario delle equazioni* 646
 - Lista dei simboli* 646
 - Termini e concetti importanti* 647
 - Bibliografia* 647

18. Proprietà elettriche 648

- Obiettivi di apprendimento 649
- 18.1 Introduzione 649
- CONDUZIONE ELETTRICA 649**
 - 18.2 La legge di ohm 649
 - 18.3 Conduttività elettrica 650
 - 18.4 Conduzione elettronica e ionica 651
 - 18.5 Strutture a bande di energia nei solidi 651
 - 18.6 Interpretazione della conduzione in base ai modelli a bande e ai legami interatomici 653
 - 18.7 Mobilità elettronica 655
 - 18.8 Resistività elettrica dei metalli 656
 - 18.9 Caratteristiche elettriche delle leghe commerciali 659
- SEMICONDUTTIVITÀ 659**
 - 18.10 Semiconduttore intrinseca 659
 - 18.11 Semiconduttore estrinseca 662
 - 18.12 Influenza della temperatura sulla concentrazione dei portatori di carica 665
 - 18.13 Fattori che influenzano la mobilità dei portatori di carica 667
 - 18.14 L'effetto Hall 671
 - 18.15 Dispositivi a semiconduttore 673

CONDUZIONE ELETTRICA NEI CERAMICI IONICI E NEI POLIMERI 679

- 18.16 Conduzione nei materiali ionici 680
- 18.17 Proprietà elettriche dei polimeri 680
- COMPORTAMENTO DIELETTRICO 681**
 - 18.18 Capacità 681
 - 18.19 Vettori di campo e polarizzazione 683
 - 18.20 Tipi di polarizzazione 686
 - 18.21 Dipendenza dalla frequenza della costante dielettrica 688
 - 18.22 Rigidità dielettrica 689

- 18.23 Materiali dielettrici 689

ALTRE CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEI MATERIALI 689

- 18.24 Ferroelettricità 689
- 18.25 Piezoelettricità 690
 - Sommario* 692
 - Sommario delle equazioni* 695
 - Lista dei simboli* 696
 - Termini e concetti importanti* 696
 - Bibliografia* 697

19. Proprietà termiche 698

- Obiettivi di apprendimento 699
- 19.1 Introduzione 699
- 19.2 Capacità termica 699
- 19.3 Espansione termica 703
- 19.4 Conduttività termica 706
- 19.5 Tensioni termiche 709
 - Sommario* 711
 - Sommario delle equazioni* 712
 - Lista dei simboli* 712
 - Termini e concetti importanti* 713
 - Bibliografia* 713

20. Proprietà magnetiche 714

- Obiettivi di apprendimento 715
- 20.1 Introduzione 715
- 20.2 Concetti di base 715
- 20.3 Diamagnetismo e paramagnetismo 719
- 20.4 Ferromagnetismo 721
- 20.5 Antiferromagnetismo e ferrimagnetismo 722
- 20.6 Influenza della temperatura sul comportamento magnetico 726
- 20.7 Domini e isteresi 727
- 20.8 Anisotropia magnetica 730
- 20.9 Materiali magnetici dolci 731
- 20.10 Materiali magnetici duri 733
- 20.11 Memoria magnetica 736
- 20.12 Superconduttività 739
 - Sommario* 742
 - Sommario delle equazioni* 744
 - Lista dei simboli* 744
 - Termini e concetti importanti* 745
 - Bibliografia* 745

21. Proprietà ottiche 746

- Obiettivi di apprendimento 747
- 21.1 Introduzione 747
- CONCETTI DI BASE 747**
 - 21.2 Radiazioni elettromagnetiche 747
 - 21.3 Interazione della luce con i solidi 749
 - 21.4 Interazioni con gli atomi e con gli elettroni 750
- PROPRIETÀ OTTICHE DEI METALLI 751**
- PROPRIETÀ OTTICHE DEI NON METALLI 752**

XII • Indice generale

- 21.5 Rifrazione 752
- 21.6 Riflessione 754
- 21.7 Assorbimento 754
- 21.8 Trasmissione 758
- 21.9 Colore 758
- 21.10 Opacità e traslucenza negli isolanti 760

APPLICAZIONI DEI FENOMENI OTTICI 761

- 21.11 Luminescenza 761
- 21.12 Fotoconduttività 761
- 21.13 Laser 764
- 21.14 Fibre ottiche nelle telecomunicazioni 768
 - Sommario* 770
 - Sommario delle equazioni* 772
 - Lista dei simboli* 773
 - Termini e concetti importanti* 773
 - Bibliografia* 774

22. Aspetti ambientali e sociali nella scienza e ingegneria dei materiali 775

- Obiettivi di apprendimento 776
- 22.1 Introduzione 776
- 22.2 Considerazioni ambientali e sociali 776
- 22.3 Aspetti relativi al riciclo nella scienza e ingegneria dei materiali 779
 - Sommario* 786
 - Bibliografia* 786

Domande e problemi P-1

Risposte a problemi selezionati R-1

Appendice A Sistema internazionale di unità di misura (SI) A-1

Appendice B Proprietà di alcuni materiali ingegneristici A-3

- B.1: Densità A-3
- B.2: Modulo elastico A-6
- B.3: Rapporto di Poisson A-10
- B.4: Resistenza e duttilità A-11
- B.5: Tenacità a frattura in condizioni di deformazione piana A-16
- B.6: Coefficiente lineare di espansione termica A-18
- B.7: Conduttività termica A-21
- B.8: Calore specifico A-24
- B.9: Resistività elettrica A-27
- B.10: Composizioni delle leghe metalliche A-30

Appendice C Costi e costi relativi di alcuni materiali ingegneristici A-32

Appendice D Strutture delle unità ripetitive di polimeri comuni A-37

Appendice E Temperature di transizione vettrosa e di fusione di materiali polimerici comuni A-41

Glossario G-1

Elenco dei simboli

In parentesi viene indicata la sezione in cui il simbolo viene definito o spiegato.

a	= parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse x della cella unitaria (3.4)
a	= lunghezza di una cricca superficiale (8.5)
A	= area
\AA	= angstrom
$A\%$	= duttilità, come allungamento percentuale (6.6)
A_i	= peso atomico dell'elemento i (2.2)
$\%at$	= percentuale atomica (4.4)
b	= parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse y della cella unitaria (3.7)
\mathbf{b}	= vettore di Burgers (4.5)
B	= densità del flusso (induzione) magnetico (20.2)
B_r	= induzione magnetica residua (20.7)
c	= parametro reticolare: lunghezza dello spigolo lungo l'asse z della cella unitaria (3.7)
c	= velocità delle radiazioni elettromagnetiche nel vuoto (21.2)
C	= capacità (18.18)
C_i	= concentrazione (composizione) della componente i in % in peso (4.4)
C'_i	= concentrazione (composizione) della componente i in % atomica (4.4)
C_v, C_p	= capacità termica a volume costante e a pressione costante (19.2)
ccc	= struttura cristallina cubica a corpo centrato (3.4)
cfc	= struttura cristallina cubica a facce centrate (3.4)
CVN	= Charpy con intaglio a V (8.6)
d	= diametro
d	= diametro medio del grano (7.8)
D	= coefficiente di diffusione (5.3)
D	= spostamento dielettrico (18.19)
d_{hkl}	= distanza interplanare per piani con indici di Miller h, k e l (3.16)
DP	= grado di polimerizzazione (14.5)
e	= carica elettrica per elettrone (18.7)
e^-	= elettrone (17.2)
\mathcal{E}	= intensità del campo elettrico (18.3)
E	= energia (2.5)
E	= modulo elastico o di Young (6.3)

E_f	= energia di Fermi (18.5)
E_g	= energia della banda di separazione (18.6)
$E_r(t)$	= modulo di rilassamento (15.4)
erf	= funzione di errore gaussiana (5.4)
es.c	= struttura cristallina esagonale compatta (3.4)
\exp	= e , la base dei logaritmi naturali
\mathcal{F}	= costante di Faraday (17.2)
F	= forza, interatomica o meccanica (2.5, 6.3)
FCA	= fattore di compattazione atomica (3.4)
G	= modulo di taglio (6.3)
h	= costante di Planck (21.2)
H	= resistenza del campo magnetico (20.2)
H_c	= coercività magnetica (20.7)
HB	= durezza Brinell (6.10)
HK	= durezza Knoop (6.10)
(hkl)	= indici di Miller per un piano cristallografico (3.10)
HR_B, HR_F	= durezza Rockwell: scale B e F (6.10)
$\text{HR15N}, \text{HR45W}$	= durezza Rockwell superficiale: scale 15N e 45W (6.10)
HV	= durezza Vickers (6.10)
i	= densità di corrente (17.3)
I	= corrente elettrica (18.2)
I	= intensità della radiazione elettromagnetica (21.3)
i_c	= densità di corrente di corrosione (17.4)
J	= flusso di diffusione (5.3)
J	= densità di corrente elettrica (18.3)
k	= costante di Boltzmann (4.2)
k	= conduttività termica (19.4)
K_c	= tenacità alla frattura (8.5)
K_{lc}	= tenacità alla frattura in condizioni di deformazione piana per apertura della cricca secondo il modo I (8.5)
l	= lunghezza
l_c	= lunghezza critica della fibra (16.4)

XIV • Elenco dei simboli

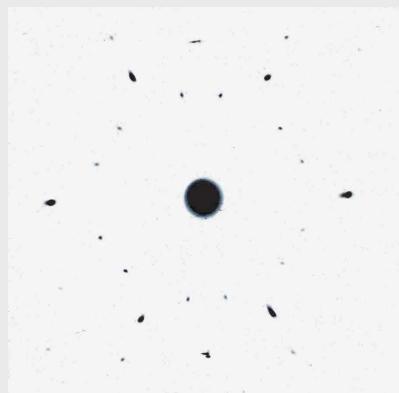
$LF\%$	= percentuale di lavorazione a freddo (7.10)	$[uvw], [UVW]$ = indici per una direzione cristallografica in cristalli esagonali (3.9)
\ln	= logaritmo naturale	v = velocità
\log	= logaritmo in base 10	V = differenza di potenziale elettrico (voltaggio) (17.2, 18.2)
M	= magnetizzazione (20.2)	V_c = volume della cella unitaria (3.4)
\bar{M}_n	= peso molecolare medio numerico di un polimero (14.5)	V_c = potenziale di corrosione (17.4)
\bar{M}_w	= peso molecolare medio ponderale di un polimero (14.5)	V_H = tensione di Hall (18.14)
$\text{mol}\%$	= percentuale molare	V_i = frazione di volume della fase i (9.8)
n	= numero quantico principale (2.3)	$\% \text{vol}$ = percentuale in volume
n	= numero di atomi per cella unitaria (3.5)	VPC = velocità di penetrazione di corrosione (17.3)
n	= esponente di incrudimento (6.7)	W_i = frazione di massa della fase i (9.8)
n	= numero di elettroni in una reazione elettrochimica (17.2)	x = lunghezza
n	= numero di elettroni di conduzione per metro cubo (18.7)	x = coordinata spaziale
n	= indice di rifrazione (21.5)	y = coordinata spaziale
n'	= per i ceramici, il numero di unità formula per cella unitaria (12.2)	Y = parametro o funzione adimensionale nell'espressione della tenacità alla frattura (8.5)
N	= numero di cicli di fatica (8.8)	z = coordinata spaziale
N_A	= numero di Avogadro (3.5)	α = parametro reticolare: angolo fra gli assi $y-z$ della cella unitaria (3.7)
N_f	= vita a fatica (8.8)	α, β, γ = designazioni di fasi
n_i	= concentrazione intrinseca dei portatori di carica (elettroni e lacune) (18.10)	α_i = coefficiente lineare di espansione termica (19.3)
p	= numero di lacune per metro cubo (18.10)	β = parametro reticolare: angolo fra gli assi $x-z$ della cella unitaria (3.7)
P	= polarizzazione dielettrica (18.19)	γ = parametro reticolare: angolo fra gli assi $x-y$ della cella unitaria (3.7)
% peso	= percentuale in peso (4.4)	γ = deformazione di taglio (6.2)
Q	= energia di attivazione	Δ = variazione finita del parametro scritto di seguito
Q	= quantità di carica immagazzinata (18.18)	ε = deformazione nominale (6.2)
r	= distanza interatomica (2.5)	ε = permittività dielettrica (18.18)
r	= velocità di reazione (17.3)	ε_r = costante dielettrica o permittività relativa (18.18)
R	= raggio atomico (3.4)	ε_s = velocità di creep stazionario (8.12)
R	= costante dei gas	ε_T = deformazione reale (6.7)
r_A, r_C	= raggi ionici dei cationi e degli anioni (12.2)	η = viscosità (12.10)
rapporto P-B	= rapporto Pilling–Bedworth (17.10)	η = sovrattensione (17.4)
S	= ampiezza di sforzo (8.8)	θ = angolo di diffrazione di Bragg (3.16)
S%	= duttilità, come riduzione percentuale della sezione (6.6)	θ_D = temperatura di Debye (19.2)
SEM	= microscopia elettronica (o microscopio elettronico) a scansione	λ = lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica (3.16)
t	= tempo	μ = permeabilità magnetica (20.2)
T	= temperatura	μ_B = magnetone di Bohr (20.2)
T_c	= temperatura di Curie (20.6)	μ_e = mobilità degli elettroni (18.7)
T_c	= temperatura critica di superconduttività (20.12)	μ_h = mobilità delle lacune (18.10)
T_f	= temperatura di fusione	μ_r = permeabilità magnetica relativa (20.2)
T_g	= temperatura di transizione vetrosa (13.9, 15.12)	ν = rapporto di Poisson (6.5)
t_r	= tempo di vita a rottura (8.12)	ν = frequenza della radiazione elettromagnetica (21.2)
TEM	= microscopia elettronica (o microscopio elettronico) a trasmissione	ρ = densità (3.5)
U_r	= modulo di resilienza (6.6)	ρ = resistività elettrica (18.2)
$[uvw]$	= indici per una direzione cristallografica (3.9)	ρ_t = raggio di curvatura all'apice della cricca (8.5)
		σ = sforzo nominale, di trazione o di compressione (6.2)
		σ = conduttività elettrica (18.3)
		σ^* = sforzo longitudinale (composito) (16.5)
		σ_c = sforzo critico per la propagazione di una cricca (8.5)
		σ_{fs} = resistenza alla flessione (12.9)
		σ_{max} = sforzo massimo (8.5)

σ_m	= sforzo medio (8.7)
σ'_m	= sollecitazione sulla matrice corrispondente alla rottura del composito (16.5)
σ_R	= sforzo di rottura (6.6)
σ_s	= sforzo di snervamento (6.6)
σ_T	= sforzo reale (6.7)
σ_w	= sforzo di sicurezza o di lavoro (6.12)
τ	= sforzo di taglio (6.2)
τ_c	= forza di legame all'interfaccia fibra-matrice o resistenza allo snervamento di taglio della matrice (16.4)
τ_{stic}	= sforzo di taglio indotto critico (7.5)
χ_m	= suscettività magnetica (20.2)

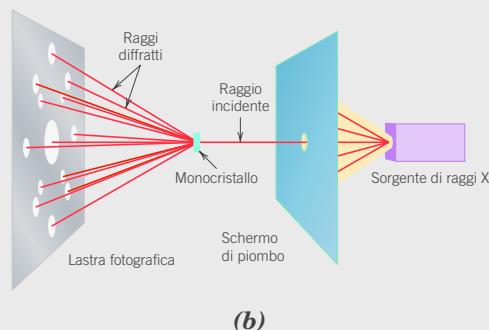
Pedici

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

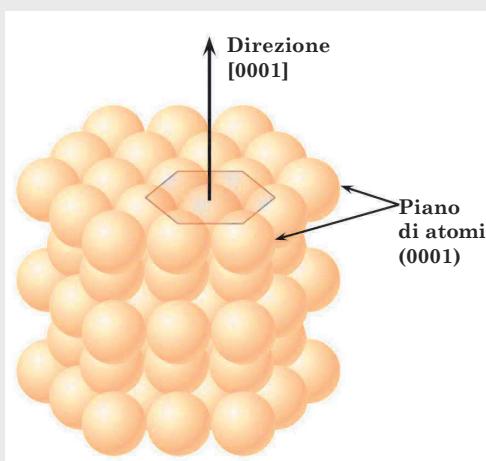
Capitolo 3 La struttura dei solidi cristallini



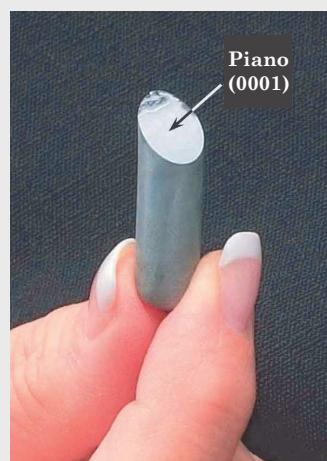
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

(a) Difrazione dei raggi X [o fotogramma di Laue (Sezione 3.16)] per un monocristallo di magnesio.

(b) Rappresentazione schematica che illustra come vengono generati i punti luminosi (spettro di diffrazione) rappresentati in figura (a). Lo schermo di piombo impedisce la trasmissione di tutti i fasci generati dalla sorgente di raggi X, fatta eccezione per un sottile fascio collimato che si propaga lungo una determinata direzione. Tale fascio incidente viene diffratto dai singoli piani cristallografici (aventi differenti orientazioni), dando origine a svariati raggi diffratti che vanno poi a colpire la lastra fotografica. Dopo lo sviluppo della pellicola, le intersezioni di questi raggi con la lastra appaiono come punti luminosi.

Il grosso punto luminoso al centro della figura (a) è

generato dal raggio incidente, parallelo a una direzione cristallografica [0001]. Si può notare che lo spettro di diffrazione a punti luminosi generato mostra chiaramente la simmetria esagonale della struttura esagonale compatta del magnesio [rappresentata in (c)].

(d) Fotografia di un monocristallo di magnesio che è stato spaccato (o suddiviso) lungo un piano cristallografico (0001) – la superficie piatta è proprio quella di un piano (0001). La direzione ortogonale a tale piano è una direzione cristallografica [0001].

(e) Fotografia di un cerchio in lega – ruota per automobile di basso peso che è fatta di magnesio.

PERCHÉ STUDIARE La struttura dei solidi cristallini?

Le proprietà di alcuni materiali sono direttamente correlate con la loro struttura cristallina. Ad esempio, il magnesio e il berillio puri e non deformati, hanno una determinata struttura cristallina e risultano molto più fragili (vale a dire presentano una più bassa deformazione a rottura) di altri metalli ugualmente puri e non deformati, quali l'oro e l'argento, che presentano una struttura cristallina differente (vedi Sezione 7.4).

Inoltre, a parità di composizione, un materiale cristallino e uno non cristallino manifestano proprietà significativamente differenti. Ad esempio, i materiali ceramici e polimerici non cristallini sono di norma trasparenti, mentre gli stessi materiali nella forma cristallina o semicristallina sono opachi o, tutt'al più, traslucidi.

Obiettivi di apprendimento

Dopo aver studiato questo capitolo, dovresti essere in grado di fare le seguenti cose:

1. Descrivere le differenze tra le strutture atomiche/molecolari dei materiali cristallini e non cristallini.
2. Disegnare le celle unitarie delle strutture cristalline cubiche a facce centrate, cubiche a corpo centrale ed esagonali compatte.
3. Derivare le relazioni intercorrenti tra la lunghezza del lato della cella unitaria e il raggio atomico per le strutture cristalline cubiche a facce centrate e cubiche a corpo centrale.
4. Calcolare le densità dei metalli aventi strutture cristalline cubiche a facce centrate e cubiche a corpo centrale a partire dalle dimensioni della cella unitaria.
5. Tracciare nella cella unitaria la direzione corrispondente a tre dati numeri interi che rappresentano gli indici della direzione stessa.
6. Individuare gli indici di Miller dei piani tracciati nelle celle unitarie.
7. Descrivere la modalità secondo la quale vengono generate le strutture cubiche a facce centrate ed esagonali compatte in seguito a sovrapposizione di piani di atomi ad elevata densità.
8. Distinguere un materiale monocristallino da uno policristallino.
9. Definire i termini *isotropia* e *anisotropia* in riferimento alle proprietà dei materiali.

3.1 INTRODUZIONE

Nel Capitolo 2 sono stati presentati i diversi tipi di legame atomico, i quali dipendono dalle strutture elettroniche dei singoli atomi. In questo capitolo, invece, si passa ad analizzare il livello successivo della struttura dei materiali, ovvero le modalità secondo le quali più atomi si dispongono per formare la struttura dei solidi. Verranno, pertanto, introdotti i concetti di cristallinità e non cristallinità. Nel caso dei solidi cristallini sarà introdotta la definizione di struttura cristallina, in termini di cella unitaria. Verranno presentate le tre strutture cristalline tipiche dei metalli e verrà, quindi, descritta la modalità di individuazione dei punti, delle direzioni e dei piani cristallografici. Nella trattazione verranno analizzati materiali monocristallini, policristallini e non cristallini. Un'altra breve sezione illustra il modo con cui si determinano sperimentalmente le strutture cristalline mediante l'uso di tecniche di diffrazione a raggi X.

Strutture cristalline

3.2 CONCETTI FONDAMENTALI

materiale cristallino

I materiali solidi possono essere classificati in base alla regolarità con cui gli atomi o gli ioni si dispongono nello spazio gli uni rispetto agli altri. In un **materiale cristallino** gli atomi sono disposti in modo ripetitivo o periodico, con un ordine che si mantiene su grandi distanze (atomiche); cioè, esiste un ordine a lungo raggio tale

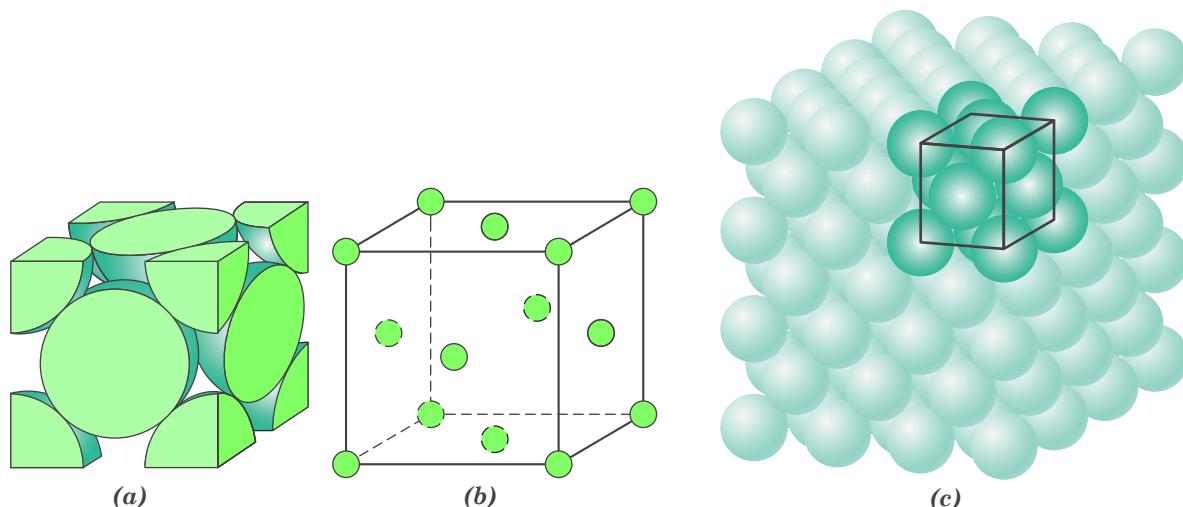


Figura 3.1 Struttura cristallina cubica a facce centrali (cfc): (a) rappresentazione della cella unitaria con il modello a sfere rigide, (b) rappresentazione con il modello a sfere ridotte e (c) aggregato di parecchi atomi. [Figura (c) da W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, John Wiley & Sons, 1964. Riproduzione autorizzata da Janet M. Moffatt.]

che, all'atto della solidificazione, gli atomi si dispongono spazialmente secondo uno schema tridimensionale ripetitivo, nel quale ciascun atomo è legato agli altri atomi immediatamente vicini. Tutti i metalli, diversi materiali ceramici e alcuni polimeri formano strutture cristalline nelle normali condizioni di solidificazione. Nei materiali che non cristallizzano durante la solidificazione, l'ordine atomico a lungo raggio è assente; questi materiali, denominati *non cristallini o amorfi*, verranno brevemente trattati alla fine del capitolo.

struttura cristallina

Alcune proprietà dei solidi cristallini dipendono dalla **struttura cristallina** del materiale, ovvero dalla modalità secondo la quale gli atomi, gli ioni o le molecole si dispongono nello spazio. Vi è un numero molto vasto di possibili strutture cristalline, tutte caratterizzate dalla presenza di ordine atomico a lungo raggio; queste variano dalle strutture cristalline relativamente semplici dei metalli a strutture estremamente complesse, quali quelle mostrate da alcuni materiali ceramici e polimerici. In questo capitolo verranno trattate le più comuni strutture cristalline dei metalli. I Capitoli 12 e 14 sono invece dedicati alla trattazione delle strutture cristalline presenti, rispettivamente, nei materiali ceramici e in quelli polimerici.

reticolo

Per descrivere le strutture cristalline, gli atomi (o gli ioni) sono rappresentati da sfere di un preciso diametro. Questo modello è definito *modello atomico a sfere rigide* e in esso le sfere che rappresentano atomi immediatamente adiacenti si toccano. Un esempio dell'utilizzo del modello a sfera rigida per la rappresentazione della disposizione degli atomi che si riscontra in alcuni comuni elementi metallici è riportato in Figura 3.1c. In questo caso particolare tutti gli atomi sono identici. Talvolta, per le strutture cristalline si usa il termine **reticolo**; con questo termine si intende una griglia tridimensionale nella quale i punti di intersezione tra le diverse linee coincidono con i centri delle posizioni occupate dagli atomi (ovvero coincidono con i centri delle sfere).

3.3 CELLE UNITARIE

cella unitaria

L'ordine atomico presente nelle strutture cristalline deriva dallo schema ripetitivo con cui si dispongono piccoli gruppi di atomi. Pertanto, risulta spesso conveniente descrivere le strutture cristalline come la ripetizione della più piccola unità ordinata ripetitiva che viene chiamata **cella unitaria**. Nella maggior parte delle strutture cristalline le celle unitarie hanno la forma geometrica di un parallelepipedo o di un prisma

avente tre coppie di facce parallele; nella Figura 3.1c viene mostrata una cella unitaria a geometria cubica all'interno dell'aggregato di sfere. La cella unitaria descrive il tipo di simmetria presente nel cristallo, dal momento che tutte le posizioni atomiche del cristallo possono essere generate traslando la cella unitaria, lungo le direzioni individuate dai suoi spigoli, di distanze che sono multipli interi delle rispettive dimensioni della cella stessa. Pertanto, la cella unitaria può essere considerata l'unità strutturale di base per la costruzione del reticolo cristallino, che viene individuato in base alla geometria della cella e alla disposizione degli atomi al suo interno. Nella rappresentazione a sfere rigide si assume, per convenzione, che i centri delle sfere coincidano con i vertici dei parallelepipedi raffiguranti le celle. Inoltre, una particolare struttura cristallina può essere rappresentata da più di una cella unitaria; comunque, generalmente si sceglie di impiegare la cella unitaria che presenta la maggiore simmetria geometrica.

3.4 STRUTTURE CRISTALLINE DEI METALLI

Il legame tra gli atomi in questo gruppo di materiali è di tipo metallico e, pertanto, ha una natura intrinsecamente adirezionale. Ne deriva che non vi sono particolari restrizioni nel numero e nelle posizioni relative che gli atomi immediatamente adiacenti tra loro possono occupare; pertanto, la maggior parte delle strutture cristalline dei metalli è caratterizzata dalla presenza di un gran numero di atomi e dall'elevato grado di densità di compattazione di atomi adiacenti. Nel caso dei metalli, si deve anche tenere presente che, nel modello a sfere rigide, ciascuna sfera rappresenta il centro di un atomo ionizzato. La Tabella 3.1 riporta i valori del raggio atomico per un certo numero di metalli. Le strutture cristalline dei metalli più comunemente impiegati sono tre e sono relativamente semplici: cubica a facce centrate (fcf), cubica a corpo centrale (ccc) ed esagonale compatta (es.c).

Struttura cristallina cubica a facce centrate

La struttura cristallina tipica di molti materiali metallici è caratterizzata da una cella unitaria cubica, nella quale gli atomi sono disposti ai vertici del cubo e al centro di ciascuna faccia. Questa struttura cristallina è chiamata **struttura cubica a facce centrate (fcf)**. Il rame, l'alluminio, l'argento e l'oro (Tabella 3.1) sono alcuni metalli familiari che presentano tale struttura cristallina. La Figura 3.1a mostra la cella fcf rappresentata usando il modello a sfere rigide, mentre i cerchietti della Figura 3.1b rappresentano soltanto i centri degli atomi in maniera da offrire una visione più semplice delle posizioni atomiche. L'aggregazione di atomi di Figura 3.1c, invece, raffigura una porzione del cristallo formata dall'insieme di più celle unitarie fcf. In questo caso le sfere raffiguranti gli ioni si toccano lungo le diagonali delle facce del cubo e, pertanto, si può individuare una relazione tra la lunghezza dello spigolo del cubo a e il raggio atomico R , data da

$$a = 2R\sqrt{2} \quad (3.1)$$

Questa relazione viene derivata nell'Esempio di problema 3.1.

struttura cubica a facce centrate (fcf)

Lunghezza dello spigolo della cella unitaria cubica a facce centrate

Tabella 3.1
Raggi atomici e strutture cristalline di 16 metalli

Metallo	Struttura cristallina ^a	Raggio atomico ^b (nm)	Metallo	Struttura cristallina ^a	Raggio atomico ^b (nm)
Alluminio	cfc	0.1431	Oro	cfc	0.1442
Argento	cfc	0.1445	Piombo	cfc	0.1750
Cadmio	es.c	0.1490	Platino	cfc	0.1387
Cobalto	es.c	0.1253	Rame	cfc	0.1278
Cromo	ccc	0.1249	Tantalo	ccc	0.1430
Ferro (α)	ccc	0.1241	Titanio (α)	es.c	0.1445
Molibdeno	ccc	0.1363	Tungsteno	ccc	0.1371
Nichel	cfc	0.1246	Zinco	es.c	0.1332

^a fcf = cubica a facce centrate; es.c = esagonale compatta; ccc = cubica a corpo centrale.

^b Un nanometro (nm) equivale a 10^{-9} m; per convertire i nm in angstrom (\AA), moltiplicare per 10 il valore espresso in nanometri.

A volte si rende necessario determinare il numero di atomi associati a ciascuna cella unitaria. Ciascun atomo, in funzione della posizione occupata all'interno della cella unitaria, può risultare condiviso anche con la cella adiacente cosicché solo una frazione dell'atomo risulterà assegnata alla singola cella unitaria. Ad esempio, per le celle unitarie cubiche, un atomo che si trova completamente all'interno della cella unitaria "appartiene" totalmente ad essa; mentre un atomo che si trova su una faccia è condiviso con la cella adiacente e l'atomo che si trova sullo spigolo è condiviso con otto celle. Il numero di atomi per cella unitaria, N , può essere calcolato usando la seguente formula:

$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{8} \quad (3.2)$$

dove:

N_i = numero di atomi interni

N_f = numero di atomi nelle facce

N_c = numero di atomi negli spigoli

Per la struttura cristallina cfc, ci sono otto atomi negli spigoli ($N_c = 8$), sei nelle facce ($N_f = 6$) e nessun atomo al centro ($N_i = 0$); quindi dall'Equazione 3.2 si ha:

$$N = 0 + \frac{6}{2} + \frac{8}{8} = 4$$

ed un totale cumulativo di quattro atomi interi può essere assegnato ad una data cella unitaria. Si può verificare quanto detto osservando la Figura 3.1a, nella quale sono raffigurate soltanto le porzioni delle sfere che ricadono all'interno della cella cubica. La cella è definita dal volume del cubo, il quale è delimitato dai centri degli atomi presenti ai vertici, come riportato nella figura.

Le posizioni ai vertici e sulle facce sono equivalenti fra loro; infatti, la struttura della cella non viene alterata se si trasla un atomo dalla sua posizione originaria al vertice del cubo o al centro di una faccia.

Ciascuna struttura cristallina è caratterizzata da altre due grandezze importanti: il **numero di coordinazione** e il **fattore di compattazione atomica (FCA)**. Nei metalli ciascun atomo ha un uguale numero di atomi immediatamente adiacenti o a contatto con esso, numero che viene detto numero di coordinazione. Nelle strutture cubiche a facce centrate il numero di coordinazione è 12. Questo numero può essere ricavato esaminando la Figura 3.1a; l'atomo posizionato sulla faccia anteriore ha quattro atomi immediatamente adiacenti posizionati su ciascuno dei quattro vertici, quattro atomi posizionati sulle facce in contatto con esso posteriormente e altri quattro atomi equivalenti appartenenti alle facce in contatto frontalmente e appartenenti alla cella unitaria successiva, che non è rappresentata in figura.

Il FCA rappresenta la somma dei volumi delle sfere di tutti gli atomi appartenenti alla cella unitaria (assumendo il modello a sfere rigide) divisa per il volume della cella unitaria, cioè

$$\text{FCA} = \frac{\text{volume degli atomi in una cella unitaria}}{\text{volume totale della cella unitaria}} \quad (3.3)$$

Definizione di fattore di compattazione atomica

Per la struttura cfc il fattore di compattazione atomica è 0.74, il quale è il massimo possibile nel caso di sfere dello stesso diametro. Il calcolo di questo FCA è anche riportato in un esempio di problema. I metalli presentano in genere elevati valori di fattore del compattazione atomica, in maniera da poter massimizzare la schermatura offerta dalla nuvola di elettroni liberi.

Struttura cristallina cubica a corpo centrale

Esiste anche un'altra struttura cristallina cubica, tipica dei metalli, in cui la cella unitaria ha un atomo situato al centro e gli altri situati agli otto vertici del cubo. Questa struttura cristallina è chiamata **cubica a corpo centrale (ccc)**. La Figura 3.2c riporta

Struttura cubica a corpo centrale (ccc)

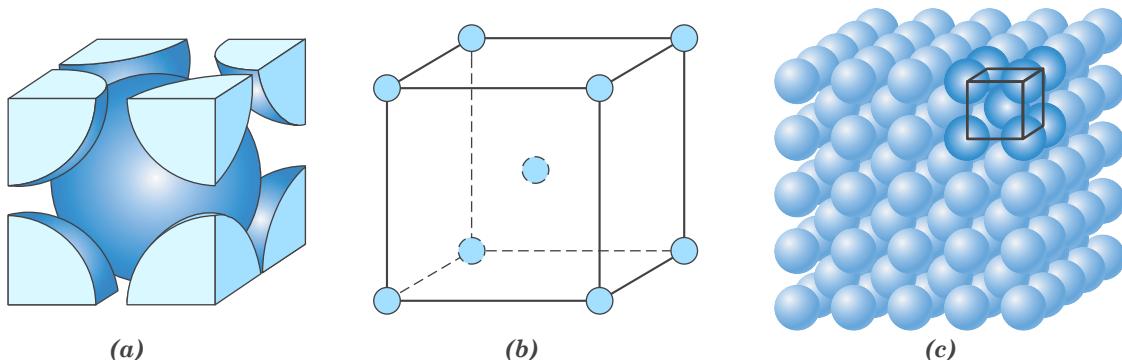


Figura 3.2 Struttura cristallina cubica a corpo centrale, (a) rappresentazione della cella unitaria a sfere rigide, (b) cella unitaria rappresentata con sfere ridotte, (c) un aggregato di molti atomi.

[Figura (c) da W. G. Moffatt, G.W. Pearsall, and J.Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, John Wiley & Sons, 1964. Riproduzione autorizzata da Janet M. Moffatt].

un insieme di sfere che rappresentano questa struttura cristallina, mentre le Figure 3.2a e 3.2b riportano la raffigurazione della cella unitaria ccc rispettivamente con gli atomi rappresentati dal modello a sfere rigide e a sfere di dimensioni ridotte. Nella cella ccc gli atomi posizionati al centro e ai vertici si toccano lungo la diagonale del cubo e, pertanto, la lunghezza dello spigolo della cella a e il raggio atomico R sono legati dalla relazione

Lunghezza dello spigolo della cella unitaria cubica a corpo centrato

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} \quad (3.4)$$

Il cromo, il ferro, il tungsteno e molti altri metalli riportati nella Tabella 3.1 possiedono una struttura cristallina ccc.

Ad ogni cella ccc sono associati complessivamente due atomi: l'equivalente di un atomo proviene dagli atomi presenti agli otto vertici della cella, ognuno dei quali viene condiviso da otto celle unitarie adiacenti, e l'atomo singolo posizionato al centro della cella, che è interamente contenuto nella cella stessa; dall'Equazione 3.2 si ha

$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{8}$$

$$= 1 + 0 + \frac{8}{8} = 2$$

Il numero di coordinazione per la struttura cristallina ccc è pari a 8; infatti, ogni atomo centrale ha come primi vicini gli otto atomi giacenti ai vertici del cubo. Dal momento che il numero di coordinazione della cella ccc è minore di quello della cella cfc, anche il fattore di compattazione atomica della cella ccc sarà minore (0.68 rispetto allo 0.74 della cfc).

È possibile avere anche una cella unitaria costituita da atomi situati solo sugli spigoli di un cubo, chiamata *struttura cristallina cubica semplice* (*cs*); le Figure 3.3a e 3.3b riportano la raffigurazione della cella unitaria *cs* rispettivamente con gli atomi rappresentati dal modello a sfere rigide e a sfere di dimensioni ridotte. Nessun elemento metallico presenta questa struttura cristallina a causa del suo fattore di compattazione atomica relativamente basso (vedi Verifica dei concetti 3.1) ad eccezione del polonio che è comunque considerato come un metalloide (o semi-metallo).

Struttura cristallina esagonale compatta

Non tutti i metalli presentano celle unitarie a simmetria cubica; infatti, è anche comune trovare metalli con strutture cristalline a cella esagonale. La Figura 3.4a mostra una cella unitaria con questa struttura, raffigurata con il metodo delle sfere ridotte, che viene denominata **esagonale compatta (es.c.)**. Nella Figura 3.4b¹ viene

Struttura esagonale compatta (es.c)

¹ Alternativamente, la cella unitaria per cristalli a struttura es.c può essere rappresentato dal parallelepipedo individuato dagli atomi identificati dalle lettere da A ad H in Figura 3.4a. Difatti, l'atomo identificato con la J si trova all'interno della cella unitaria.

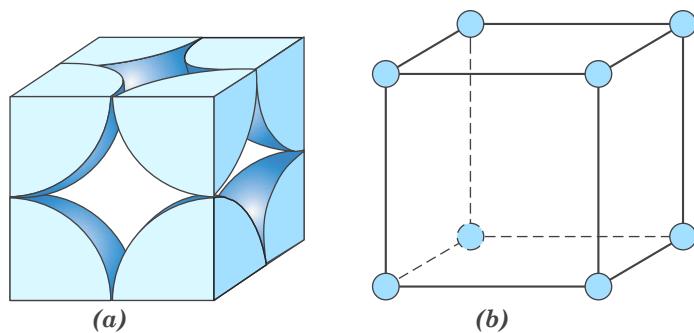


Figura 3.3 Struttura cristallina cubica semplice, (a) rappresentazione della cella unitaria a sfere rigide, (b) cella unitaria rappresentata con sfere ridotte.

rappresentato l'insieme di diverse celle es.c. Le facce superiore ed inferiore della cella unitaria sono entrambe costituite da sei atomi disposti a formare un esagono regolare, che circondano un atomo posto nel centro dell'esagono. Tra le due facce esagonali vi è un piano intermedio nel quale sono situati altri tre atomi, i quali hanno come primi vicini gli atomi appartenenti alle due facce suddette.

Nel caso delle strutture cristalline es.c, l'Equazione 3.2 per il calcolo del numero di atomi per cella unitaria diventa:

$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{6} \quad (3.5)$$

Infatti, un sesto di ognuno degli atomi posizionati nei vertici è assegnato alla cella unitaria (invece di 8 come visto nelle strutture cubiche). Considerando che nella struttura es.c vi sono 6 atomi posizionati nei vertici di ciascuna faccia, superiore ed inferiore, (per un totale di 12 atomi), 2 atomi al centro delle facce superiore ed inferiore (uno per ciascuna faccia), 3 atomi posizionati sul piano intermedio, dall'Equazione 3.5 il valore N per la struttura es.c sarà pari a:

$$N = 3 + \frac{2}{2} + \frac{12}{6} = 6$$

Ogni cella es.c contiene quindi l'equivalente di 6 atomi.

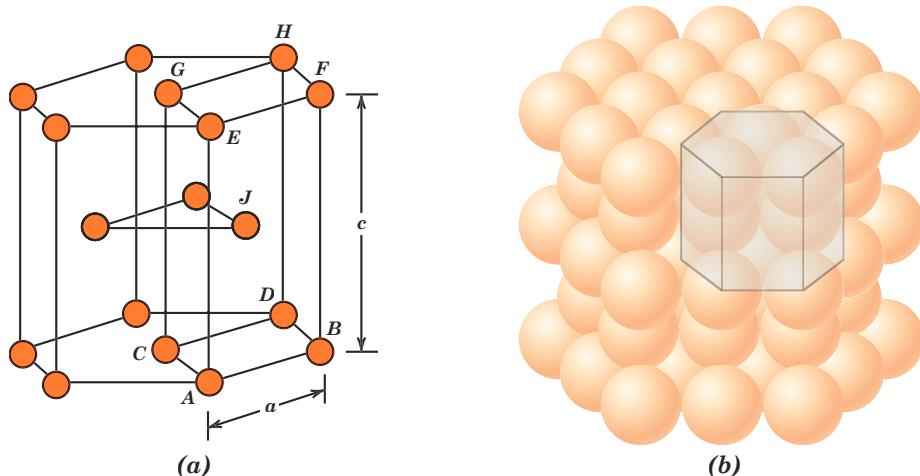


Figura 3.4 Struttura cristallina esagonale compatta, (a) cella unitaria rappresentata con sfere ridotte (a e c rappresentano, rispettivamente, le lunghezze del lato della base e dell'altezza), e (b) un aggregato di molti atomi.

Inoltre, se si indicano con a e c , rispettivamente, la lunghezza dei lati di base e la lunghezza degli assi verticali della cella raffigurata in Figura 3.4a, allora il rapporto c/a dovrebbe essere pari a 1.633; tuttavia, nel caso di alcuni metalli che presentano cella es.c il valore di questo rapporto devia da tale valore ideale.

Il numero di coordinazione e il fattore di compattazione atomica della struttura es.c sono gli stessi di quelli della struttura cfc, ovvero rispettivamente 12 e 0.74. Tra i metalli a struttura es.c si menzionano il cadmio, il magnesio, il titanio e lo zinco. Alcuni di questi sono elencati nella Tabella 3.1.

ESEMPIO DI PROBLEMA 3.1

Determinazione del volume di una cella unitaria cfc

Calcolare il volume di una cella unitaria cfc in funzione del raggio atomico R .

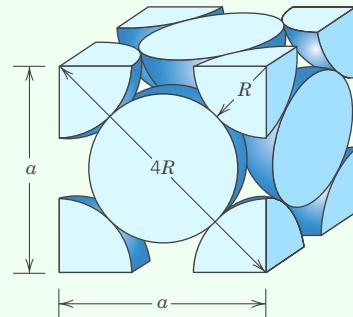
Soluzione

Nella cella cfc illustrata, gli atomi sono in contatto lungo la diagonale della faccia del cubo, la cui lunghezza è pari a $4R$. Dal momento che la cella unitaria è cubica, il suo volume è pari a a^3 , dove a è la lunghezza del lato della cella. Dal triangolo rettangolo sulla faccia si ha

$$a^2 + a^2 = (4R)^2$$

risolvendo rispetto ad a ,

$$a = 2R\sqrt{2} \quad (3.1)$$



Il volume V_c della cella unitaria cfc può essere calcolato come

$$V_c = a^3 = (2R\sqrt{2})^3 = 16R^3\sqrt{2} \quad (3.6)$$

ESEMPIO DI PROBLEMA 3.2

Calcolo del fattore di compattazione atomica per una struttura cristallina cfc

Dimostrare che il fattore di compattazione atomica della struttura cristallina cfc è 0.74.

Soluzione

Il FCA è definito come la frazione di volume delle sfere all'interno della cella unitaria, ovvero

$$\text{FCA} = \frac{\text{volume degli atomi in una cella unitaria}}{\text{volume totale della cella unitaria}} = \frac{V_s}{V_c}$$

Sia il volume totale degli atomi che il volume della cella unitaria possono essere calcolati in funzione del raggio atomico R . Il volume di una sfera è dato da $\frac{4}{3}\pi R^3$ e, poiché vi sono 4 atomi per cella unitaria cfc, il volume totale occupato dagli atomi (o sfere) è dato da

$$V_s = (4) \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{16}{3}\pi R^3$$

Dall'Esempio di problema 3.1, il volume totale della cella è dato da

$$V_c = 16R^3\sqrt{2}$$

Pertanto, il fattore di compattazione atomica vale

$$\text{FCA} = \frac{V_s}{V_c} = \frac{\left(\frac{16}{3}\right)\pi R^3}{16R^3\sqrt{2}} = 0.74$$

Verifica dei concetti 3.1

- (a) Qual è il numero di coordinazione per la struttura cristallina cubica semplice?
- (b) Calcolare il fattore di compattazione atomica per la struttura cristallina cubica semplice.
[La risposta è disponibile nella versione digitale del libro].

ESEMPIO DI PROBLEMA 3.3**Determinazione del volume di una cella unitaria es.c**

- (a) Calcolare il volume di una cella unitaria es.c in funzione dei parametri di cella a e c .
- (b) Derivare un'espressione per il calcolo di questo volume in funzione del raggio atomico, R , e del parametro di cella c .

Soluzione

(a) Facciamo riferimento alla raffigurazione della cella unitaria es.c con gli atomi rappresentati dal modello a sfere di dimensioni ridotte.

Il volume della cella unitaria è dato dal prodotto dell'area della base per l'altezza c . L'area della base, a sua volta, è uguale a tre volte l'area del parallelogramma $ACDE$.

L'area del parallelogramma $ACDE$ è pari al prodotto del lato \overline{CD} per l'altezza \overline{BC} . \overline{CD} è semplicemente pari al parametro di cella a mentre \overline{BC} è pari a:

$$\overline{BC} = a \cos(30^\circ) = \frac{a\sqrt{3}}{2}$$

Quindi, l'area della base sarà:

$$\text{AREA} = (3)(\overline{CD})(\overline{BC}) = (3)(a) \left(\frac{a\sqrt{3}}{2} \right) = \left(\frac{3a^2\sqrt{3}}{2} \right)$$

Ed il volume della cella unitaria V_c sarà dato dal prodotto dell'area della base per l'altezza della cella (c):

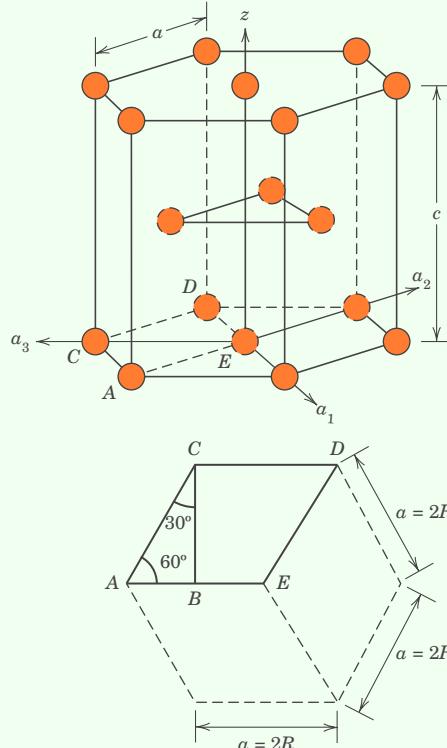
$$\begin{aligned} V_c &= \text{AREA}(c) \\ &= \left(\frac{3a^2\sqrt{3}}{2} \right)(c) \\ &= \frac{3a^2c\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \tag{3.7a}$$

- (b) Considerando la relazione che lega il parametro di cella a con il raggio atomico R

$$a = 2R$$

e sostituendo nell'Equazione 3.7a, si ha:

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{3(2R)^2 c \sqrt{3}}{2} \\ &= 6R^2 c \sqrt{3} \end{aligned} \tag{3.7b}$$



3.5 CALCOLO DELLA DENSITÀ

Densità teorica dei metalli

La conoscenza della struttura cristallina di un metallo consente di valutarne la densità reale ρ , tramite la relazione

$$\rho = \frac{nA}{V_c N_A} \quad (3.8)$$

dove

n = numero di atomi associati a ogni cella unitaria

A = peso atomico

V_c = volume della cella unitaria

N_A = numero di Avogadro (6.022×10^{23} atomi/mole)

ESEMPIO DI PROBLEMA 3.4

Calcolo della densità teorica del rame

Il rame ha raggio atomico pari a 0.128 nm, struttura cristallina cfc e peso atomico di 63.5 g/mol. Calcolare il valore della densità teorica e si confronti il risultato ottenuto con il valore della densità misurata.

Soluzione

Per risolvere questo problema è necessario utilizzare l'Equazione 3.8. Poiché il rame ha struttura cristallina cfc, il numero n di atomi per cella unitaria è 4. Inoltre, il peso atomico A_{Cu} è pari a 63.5 g/mole. Il volume V_c della cella cfc è stato determinato nell'Esempio di problema 3.1 e vale $16R^3\sqrt{2}$, dove R , il raggio atomico, è pari a 0.128 nm.

Sostituendo i valori nell'Equazione 3.8 si ottiene

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Cu}} &= \frac{nA_{\text{Cu}}}{V_c N_A} = \frac{nA_{\text{Cu}}}{(16R^3\sqrt{2})N_A} \\ &= \frac{(4 \text{ atomi / cella unitaria})(63.5 \text{ g/mole})}{[16\sqrt{2}(1.28 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 / \text{cella unitaria}](6.022 \times 10^{23} \text{ atomi/mole})} \\ &= 8.89 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Il valore della densità del rame riportato in letteratura è 8.94 g/m³, che è di fatto in buon accordo con il valore calcolato.

3.6 POLIMORFISMO E ALLOTROPIA

polimorfismo
allotropia

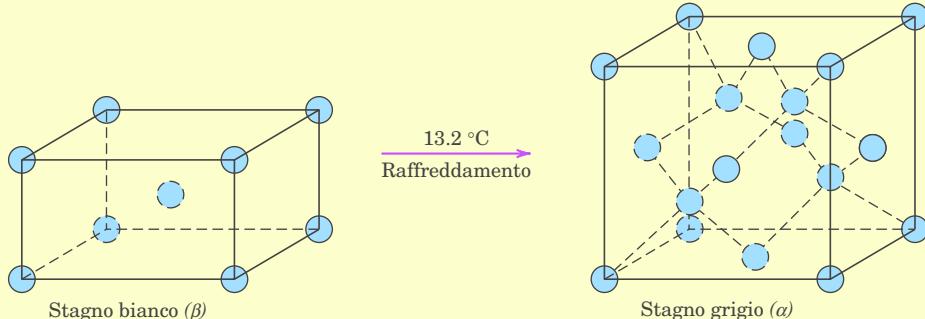
Alcuni metalli, ma anche alcuni non metalli, possono presentare più di una struttura cristallina, un fenomeno noto come **polimorfismo**. Quando si verifica in solidi elementari, tale condizione viene spesso denominata **allotropia**. La struttura cristallina prevalente tra quelle possibili dipende sia dalla temperatura che dalla pressione esterna. Un esempio familiare è quello del carbonio: in normali condizioni ambientali si presenta in forma di grafite, mentre a pressioni estremamente elevate si forma il diamante. Anche il ferro puro presenta polimorfismo, avendo una struttura cristallina ccc a temperatura ambiente che si trasforma in una struttura cfc a 912 °C (1185 K). La transizione polimorfa è spesso accompagnata da variazioni della densità o di altre proprietà fisiche del materiale.

ARGOMENTI DI APPROFONDIMENTO 3.1

Stagno (le sue trasformazioni allotropiche)

Un altro metallo comune che è soggetto a cambiamenti allotropici è lo stagno. Lo stagno bianco (anche detto β), che a temperatura ambiente ha una struttura cristallina tetragonale a corpo centrale, si trasforma, a 13.2 °C (286.2 K), in stagno grigio (an-

che detto α), che ha una struttura cristallina simile al diamante (ovvero la struttura cristallina cubica del diamante); questa trasformazione è rappresentata schematicamente qui di seguito:



La velocità con la quale avviene questa trasformazione è estremamente bassa; comunque, quanto più è bassa la temperatura (al di sotto di 13.2 °C), tanto più è elevata la velocità. Questa trasformazione da stagno bianco a stagno grigio è accompagnata da un aumento di volume (27%) e, conseguentemente, da una riduzione della densità (da 7.30 g/cm³ a 5.77 g/cm³). Questo incremento di volume determina la disaggregazione dello stagno bianco in una polvere grossolana della forma allotropica grigia. A temperature normali al di sotto di quella ambiente non c'è da preoccuparsi di questo processo di disaggregazione per i prodotti in stagno, in quanto la trasformazione procede a velocità estremamente bassa.

Questa transizione da stagno bianco a stagno grigio produsse alcune conseguenze alquanto drammatiche in Russia nel 1850. L'inverno di quell'anno fu particolarmente freddo e temperature inusualmente basse si mantennero tali per periodi di tempo prolungati. Le uniformi di diversi soldati russi avevano bottoni in stagno, che si sbriciolarono a causa delle condizioni di estremo freddo, come pure successe nelle chiese a molte canne di organo realizzate in stagno. Questo problema divenne in seguito noto come "la peste dello stagno".



Provino di stagno bianco (sulla sinistra). Un altro provino dopo la trasformazione in stagno grigio (sulla destra), sbriciolatosi in seguito a raffreddamento e successivo mantenimento ad una temperatura inferiore a 13.2 °C per un prolungato periodo di tempo. (Fotografia cortesemente fornita dal Professor Bill Plumbridge, Dipartimento of Materials Engineering, The Open University, Milton Keynes, Inghilterra).

3.7 SISTEMI CRISTALLINI

Le strutture cristalline possibili sono molto numerose, per cui a volte è conveniente suddividerle in gruppi, basandosi sulle configurazioni della cella unitaria e/o sulle disposizioni atomiche. Uno di tali schemi si basa sulla geometria della cella unitaria, cioè sulla forma del parallelepipedo appropriato a rappresentare la cella unitaria, senza tenere conto delle posizioni occupate dagli atomi all'interno della cella. In tale ottica, si definisce un sistema di coordinate xyz con origine in uno dei vertici della cella unitaria; ciascuno degli assi x , y e z coincide con uno dei tre spigoli del parallelepipedo che si diparte da questo vertice, come mostrato in Figura 3.5. La geometria della cella unitaria è completamente definita mediante sei parametri: le lunghezze dei tre spigoli a , b , c e i tre angoli α , β e γ tra gli assi. Essi sono indicati in Figura 3.5 e vengono anche chiamati **parametri reticolari** di una struttura cristallina.

Parametri reticolari

Sistema cristallino

Basandosi su queste definizioni, si possono individuare sette differenti combinazioni possibili di a , b , c e α , β , γ , ciascuna delle quali rappresenta un distinto **sistema cristallino**. Questi sette sistemi cristallini sono cubico, tetragonale, esagonale, ortorombico, romboedrico,² monoclinico e triclinico. Le relazioni tra i parametri reticolari e le rappresentazione grafica della cella unitaria per ciascun sistema sono riportate nella Tabella 3.2. Il sistema cubico, per il quale $a = b = c$ e $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, ha il maggior grado di simmetria. La minor simmetria si presenta nel sistema triclinico, poiché $a \neq b \neq c$ e $\alpha \neq \beta \neq \gamma$.³

Da quanto si è visto per le strutture cristalline metalliche, è evidente che le strutture cfc e ccc appartengono entrambe al sistema cristallino cubico, mentre la struttura es.c ricade in quello esagonale. La cella unitaria esagonale in realtà è formata da tre parallelepipedi posizionati come mostrato nella Tabella 3.2.

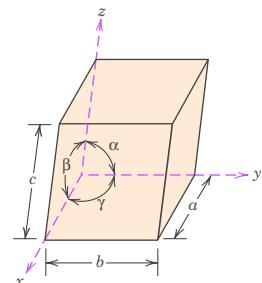


Verifica dei concetti 3.2 Qual è la differenza tra struttura cristallina e sistema cristallino?

[La risposta è disponibile nella versione digitale del libro].

È importante notare che molti dei principi e dei concetti discussi precedentemente in questo capitolo si applicano anche ai sistemi cristallini ceramici e polimerici (Capitoli 12 e 14). In questi casi le strutture cristalline vengono quasi sempre descritte in termini di celle unitarie, che in genere sono più complesse di quelle cfc, ccc ed es.c. Inoltre, per questi altri sistemi, si è spesso interessati a determinare i fattori di compattazione atomica e le densità, usando forme modificate delle Equazioni 3.3 e 3.8. Infine, le strutture cristalline di questi altri tipi di materiali sono raggruppate nei sette sistemi cristallini in base alla geometria della cella unitaria.

Figura 3.5 Rappresentazione di una cella unitaria con assi di coordinate x , y e z , dove sono mostrate le lunghezze degli assi (a , b e c) e gli angoli tra gli assi (α , β e γ).



² Detto anche *trigonale*.

³ In termini semplici, il grado di simmetria cristallina può essere associato al numero di parametri necessari a descrivere la cella unitaria, ovvero, simmetrie più alte sono associate ad un minor numero di parametri. Ad esempio, le strutture cubiche hanno la simmetria più alta e presentano un solo parametro reticolare, vale a dire la lunghezza del bordo a , che descrive la cella unitaria. Viceversa, il triclinico, che ha la simmetria più bassa, viene individuato da sei parametri reticolari, tre lunghezze dei bordi delle celle unitarie e tre angoli interassiali.

Tavella 3.2 Relazioni tra i parametri reticolari e figure geometriche delle celle unitarie per i sette sistemi cristallini

Sistema cristallino	Relazioni fra gli assi	Angoli fra gli assi	Geometria della cella unitaria
Cubico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Esagonale	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonale	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Romboedrico (trigonale)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Ortorombico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclino	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclino	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Punti, direzioni e piani cristallografici

Nel trattare i materiali cristallini, risulta spesso necessario specificare un particolare punto all'interno della cella unitaria, una certa direzione cristallografica o alcuni piani cristallografici degli atomi. Al riguardo si sono stabilite alcune convenzioni per la loro individuazione, in base alle quali si usano tre numeri, o indici, per identificare le posizioni dei punti, le direzioni e i piani. La base per individuare i valori degli indici è la cella unitaria, con un sistema di coordinate destrorso costituito da tre assi (x , y , z) con origine in uno dei vertici e coincidenti con gli spigoli della cella unitaria, come mostrato in Figura 3.5. Per alcuni sistemi cristallini – in particolare quelli esagonale, romboedrico, monoclinico e triclinico – i tre assi *non* sono tra loro mutuamente perpendicolari, come invece avviene nell'usuale schema di coordinate cartesiane.

3.8 COORDINATE DEI PUNTI

A volte è necessario individuare la posizione di un qualsiasi punto all'interno della cella unitaria. Essa viene definita in termini di *coordinate lungo gli assi x , y e z* (P_x , P_y e P_z) attraverso gli *indici q , r e s* . Tali indici sono multipli frazionari delle lunghezze degli spigoli della cella unitaria (a , b , c), dove q è la lunghezza frazionaria di a lungo l'asse x , r la lunghezza frazionaria di b lungo l'asse y e analogamente per s . Così facendo, le coordinate del punto (P) saranno uguali al prodotto dell'indice per la lunghezza del rispettivo spigolo

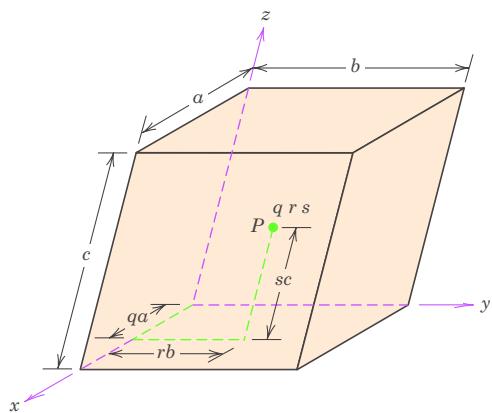
$$P_x = qa \quad (3.9a)$$

$$P_y = rb \quad (3.9b)$$

$$P_z = sc \quad (3.9c)$$

Consideriamo la cella unitaria mostrata in Figura 3.6, in cui l'origine degli assi x , y e z corrisponde con uno spigolo della cella ed è indicato il punto P all'interno della cella; la posizione del punto P risulta individuata dal prodotto di ciascun indice (q , r e s) per la lunghezza del rispettivo spigolo (a , b e c)⁴.

Figura 3.6 Illustrazione del modo con cui vengono determinate le coordinate q , r e s del punto P all'interno della cella unitaria. La coordinata q (che è una frazione) corrisponde alla distanza qa lungo l'asse x , dove a è la lunghezza dello spigolo della cella unitaria. Le coordinate r e s , rispettivamente lungo gli assi y e z , vengono determinate in modo analogo.



⁴ Abbiamo scelto di non separare queste coordinate con virgole o con altri segni di interpunkzione (come vuole la normale convenzione).

William D. Callister Jr. • David G. Rethwisch

Scienza ed Ingegneria dei Materiali

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**.



€ 59,00

