

Franco Pratesi

Microstruttura e proprietà meccaniche dei metalli



Copyright © MMVIII
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-2163-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: novembre 2008

Indice

Premessa.....	7
Simboli e abbreviazioni	9
Solidificazione e diagrammi di fase.....	13
Diagrammi binari semplici	14
Diagrammi binari complessi.....	24
Diagrammi ternari.....	29
Solidificazione	32
Struttura ideale	39
Livelli strutturali e cristalli	39
Periodicità in una dimensione.....	42
Reticoli bidimensionali.....	43
Celle elementari e reticoli bravaisiani	45
Reticoli caratteristici dei metalli.....	51
Massimo impacchettamento	56
Difetti reticolari.....	69
Concetto di difetto	69
Difetti di punto.....	70
Dislocazioni	78
Difetti a due dimensioni.....	100
Difetti a tre dimensioni	109
Struttura di metalli e leghe	117
Metalli puri	117
Leghe	123
Composti intermetallici e casi particolari	132

Resistenza meccanica.....	151
Sollecitazioni, deformazioni e moduli elastici	151
Resistenza del legame e deformazione.....	159
Misure sperimentali della resistenza meccanica	163
Incrudimento e ricottura	175
Incrudimento	176
Ricottura.....	185
Orientamento preferenziale	194
Rafforzamento	199
Limite di snervamento in pratica e in teoria.....	199
Meccanismi di rafforzamento.....	202
Tenacità a frattura.....	219
Fragilità dei materiali	220
Tenacità a frattura nei metalli.....	224
Casi particolari di resistenza meccanica	233
Attrito interno.....	233
Fatica	236
Resistenza chimica e alla temperatura	241
Usura	254
Bibliografia.....	257

Premessa

Il presente libro risulta dalla riedizione di due libri pubblicati recentemente dallo stesso editore (con i titoli di *Struttura cristallina dei metalli* e *Proprietà meccaniche dei metalli*) di cui mantengono la numerazione delle figure, qui precedute rispettivamente da B e da C. La parte iniziale sui diagrammi di fase (con figure precedute da A) deriva invece da un altro libro, *Dall'oro al platino*, pubblicato pure da Aracne. Questa riedizione contiene inoltre diverse modifiche e correzioni.

Lo studio della struttura cristallina è fondamentale per la comprensione di molte proprietà dei materiali; ciò vale per la struttura ideale ma anche per quella reale, in cui i difetti reticolari giocano un ruolo importante. Delle varie classi di materiali qui è stato posto l'accento su quelli metallici, ma la conoscenza della microstruttura – come delineata nei primi due capitoli – mantiene il suo significato per tutti gli altri materiali. Il terzo capitolo ha invece un carattere più avanzato e sono introdotti settori di produzione e di ricerca che stanno presentando sviluppi considerevoli. In questi casi, la stessa bibliografia potrà rivelarsi insufficiente per un approfondimento: ogni tipo diverso di leghe e composti intermetallici avrebbe bisogno di una monografia esclusiva; lo stesso vale per le leghe contrassegnate come SMA o BMG o in generale per i quasicristalli e i nanomateriali.

L'argomento successivo delle proprietà meccaniche è stato svolto dal punto di vista della scienza dei materiali e della metallurgia fisica, intendendo cioè di risalire alle proprietà partendo dalla conoscenza della struttura atomica. Il livello è introduttivo, con l'attenzione messa a fuoco sui principali meccanismi responsabili delle caratteristiche meccaniche.

I termini tecnici sono spesso gli stessi usati nel linguaggio quotidiano (durezza, sollecitazione, resistenza, e simili) e quindi se ne deve

specificare e tener presente la delimitazione che il loro significato assume nel settore dei materiali. La scelta dei termini italiani nella letteratura tecnica non è uniforme: si potrà trovare riassetto per quello che qui viene detto recupero, rinforzo per rafforzamento, e così via, con molte variazioni più o meno equivalenti. Se uno ha capito il meccanismo o la proprietà, non sarà poi difficile applicargli un nome diverso all'occorrenza. D'altra parte, sono entrati largamente nell'uso termini tecnici inglesi, anche per la loro maggiore concisione. In questo libro i termini inglesi sono di solito introdotti, fra parentesi, quando si incontrano definizioni di nuove grandezze o proprietà meccaniche, in modo da facilitare anche l'accesso ai testi di riferimento scritti in quella lingua.

Sono stati ridotti al minimo i modelli matematici, i nomi degli autori, i singoli esempi pratici. I diagrammi sono normalmente intesi a titolo indicativo e sono spesso privi dei valori numerici sugli assi. Dove esistono valori e non è indicata l'unità di misura di solito è quella del sistema SI oppure quella più generalmente utilizzata, come MPa per le sollecitazioni.

Firenze, Ottobre 2008

Simboli e abbreviazioni

I metalli sono sistematicamente indicati nel testo con il tradizionale simbolo chimico; non compaiono casi controversi, (come l'americano Cb al posto del nostro Nb) né numerosi elementi metallici del sistema periodico che non hanno applicazioni significative; in quanto abbreviazioni, sono usati O e H invece dei più corretti O₂ e H₂.

Le lettere minuscole dell'alfabeto greco sono tradizionalmente usate, nell'ordine α , β , γ , δ , ϵ , ζ , η , θ , ecc. per indicare le diverse fasi cristalline che si incontrano all'aumentare della temperatura o dell'aggiunta di lega

Richiede un minimo d'attenzione il fatto che alcuni di questi simboli o abbreviazioni sono usati con significato diverso a seconda del contesto.

0D = zero dimensioni

1D = una dimensione

2D = due dimensioni

3D = tre dimensioni

A = generico elemento metallico, costituente base di una lega

a = parametro reticolare; lato della cella elementare cubica; distanza fra atomi primi vicini

A% = allungamento percentuale a rottura, anche ϵ_R

B = (cella) a basi centrate; elemento generico in soluzione solida; boro

b = modulo del secondo vettore della maglia o cella elementare; modulo del vettore di Burgers

B = generico elemento aggiunto al metallo base di una lega

BMG = *Bulk Metal Glasses*, vetri metallici massivi

C = (cella) a corpo centrato; costante elastica; carbonio

c = modulo del terzo vettore della cella elementare; lunghezza della cricca

C% = composizione percentuale, in peso

CCC = cubico a corpo centrato

CFC = cubico a facce centrate
 CN = numero di coordinazione
 CP = *close packing* o *close packed*, a massimo impacchettamento
 CRSS = *critical resolved shear stress*, sollecitazione di taglio risolta critica, anche σ_{crss}
 D = coefficiente di diffusione
 d = diametro (dei grani, dell'impronta di durezza)
 $d\varepsilon/dt$ = derivata della deformazione rispetto al tempo
 E = energia; modulo di Young
 EC = esagonale compatto
 E_f = energia di formazione (di un difetto)
 E_m = energia di migrazione (di un difetto)
 eV = elettronvolt, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 F = (cella) a facce centrate; forza
 FK = (strutture di) Frank e Kasper
 G = modulo elastico di taglio
 HB durezza Brinell
 HR durezza Rockwell
 HV durezza Vickers
 k = costante di forza
 K = kelvin
 K_c tenacità a frattura
 K_{Ic} tenacità a frattura per deformazione piana
 MPa megapascal, 10^6 N/m^2
 N = numero di Avogadro; numero di siti reticolari; numero di 9 nella composizione percentuale; numero di cicli a fatica
 n = numero, in particolare di difetti di punto
 NACE *National Association of Corrosion Engineers*
 P = (cella) primitiva; fosforo
 Pa = pascal (Nm^{-2})
 Q = energia dissipata per attrito interno
 r = raggio
 R = carico di rottura, anche σ_R oppure UTS *ultimate tensile strength*
 S% = riduzione percentuale di sezione
 SMA = *Shape Memory Alloys*, leghe a memoria di forma
 T = temperatura

Simboli e abbreviazioni

t = tempo

TLK = *Terrace, Ledge, Kink* – modello di superficie

T_R = temperatura di ricristallizzazione

U = potenziale interatomico

v_B = vettore di Burgers (delle dislocazioni)

Y = carico di snervamento, anche σ_y o R_p

α, β, γ = angoli della cella elementare

γ = deformazione di taglio

γ_p = energia di deformazione plastica

γ_s = energia di superficie

Δ = variazione

ε = deformazione

ν = frequenza (dell'oscillatore); coefficiente di Poisson

ρ = raggio all'apice della cricca; densità

σ = sollecitazione; fase fragile (presente per es. nel sistema Fe-Cr)

τ = sollecitazione di taglio

Solidificazione e diagrammi di fase

Attorno alla temperatura ambiente un composto chimico può esistere allo stato solido, oppure a quello liquido o a quello di vapore (a temperature ancora più alte si può arrivare al gas ionizzato o plasma). Variando le condizioni, e in particolare quelle di temperatura e pressione, si possono avere dei passaggi da uno stato fisico all'altro, che prendono il nome di trasformazioni di fase. Per fase si intende appunto uno stato del materiale con composizione definita e uniformemente solido, liquido o vapore; tali fasi possono coesistere in condizioni di equilibrio. Allo stato gassoso si ha sempre un'unica fase omogenea, ma allo stato liquido e solido possono coesistere fasi diverse, per esempio due fasi liquide che non si miscelano, come acqua e olio.

È possibile disegnare dei diagrammi di stato o di fase che rappresentano graficamente le situazioni d'equilibrio che si stabiliscono in un sistema di fasi in funzione della temperatura, della pressione e della composizione. Qui ci interessano i sistemi in equilibrio in fase condensata, per i quali moderate variazioni della pressione hanno poca influenza; si considera quindi solo il sistema a pressione ambiente, praticamente costante. Con questa limitazione esamineremo i diagrammi di fase, per la maggior parte binari o a due componenti, indicati genericamente con A e B, in cui sulle ordinate è riportata la temperatura e sulle ascisse la composizione percentuale: se si legge da sinistra a destra si avrà la percentuale di B in A compresa tra 0% indicato su A (100% di A) fino al 100% su B (0% di A).

Useremo sistematicamente la percentuale in peso, come si preferisce nella pratica, ma la percentuale in atomi avrebbe dei vantaggi (per esempio collocando immediatamente al 50% qualsiasi composto intermetallico di tipo AB); ovviamente la differenza fra le due scale aumenta con la differenza di peso atomico dei due elementi.

La maniera più comune di costruire i diagrammi di fase si basa sull'analisi termica: si porta il campione ad alta temperatura e si raffredda registrando la diminuzione della temperatura in funzione del

tempo. La curva ha chiaramente un andamento decrescente, ma questo può presentare variazioni di pendenza o anche arresti di temperatura; questi ultimi si verificano quando il sistema ha zero gradi di libertà e la loro temperatura e durata sono particolarmente importanti per la costruzione del diagramma, come vedremo.

Il caso più semplice è quello a un solo componente: raffreddando dal fuso si ha un arresto termico in coincidenza del passaggio alla fase solida; finché tutto il liquido non è solidificato la temperatura rimane costante. Si dice che alla temperatura di fusione i gradi di libertà del sistema si sono ridotti a zero.

Per determinare i gradi di libertà nei diagrammi di fase con più componenti si ricorre alla regola delle fasi, dovuta a Gibbs:

$$V = C + 1 - F$$

dove V = numero di gradi di libertà, C = numero dei componenti (2 in un sistema binario, 3 in uno ternario e così via); F = numero delle fasi. Si ricava che per due componenti la presenza contemporanea di tre fasi porta all'azzeramento dei gradi di libertà, cioè il sistema rimane a temperatura fissa finché non sparisce una delle tre fasi presenti. Nel passaggio tra una e due fasi non si ha arresto della temperatura ma solo una variazione di pendenza nella curva dell'analisi termica.

Diagrammi binari semplici

In questo contesto per semplici si intende corrispondenti a un modulo elementare che può esistere da solo, ma può anche esistere come parte di un diagramma più complesso.

Miscibilità o immiscibilità completa

Completa immiscibilità liquido e solido

Un primo caso da considerare è solo utile per indicare dove i diagrammi di fase non hanno importanza o applicazione pratica: comple-