

A. Tiziani, P. Ferro

MATERIALI METALLICI e LABORATORIO

Meccanismi di rafforzamento

A.A. 2008/2009

2° Anno Ingegneria Gestionale - Nuovo Ordinamento

1

CONTENUTI

- Rafforzamento mediante difetti puntuali
- Rafforzamento mediante difetti lineari (dislocazioni)
- Rafforzamento mediante difetti superficiali
- Rafforzamento per alligazione
- Rafforzamento mediante deformazione,
(includimento e ricristallizzazione)
- Altri tipi di rafforzamento

- Tecnologie di deformazione a freddo

- Ricristallizzazione

- Rafforzamento per trasformazione martensitica
(Dispensa a parte)

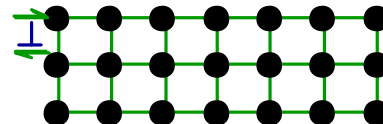
2

Dislocazioni & classi di materiali

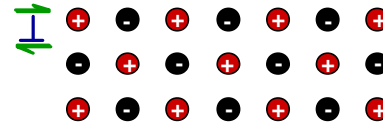
- **Metalli:** Facile moto delle dislocazioni.
 - legame non-direzionale
 - direzioni di massimo impacchettamento per lo scorrimento.



- **Ceramici Covalenti** (Si, diamante): moto difficile.
 - legame direzionale (angolare)



- **Ceramici ionici** (NaCl):
 - Difficile moto.
 - devono evitare ++ e -- vicini.



3

MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO

Generalmente per i materiali metallici si intende l'**innalzamento del limite elastico**. Si è già visto che tale fatto implica quasi sempre l'intervento di un fenomeno che **ostacola lo scorrimento delle dislocazioni** e ciò si ottiene in generale mediante un **aumento dei difetti** della periodicità cristallina ossia aumentando:

- i **difetti puntuali** (**vacanze** reticolari)
- i **difetti lineari** (**dislocazioni** diversamente orientate)
- i **difetti superficiali** (estensione dei giunti grano o nuovi grani di nuova fase con formazione di precipitato)

I meccanismi di rafforzamento si ottengono ostacolando il movimento delle dislocazioni

4

Rafforzamento mediante difetti puntuali

Le vacanze giocano un ruolo importante nel comportamento dei metalli dato che favoriscono i processi diffusivi in particolare alle alte temperature.

A temperature più basse (T_{amb}) la presenza di lacune in eccesso provoca un effetto rafforzante, dato che tali difetti tendono a raggrupparsi formando dei **CLUSTER** che possono assumere forme diverse in relazione ai metalli considerati (discoidali nell'Al, tetraedriche nell'Au, ecc.) e che inducono piccoli centri di distorsione elastica nei reticoli.



Quando una dislocazione incontra tali difetti può scavalcarli solo se si applica una sollecitazione supplementare che macroscopicamente indica un aumento del limite elastico.

5

Rafforzamento mediante difetti puntuali

L' aumento del numero delle vacanze si ottiene in due modi:



1. Tempra da elevata temperatura

$$\frac{n_v}{n} = e^{\frac{-\Delta G_v}{RT}}$$

ΔG_v = en.lib.per una mole di vacanze

n = numero totale di atomi

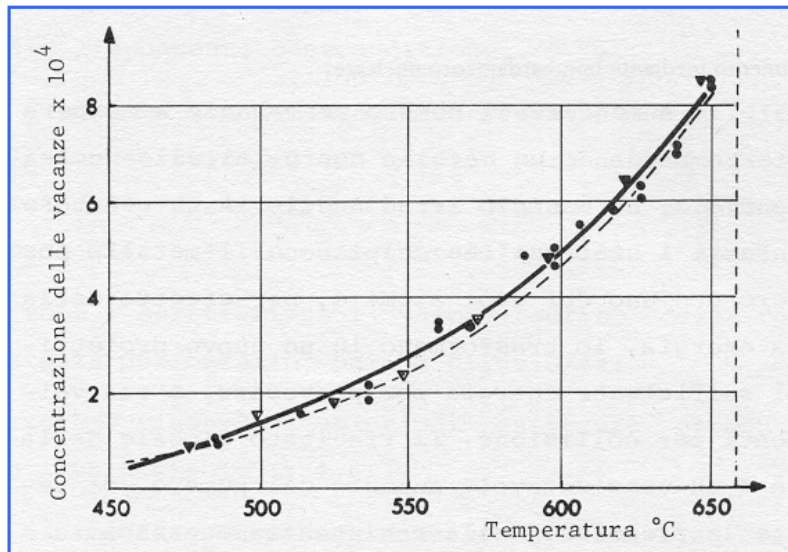
n_v = numero di vacanze

• per esempio, nel caso dell'Al: $\frac{n_v}{n} = 5,81e^{-0,71/kT}$ $k_B = \frac{R}{N_A}$

Con raffreddamento veloce da alta T le vacanze vengono mantenute per cui la resistenza meccanica aumenta.

6

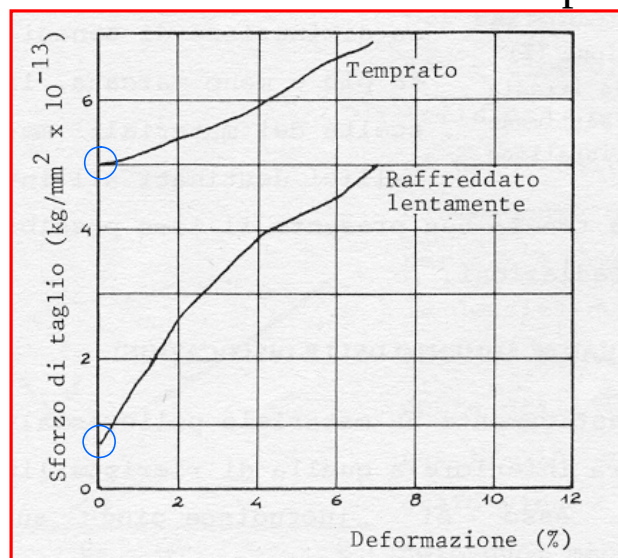
Rafforzamento mediante difetti puntuali



Concentrazione di equilibrio delle vacanze nell'alluminio in funzione della temperatura secondo misure ottenute in diversi laboratori.

7

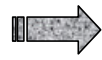
Rafforzamento mediante difetti puntuali



Aumento della resistenza meccanica mediante tempra in un monocristallo di alluminio.

8

Rafforzamento mediante difetti puntuali



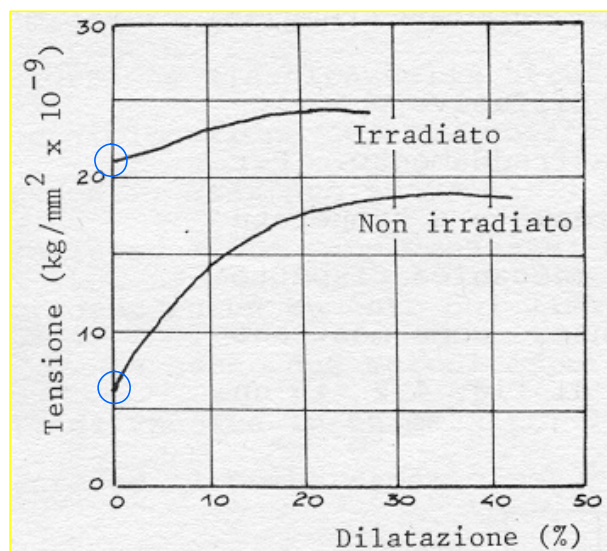
2. Bombardamento con particelle nucleari.

Particelle con elevata energia irradiano il metallo. I **neutroni** possono colpire un atomo che acquisisce una energia tale che nell'urto può spostare altri atomi **aumentando le vacanze**.

Poiché l'aumento delle caratteristiche meccaniche resistenziali è quasi sempre accompagnato da una diminuzione di tenacità la scelta dei materiali metallici destinati al nucleare deve tenere conto di tale effetto (**infragilimento**).

9

Rafforzamento mediante difetti puntuali



Rafforzamento da irradiazione per tre settimane nel rame policristallino a 20°C.

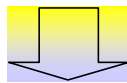
10

Rafforzamento mediante difetti lineari

Rafforzamento mediante aumento delle dislocazioni

Abbiamo detto che lo sforzo di taglio diminuisce di 4, 5 ordini di grandezza nei cristalli reali per la presenza delle dislocazioni.

Ora diciamo che per rafforzare un metallo è opportuno aumentare il numero delle dislocazioni mediante incrudimento.

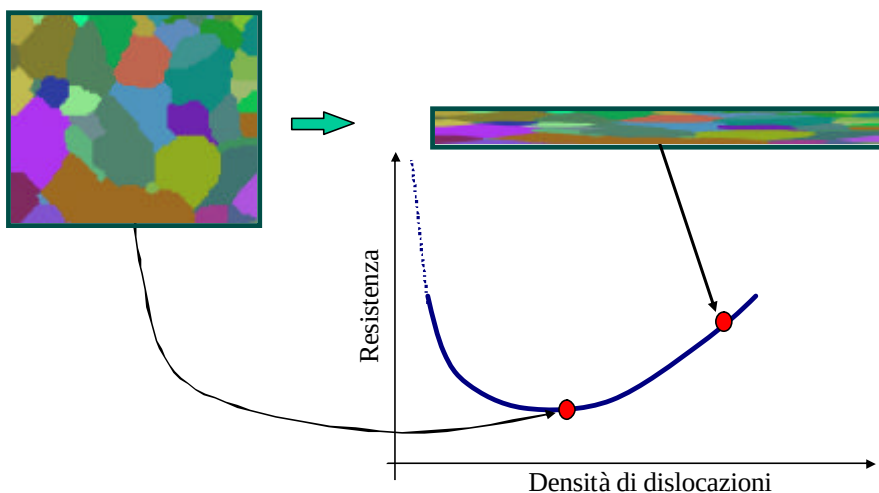


Cerchiamo ora di spiegare tale incongruenza mediante la curva che dia l'andamento della resistenza alla deformazione contro la densità delle dislocazioni.

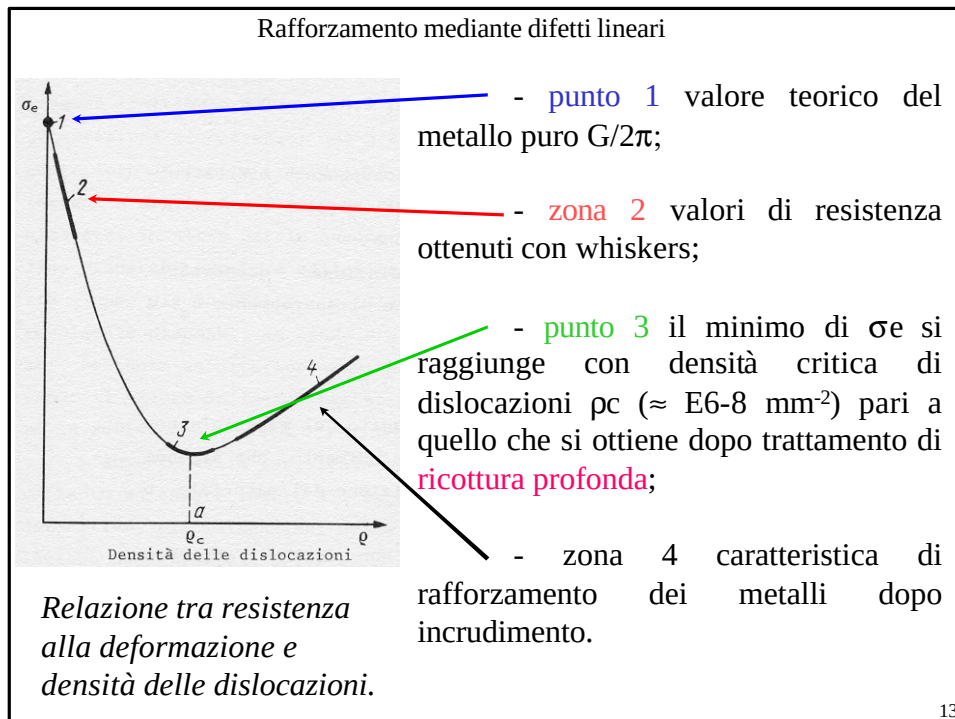
11

Rafforzamento mediante difetti lineari

Rafforzamento mediante aumento delle dislocazioni



12



Rafforzamento mediante difetti lineari

Pertanto per rafforzare un materiale mediante difetti lineari esistono due modi

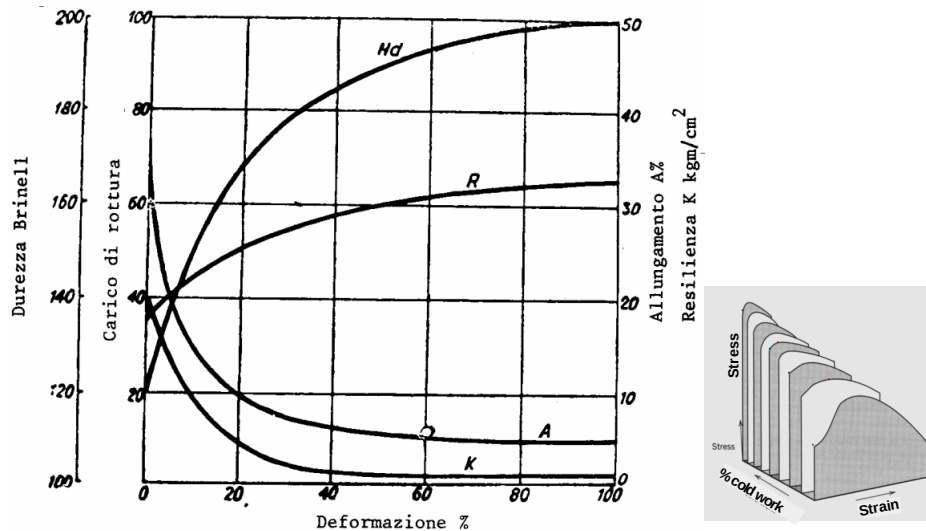
- ➡ 1° creare un materiale a basso grado di difettosità
- ➡ 2° aumentare le dislocazioni.

➡ 2. Aumento delle dislocazioni

Ciò comporta un **maggior contenuto energetico** sotto forma di un notevole stato tensionale a cui è associato un **innalzamento** delle caratteristiche resistenziali (s_R , s_e , H_d) ed una **diminuzione** delle caratteristiche di duttilità e tenacità (A , Z , K); (vedi figura seguente).

14

Rafforzamento mediante difetti lineari



Variazione delle caratteristiche meccaniche di un acciaio extradolce in funzione del grado di incrudimento.

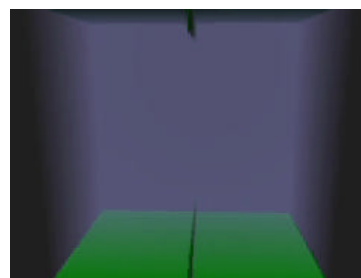
15

Rafforzamento mediante difetti lineari

Aumento delle dislocazioni



Lega di Ti dopo deformazione plastica a freddo

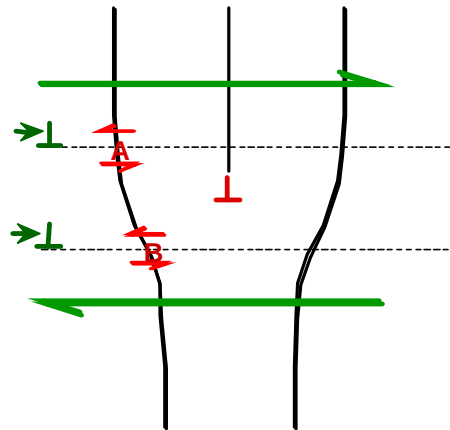


16

OSTACOLO DISLOCAZIONE- DISLOCAZIONE

- Le dislocazioni generano tensioni.
- questo blocca altre dislocazioni.

La dislocazione in rosso genera uno sforzo di taglio nei punti A e B che si oppone al moto da sinistra a destra delle dislocazioni in verde



17

Rafforzamento mediante difetti lineari

La relazione quantitativa tra limite elastico e densità delle dislocazioni è data da:

$$\sigma_s = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho}$$

σ_s = limite di snervamento

σ_0 = sforzo critico di taglio del materiale non incrudito

α = coefficiente di incrudimento che dipende dal tipo di reticolo e dalla composizione del materiale

b = modulo del vettore di Burgers

ρ = densità delle dislocazioni

G = modulo elastico tangenziale

La densità di dislocazione non dovrebbe superare i valori di 10^{12} - 10^{13} cm/cm³ altrimenti il metallo diventa troppo fragile

18

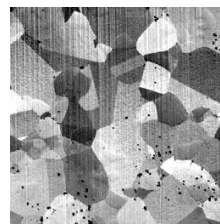
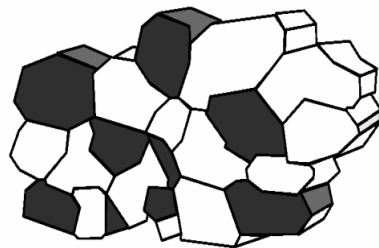
Rafforzamento mediante difetti superficiali

I giunti dei grani creano ostacoli al passaggio delle dislocazioni che vengono trattenute da questi per il cambiamento di orientazione cristallografica tra due grani adiacenti che non consente il loro facile trasferimento.

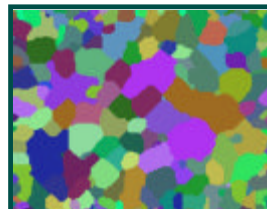
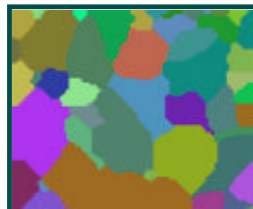
All'interfaccia si viene a formare un accumulo di dislocazioni bloccate. Per far avvenire il movimento a parità di temperatura, si deve applicare una forza maggiore.

19

Rafforzamento mediante difetti superficiali



Superlega a base Ni
IN100. Serie di immagini
SEM ottenute
rimuovendo fette di
materiale (mediante
bombardamento ionico) al
fine di investigare la
forma tridimensionale dei
grani

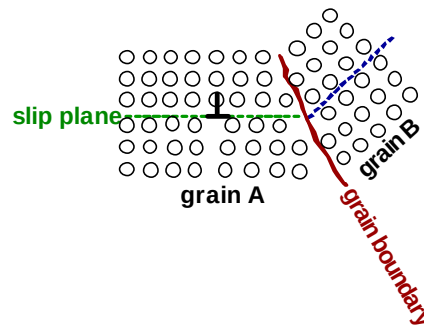


20

Rafforzamento mediante difetti superficiali

Riduzione della dimensione dei grani

- I bordi grani sono barriere allo scorrimento delle dislocazioni.
- **‘L'effetto barriera’**
aumenta all'aumentare della differenza di orientamento.
- Più piccoli sono i grani: maggiori sono le barriere allo scorrimento.



21

Rafforzamento mediante difetti superficiali

L'aumento della resistenza allo snervamento σ_s per i materiali policristallini si viene a legare all'estensione dei giunti mediante la relazione di **Hall-Petch**.

Nella sua espressione più generale essa è espressa come:

$$s_s = s_i + kd^{-\frac{1}{2}} + \sum_1^n C_i (\%X_i)$$

s_i = sollecitazione richiesta per muovere le dislocazioni entro un monocristallo.

k = costante di proporzionalità

C_i = coefficiente di indurimento dovuto al generico elemento i la cui % ponderale è X_i .

22

Rafforzamento mediante difetti superficiali

Nel caso particolare in cui il secondo termine a destra del segno di uguaglianza nell'equazione di Hall-Petch sia nullo, cioè nel caso di **metalli puri**, l'equazione si può scrivere:

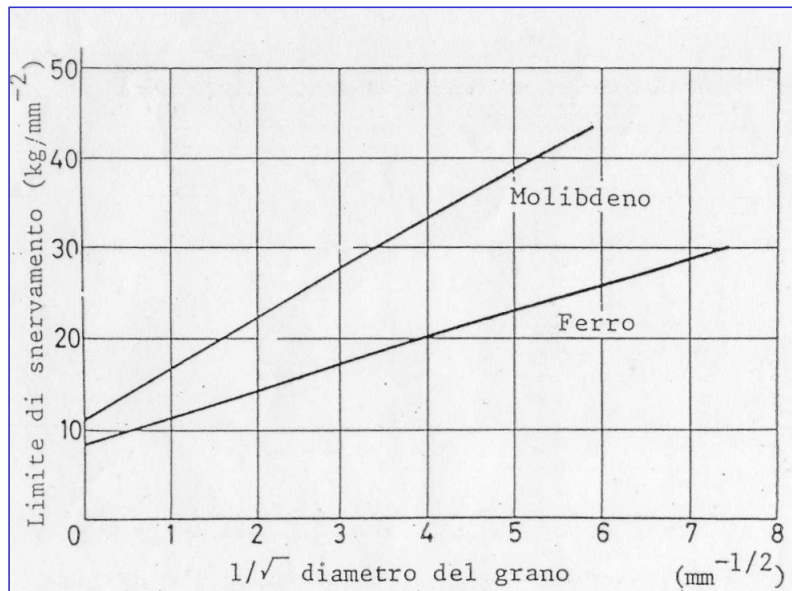
$$\sigma_s = \sigma_i + k \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

In questo caso si nota che σ_s dipende solamente dalla dimensione dei grani.

Con diagrammi del tipo della figura seguente si possono determinare i valori di σ_i e k rispettivamente come intercetta sull'asse delle ordinate e pendenza della retta.

23

Rafforzamento mediante difetti superficiali



Andamento del limite di snervamento del Fe e del Mo in funzione della dimensione della grana cristallina.

24

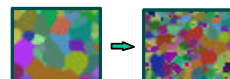
Rafforzamento mediante difetti superficiali

Reticolo cristallino	Metallo o lega	Condizione	$s_i \text{ (Kg/mm}^2\text{)}$	$K \text{ (Kg/mm}^{3/2}\text{)}$
Sistema CCC	Acciaio dolce con 0,15% C	Snervamento infer.	9,2	2,5
	Acciaio dolce con 0,15% C	Irradiato (1.5 E19 nvt)	12,4	2,5
	Acciaio con 0,23%C + 0.65% Mn	Snervamento	18,7	2.12
	Fe + 3,25% Si	Snervamento	32,5	2,1
	Cromo (a 0°C)	Snervamento	18,9	2.93
	Tungsteno (a 250°C)	Snervamento	14,7	7.6
Sistema FCC	Alluminio	A deformazione dello 0,5 %	1,6	0,22
	Al + 3.5% Mg	Snervamento	5,0	0.85
	Argento	A deformazione dello 0,5 %	3,8	0,22
	Rame	A deformazione dello 0,5 %	2.6	0.36
	Cu + 20,5% Zn	Snervamento	4.3	0.78
	Cu + 30,6% Zn	Snervamento	4.6	1.00
	Cu + 30,6% Zn	Incrud. 20%	34.4	1.10
	Cu + 36.7% Zn	Snervamento	3.7	1.24
Sistema EC	Magnesio	A deformazione dello 0.2 %	0,7	0,9
	Titanio	Snervamento	8.0	1.3

25

Rafforzamento mediante difetti superficiali

Rafforzamento per affinamento del grano



Quasi tutti i rafforzamenti, salvo in casi speciali quello per soluzione solida, presentano la controindicazione di diminuire la tenacità del materiale

$$\text{Indice di Tenacità} = R \cdot A_n \%$$

In genere l'aumento di R provoca una diminuzione di $A_n\%$ più che proporzionale

L'affinamento del grano è l'unico meccanismo mediante il quale è possibile aumentare sia la resistenza che la tenacità

26

Rafforzamento mediante difetti superficiali

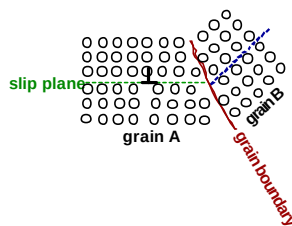
Rafforzamento per affinamento del grano



Il solo modo di aumentare σ_{ys} , σ_f e la tenacità contemporaneamente, è quello di ridurre la dimensione dei grani

Alta resistenza

$$\sigma_{ys} = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$$



Alta tenacità

$$ITT = A - B \cdot \ln d^{-1/2}$$

Input transition temperature



La cricca viene bloccata dai bordi grano ed è costretta a cercare ogni volta un punto di innesco per continuare a propagarsi (spesa di energia)

27

Rafforzamento mediante difetti superficiali

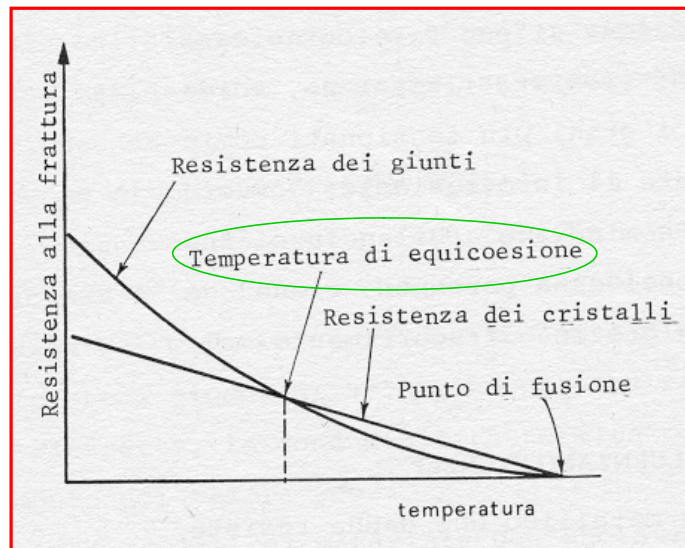
Temperatura di equicoesione

E' la più bassa temperatura di ricristallizzazione, cioè la temperatura alla quale i grani più tensionati cominciano a ricostruire rapidamente il loro reticolo, ovvero la temperatura alla quale cominciano a bilanciarsi incrudimento e ricristallizzazione: essa corrisponde pertanto alla temperatura critica di scorrimento viscoso.

La legge di Hall Petch è valida solo per temperature inferiori a quella di equicoesione

28

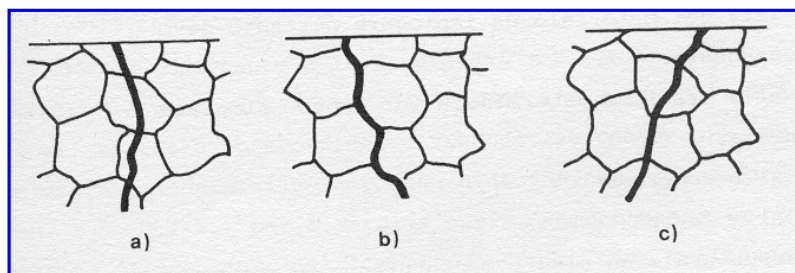
Rafforzamento mediante difetti superficiali



Andamento della resistenza alla frattura **intra**cristallina e **inter**cristallina.

29

Rafforzamento mediante difetti superficiali



Tipi di frattura nei materiali metallici policristallini.

a) frattura **intra**cristallina

b) frattura **inter**cristallina

c) frattura mista.

30

Rafforzamento per alligazione

Esaminiamo ora i meccanismi di rinforzo in presenza di elementi di alligazione.

La presenza di atomi estranei modifica le proprietà plastiche del metallo base in quanto **ostacola il moto delle dislocazioni** in due modi:



•A) ancoraggio per completa solubilità del soluto



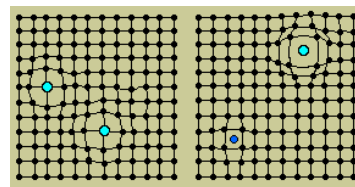
•B) presenza di una seconda fase nella microstruttura

31

Rafforzamento per alligazione



A) Rafforzamento per soluzione solida



- **Atmosfera di Cottrell;**

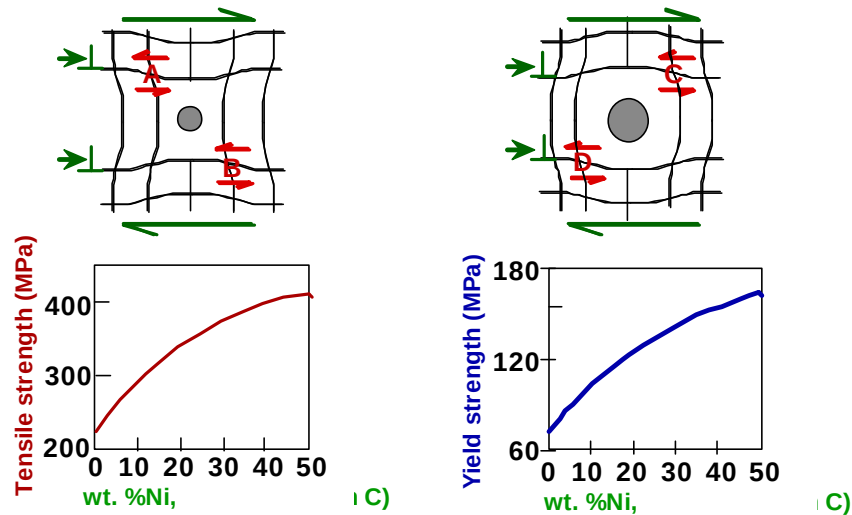
- La differenza di raggio atomico tra solvente e soluto aumenta l'effetto del rafforzamento (negli intervalli di validità indicati dalla legge di Hume-Rothery). Una grande differenza delle dimensioni produce un grande **disordine nel reticolo** originale rendendo difficoltoso il movimento delle dislocazioni.

- **Maggiore è la %** degli elementi in lega maggiore è l'effetto di rafforzamento.

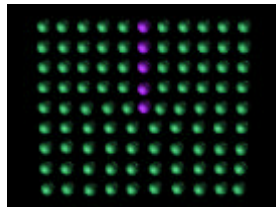
32

Rafforzamento per alligazione

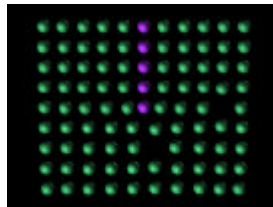
A) Rafforzamento per soluzione solida



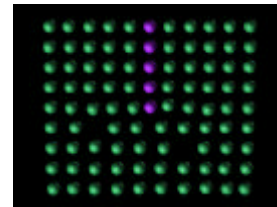
33



Gli **atomi interstiziali** riducono gli stati tensionali in prossimità della linea di dislocazione: ne consegue che una maggiore tensione è necessaria per muovere la dislocazione



Gli **atomi sostituzionali** riducono gli stati tensionali in prossimità della linea di dislocazione: ne consegue che una maggiore tensione è necessaria per muovere la dislocazione



Gli **atomi sostituzionali di piccole dimensioni** riducono gli stati tensionali in prossimità della linea di dislocazione: ne consegue che una maggiore tensione è necessaria per muovere la dislocazione

34

Rafforzamento per alligazione

Influenza degli elementi in lega sulle caratteristiche meccaniche:

1- Il carico di snervamento, di rottura, la durezza delle leghe sono più elevate di quelle del metallo puro.

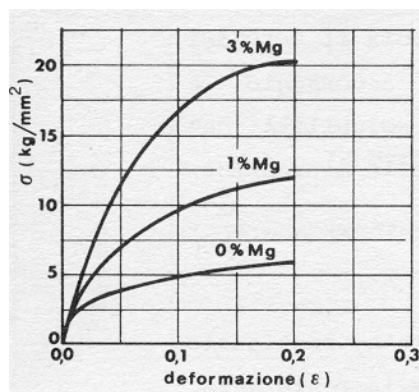
Siamo nel caso infatti di elementi in lega, non di metalli puri, per cui vale l'equazione di Hall-Petch generale:

$$s_s = s_i + kd^{-\frac{1}{2}} + \sum_{i=1}^n C_i (\% X_i)$$

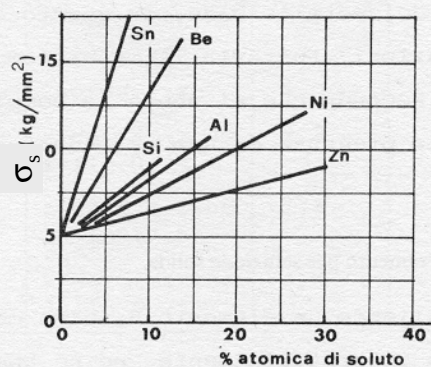
Un esempio è dato dal **C** e dall' **N** disciolti nel **Fe** in piccola quantità, come nel caso degli acciai extra-dolci deformati a freddo. Gli atomi di **C** e **N** hanno l'effetto di ancorare le dislocazioni formando delle atmosfere di Cottrell.

35

Rafforzamento per alligazione



Rafforzamento dell'alluminio nelle soluzioni solide con il magnesio.

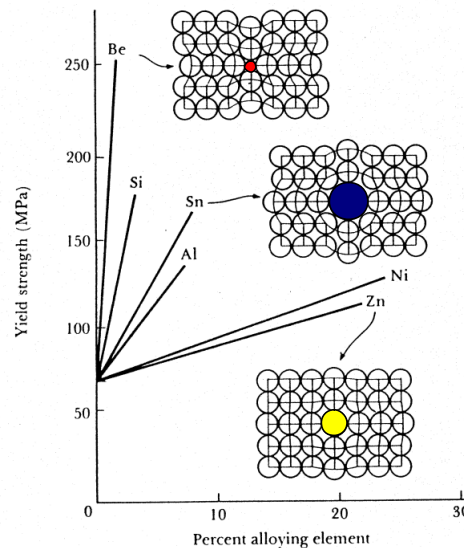


Effetto di elementi in lega solubili sul limite di snervamento (all'1% di deformazione permanente) in rame policristallino a T ambiente.

36

Rafforzamento per alligazione

Effetto
del rafforzamento
per soluzione solida
in leghe
a base rame



37

Rafforzamento per alligazione

2 - Quasi sempre, la duttilità delle leghe è minore di quella del metallo puro. Solo raramente come nel caso del Cu-Zn aumentano sia il carico che la duttilità.

3 - La conducibilità elettrica è minore di quella dei metalli puri.

4 - La resistenza allo scorrimento viscoso (CREEP) alle alte temperature aumenta.

38

Rafforzamento per alligazione

 B). Presenza di una seconda fase nella microstruttura.

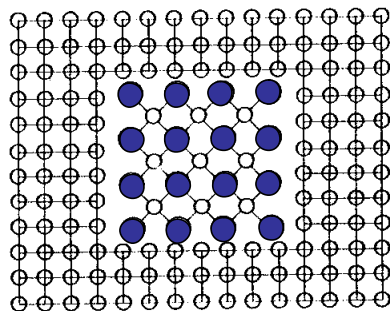
Possono presentarsi due possibilità:

 B.1) Precipitazione di una **fase incoerente**.

 B.2) Precipitazione di una **fase coerente**.

39

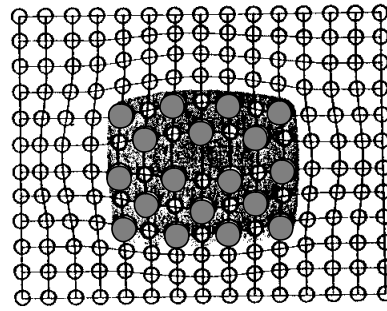
Rafforzamento per alligazione



(a)

Precipitato incoerente

NON esiste una
continuità fra i piani
reticolari del precipitato
e quelli della matrice



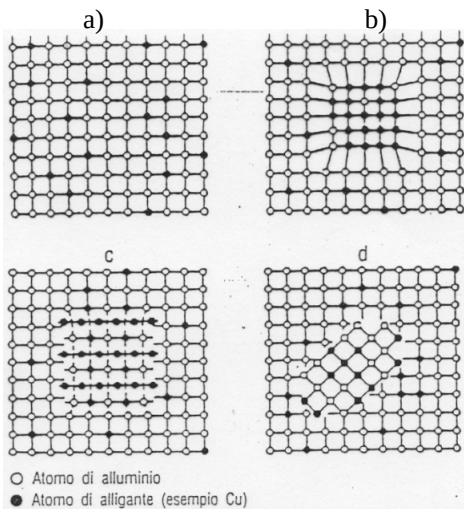
(b)

Precipitato coerente

Esiste una continuità
fra i piani reticolari
del precipitato e
quelli della matrice

40

Rafforzamento per alligazione



Rappresentazione schematica delle diverse fasi che caratterizzano il processo di precipitazione nelle leghe di alluminio da trattamento termico:

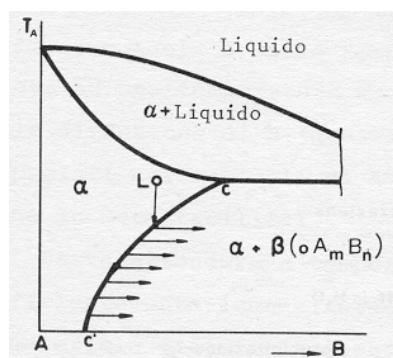
a) soluzione solida con distribuzione aleatoria degli atomi di soluto; **b)** zona di aggregazione di atomi di soluto, coerente dal punto di vista cristallografico con la matrice; **c)** fase intermedia parzialmente coerente con la soluzione solida. I piani cristallografici verticali sono coerenti, mentre quelli in direzione orizzontale sono incoerenti; **d)** precipitato incoerente.

41

Rafforzamento per alligazione

➡ B.1) Rafforzamento per precipitazione di una fase incoerente

Quando la lega si raffredda molto lentamente, la soluzione α diventa satura ed evolve espellendo la seconda fase β che in molti casi è un intermetallico, incoerente con la fase primaria e più dura di questa.



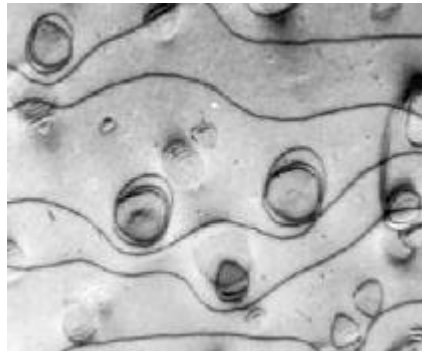
Indurimento per precipitazione di una seconda fase.

42

Il meccanismo di rafforzamento è il seguente:

le particelle di β ostacolano il movimento delle dislocazioni nella matrice formando una dislocazione anulare, secondo il **meccanismo di Orowan**.

La **resistenza** dipende **soprattutto dal numero** delle particelle piuttosto che dalla massa totale delle stesse.



43

➡ **B.2) Rafforzamento per precipitazione di una fase coerente (**Invecchiamento**)**

Le **leghe che presentano una variazione di solubilità allo stato solido** al diminuire della temperatura, possono subire un trattamento di **invecchiamento** che dà luogo a **precipitati finemente dispersi**.

Se le **particelle** sono **coerenti** con la matrice possono influire enormemente sulla mobilità delle dislocazioni portando a consistenti aumenti della durezza.

La resistenza richiesta può essere creata nello stadio più opportuno della lavorazione del pezzo.

44

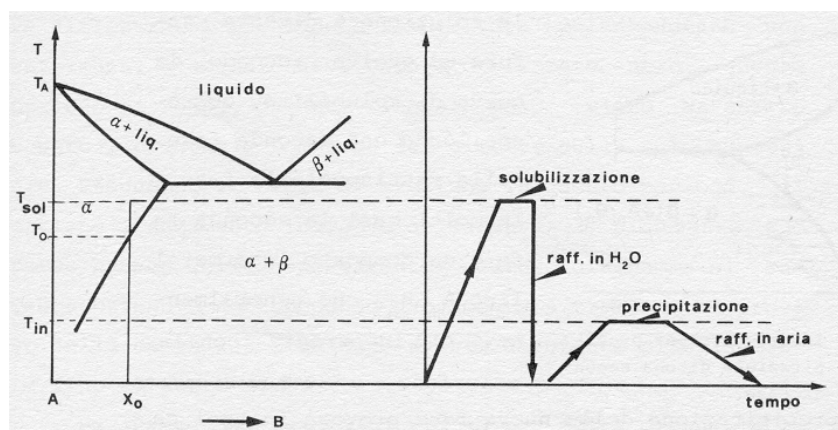
Rafforzamento per alligazione

Si veda nella figura seguente l'esecuzione pratica:

- Riscaldamento della lega in campo α con permanenza fino a **solubilizzazione** totale del soluto B.
- brusco raffreddamento fino a temperatura ambiente (solubilizzazione o **tempra di soluzione**) presenza di soluzione sovrasatura.
- permanenza a temperatura ambiente per un certo tempo (**invecchiamento naturale**)
- oppure portare il materiale a temperatura inferiore a T_0 ed in poche ore si manifestano la nucleazione e l'accrescimento (**invecchiamento artificiale**).

45

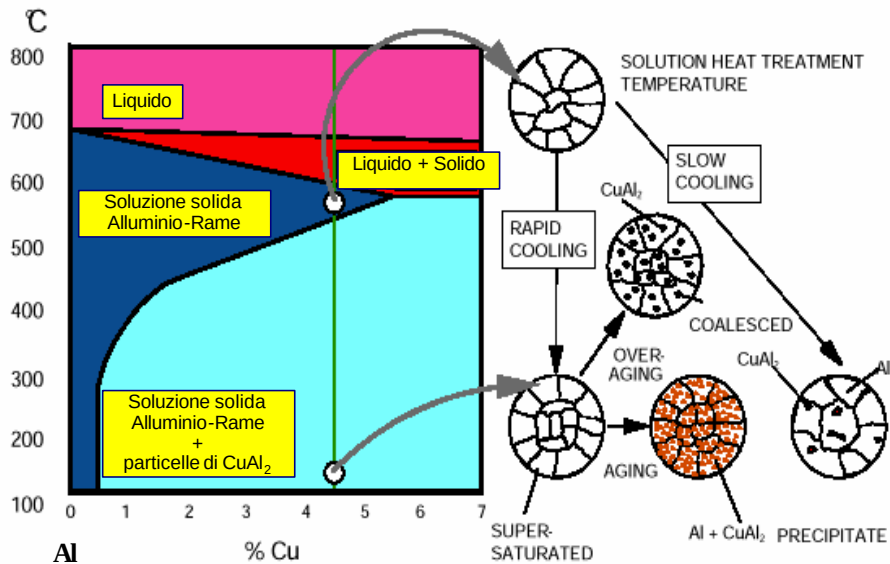
Rafforzamento per alligazione



Invecchiamento per precipitazione: a) diagramma di stato della lega invecchiabile; b) schema temporale del trattamento termico.

46

Rafforzamento per alligazione



47

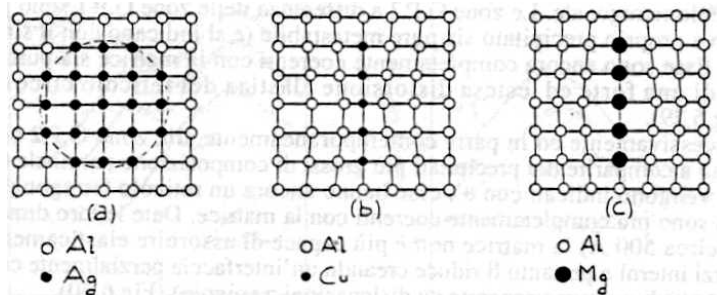
Rafforzamento per alligazione

Base Metal	Solute	Transition Structure	Equilibrium Precipitate
Al	Cu	(i) Plate-like solute rich G.P. [1] zones on {100} _{Al} ; (ii) ordered zones of G.P. [2]; (iii) θ' -phase	θ -CuAl ₂
	Ag	(i) Spherical solute-rich zones; (ii) platelets of hexagonal γ' on {111} _{Al} .	γ -Ag ₂ Al
	Mg, Si	(i) G.P. zones rich in Mg and Si atoms on {100} _{Al} planes; (ii) ordered zones of β' .	β -Mg ₂ Si
	Mg, Cu	(i) G.P. zones rich in Mg and Cu atoms on {100} _{Al} planes; (ii) S' platelets on {021} _{Al} planes.	S-Al ₂ CuMg
	Mg, Zn	(i) Spherical zones rich in Mg and Zn (ii) platelets of M' hexagonal phase on {111} _{Al} .	M-Mg ₂ Zn
Cu	Be	(i) Be-rich regions on {100} _{Cu} planes; (ii) γ'	γ -CuBe
Fe	C	(i) Martensite (α'); (ii) martensite (α''); (iii) ϵ -carbide.	Fe ₃ C cementite
	N	(i) Nitrogen martensite (α'); (ii) martensite (α'')	Fe ₄ N

Alcuni sistemi comuni indurenti per precipitazione.

48

Rafforzamento per alligazione



Rappresentazione schematica di zone di **Guinier-Preston** nel caso di: **a)** leghe **Al-Ag** (**deformazione nulla** del reticolo del solvente); **b)** leghe **Al-Cu** (**contrazione** del reticolo del solvente); **c)** leghe **Al-Mg** (**espansione** del reticolo del solvente).

49

Rafforzamento per alligazione

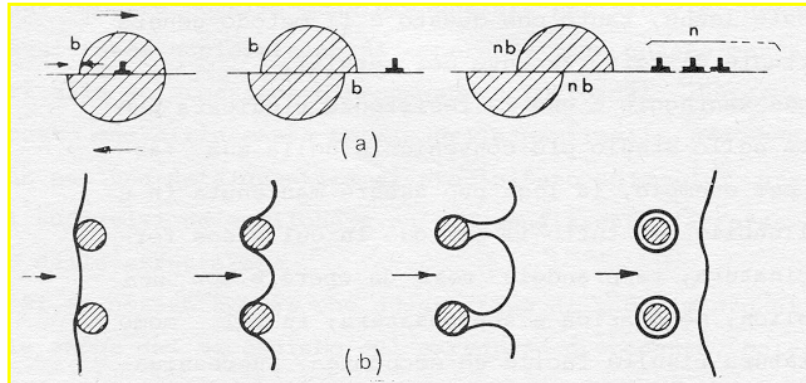
Quando una dislocazione incontra le particelle di **precipitato coerente** con la matrice essa può muoversi attraverso il cristallo in due modi :

- **tagliandole** quando sono piccole e molto vicine tra di loro;
- **flettendosi** quando le particelle sono più distanziate e cresciute, seguendo quindi il meccanismo di **Orowan**.

Quando le particelle diventano **incoerenti**, il loro superamento da parte delle dislocazioni è possibile solo con questo ultimo meccanismo (**Orowan**).

50

Rafforzamento per alligazione

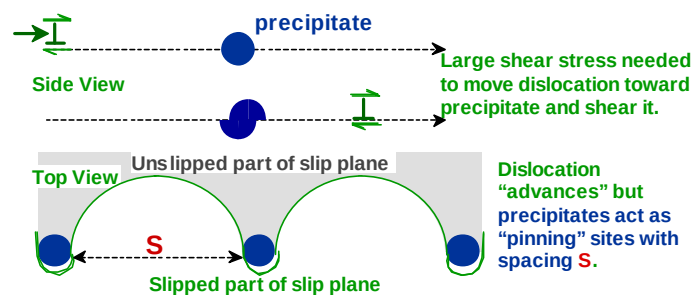


Effetti del moto delle dislocazioni sulle particelle di precipitato: **a)** superamento per taglio; **b)** superamento con Orowan.

51

Rafforzamento per alligazione

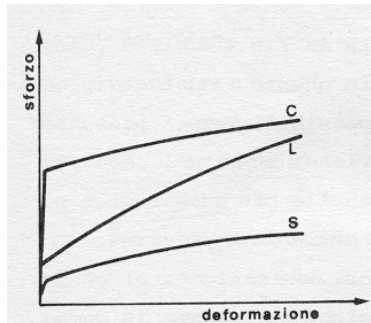
- Precipitati duri sono difficili da tagliare.
Es: Ceramiche nei metalli (SiC nel ferro o alluminio).



• risulta: $\sigma_y \sim \frac{1}{S}$

52

Rafforzamento per alligazione



Curve sforzo-deformazione dei meccanismi in esame.

S: lega allo stato solubilizzato; C: lega con particelle coerenti; L: lega con particelle incoerenti.

Curva S: il materiale si trova allo stato solubilizzato.

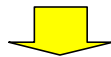
Curva C: il livello della sollecitazione aumenta rispetto S, sebbene con curve di forma simile, per la difficoltà di forzare le dislocazioni attraverso i precipitati (taglio di particelle coerenti).

Curva L: si osserva una velocità di incrudimento molto elevata per il rapido processo di creazione delle dislocazioni nella struttura (Frank-Reed) al procedere della deformazione (Orowan: avvolgimento delle particelle).

53

Rafforzamento per alligazione

In una lega temprata e quindi invecchiata per dar luogo alla precipitazione della seconda fase, questa prima si forma come agglomerato di atomi coerente, poi con precipitazione di fase parzialmente coerente e quindi con precipitazione finissima, che **al procedere dell'invecchiamento** permette gradualmente la crescita delle dimensioni delle particelle, aumentando la distanza media tra di loro.

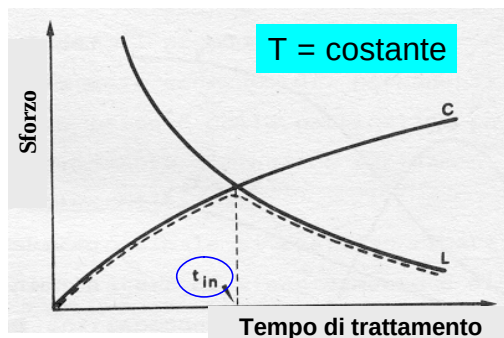


Monitoriamo in dettaglio cosa avviene all'aumentare del tempo di trattamento, per una certa T:

- all'aumentare del tempo di trattamento cresce la dimensione media delle particelle;
- parimenti cresce la loro distanza reciproca.

54

Rafforzamento per alligazione



Incremento dello sforzo di taglio delle particelle di precipitato in funzione del tempo di invecchiamento.

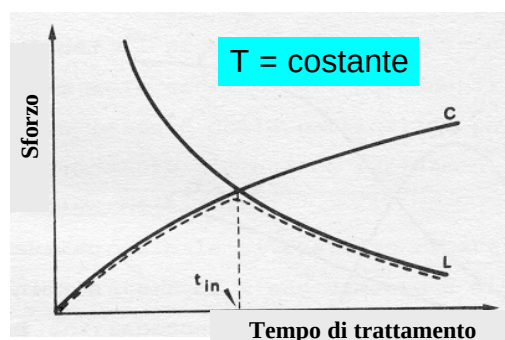
Sulle ascisse della figura è quindi equivalente porre il **tempo di trattamento** al posto della **dimensione media** o della **distanza reciproca** delle particelle di precipitato, essendo grandezze proporzionali.

Analogamente in y si può indicare σ_p , σ_s o la durezza.

55

Rafforzamento per alligazione

- **caso L.** La curva ha pendenza negativa, in quanto l'incremento di sollecitazione necessario per formare anelli diminuisce all'aumentare della distanza tra le particelle (siamo nel caso di particelle incoerenti ==> **Orowan**).
- **caso C.** Le dimensioni delle particelle coerenti e quindi la loro distanza aumentano, per cui l'incremento dello sforzo di taglio $\Delta\tau$ necessario per attraversarle aumenta.



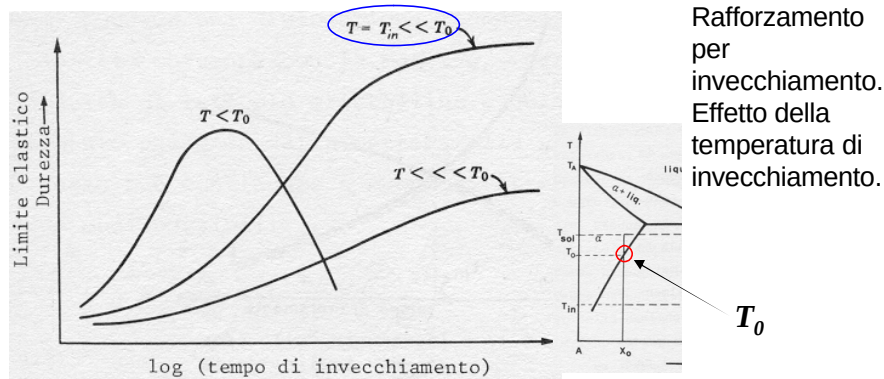
Se il processo di invecchiamento continua, l'incremento dello sforzo segue la **linea tratteggiata** poichè tra i due processi possibili si segue quello che **richiede il minor sforzo**.

56

Rafforzamento per alligazione

Come si vede dalla figura precedente, **esiste un valore massimo del rafforzamento, ottenuto per un certo tempo $t = t_{in}$ di permanenza alla temperatura data.**

Ma **al variare della temperatura**, questo **massimo si sposta**. Si rileva come **esista una temperatura per la quale abbiamo il massimo incremento**, detta **Temperatura di invecchiamento**.

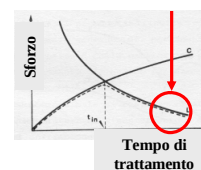


57

Rafforzamento per alligazione

La **T_{in}** deve essere determinata con estrema precisione dato che:

- **se troppo alta** il precipitato risulta troppo grossolano e inoltre se si aggiunge un tempo di permanenza elevato si ha trasformazione incoerente delle particelle dando luogo al **superinvecchiamento**, con diminuzione dell'effetto di rafforzamento.
- **se troppo bassa** non viene raggiunta la dispersione critica.

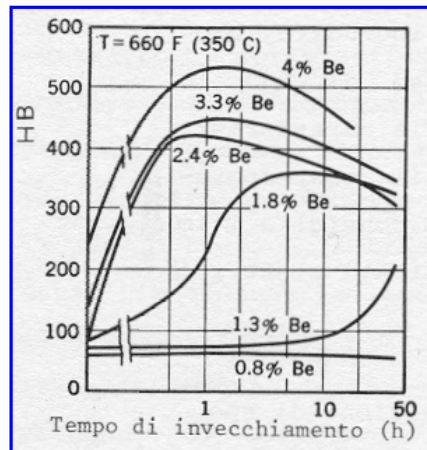


58

Rafforzamento per alligazione

Al variare della concentrazione di soluto:

il rafforzamento risulta aumentato se, per un certo diametro critico, la distanza fra le particelle è la più piccola possibile, cioè se il soluto è presente nella massima concentrazione.



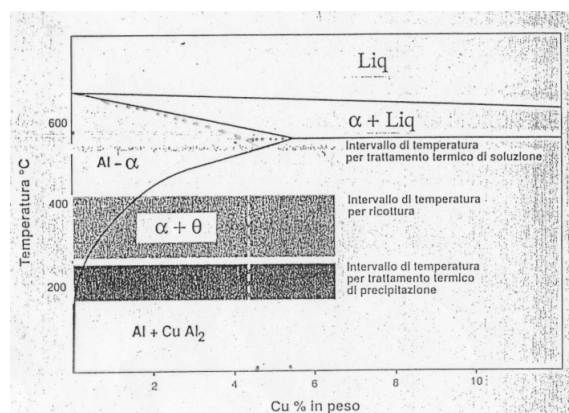
Influenza del tempo di invecchiamento sulla durezza Brinell per il rame, con diverse concentrazioni di berillio ($T = 350^{\circ}\text{C}$).

59

Rafforzamento per alligazione

Esempio: invecchiamento della lega Al-Cu.

La **prima fase** del trattamento consiste nel portare la lega Al-Cu nel campo di stabilità della fase α per un tempo sufficiente, **fase di solubilizzazione**, ad avere una soluzione solida omogenea ($540^{\circ}\text{C}; 15'$).



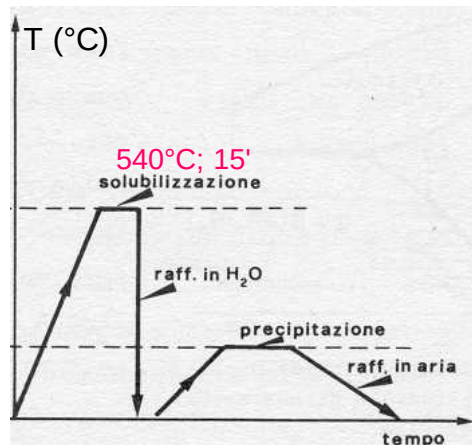
Particolare del diagramma di fase Al-Cu e fasce di T dei possibili trattamenti.

60

Rafforzamento per alligazione

Tempra: si opera un brusco raffreddamento fino a T_{amb} in modo che θ non si separi dalla matrice.

La lega si trova in una situazione **metastabile** che **tenderà ad evolvere anche a T_{amb}** (duralluminio: dopo tempra 55HB; dopo 10 giorni 104 HB).



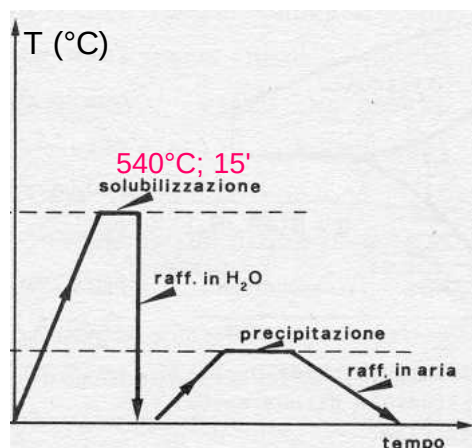
Trattamento termico di invecchiamento.

61

Rafforzamento per alligazione

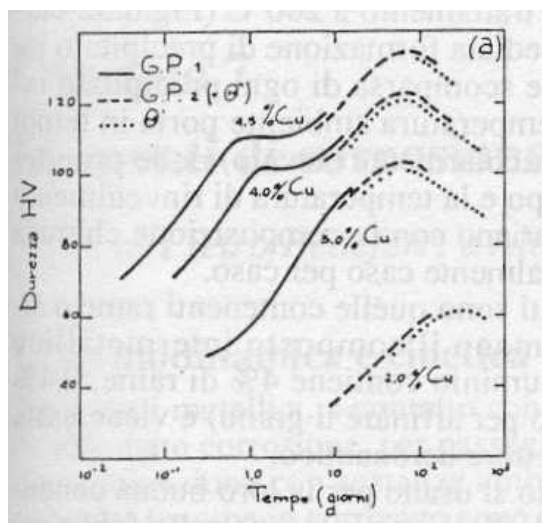
Si può eseguire un **invecchiamento artificiale** ad una T ben definita (ad **alta T** si ha **coalescenza**, a **bassa T** la **precipitazione non procede**).

Questo è stato osservato in leghe sia a diverso contenuto di Cu che a varie T .



62

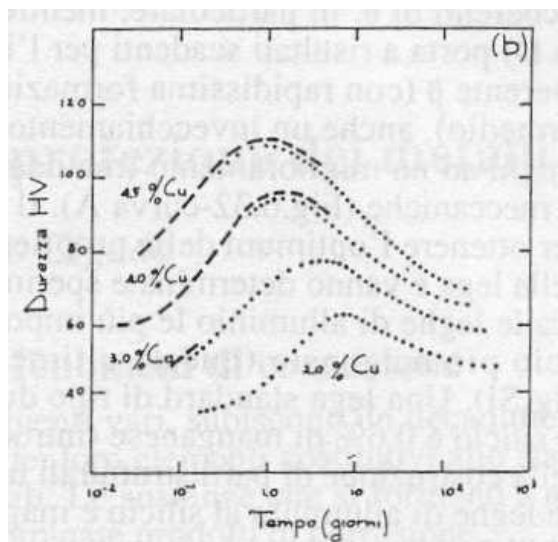
Rafforzamento per alligazione



Effetto dell'invecchiamento artificiale delle leghe Al-Cu a **130°C** sui costituenti strutturali e sulla durezza.

63

Rafforzamento per alligazione



Effetto dell'invecchiamento artificiale delle leghe Al-Cu a **190°C** sui costituenti strutturali e sulla durezza.

64

Rafforzamento per alligazione

Dalle curve precedenti si può dire:

- i **massimi valori** di durezza si raggiungono solo **con alti tenori di Cu**;
- la **durezza massima** si raggiunge in un **tempo tanto più breve** quanto **maggiore è la temperatura** di invecchiamento; oltre quel tempo tuttavia la durezza tende nuovamente a diminuire (fenomeno di *sovrainvecchiamento*)
- la **forma delle curve è diversa** a seconda della **T e del contenuto di Cu** e può presentare più di un massimo; nel caso particolare di una lega al 4,5% di Cu invecchiata a 130°C si ha un primo massimo dopo circa un giorno ed un secondo dopo alcune decine di giorni.

65

Rafforzamento per alligazione

Durante l'invecchiamento avvengono più trasformazioni strutturali a ciascuna delle quali è associata una variazione apprezzabile delle proprietà fisiche e meccaniche.

Per $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ avviene **una sola trasformazione** ossia la precipitazione della fase η (**CuAl_2**) sotto forma sferoidale con particelle che hanno dimensioni di $1\text{ }\mu\text{m}$.

A 130 °C la trasformazione è complessa.

Il **primo incremento di durezza** è dovuto alla formazione di **addensamenti di atomi di Cu** sui piani reticolari **(100)** della matrice di Al.

Tali **addensamenti** sono noti come zone di **Guinier-Preston** o **G.P.1**

66

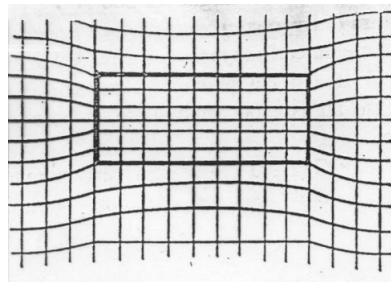
Rafforzamento per alligazione

I **G.P.1** hanno:

- una **larghezza non superiore a 100 Å**;
- uno **spessore di qualche distanza interatomica**;
- sono zone **coerenti con la matrice** anche se la differenza dei diametri atomici tra Cu e Al è di circa il 12% (**contrazione del reticolo**);
- la situazione di coerenza implica una **distorsione elastica** del reticolo nell'intorno della zona (**primo picco della curva di durezza**).

La forma appiattita favorisce il maggior rilassamento di queste tensioni elastiche.

Rappresentazione schematica di una zona G.P.1 in una lega Al-Cu.

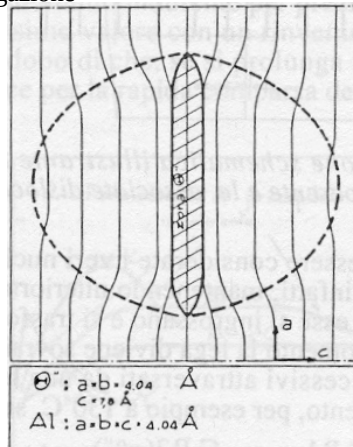


67

Rafforzamento per alligazione

Continuando a riscaldare la lega a 130 °C le zone GP1 vengono sostituite con zone GP2 (q'') che presentano:

- **dimensioni maggiori** (20-50 Å larghezza 200 Å);
- una propria **struttura (tetragonale)**;
- una **composizione media con rapporto 1 a 2 tra Cu e Al**. In particolare 100% di Cu nel piano più interno, cioè quello corrispondente all'asse del precipitato, e solo Al nei piani più esterni;
- Non **sono** quindi zone GP1 più grosse, ma **veri e propri precipitati metastabili** che risultano **coerenti con la matrice**.



Rappresentazione schematica di una placchetta q''. Risultano evidenti le diverse relazioni di coerenza con la matrice nelle direzioni a e c. (GP2)

68

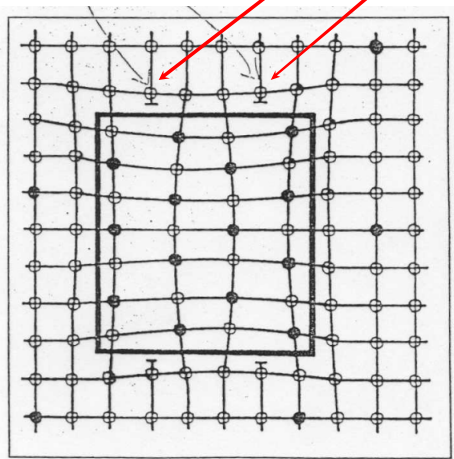
Successivamente nella matrice ed in parte nelle **GP2** compaiono dei precipitati più grossi di composizione nominale **CuAl₂** indicati con **q'** che presentano:

- **struttura tetragonale**
- **non coerenti completamente** con la matrice
- **di dimensioni di 500 Å**.

La matrice non essendo più in grado di assorbire elasticamente le tensioni elastiche, le scarica creando una **interfaccia parzialmente coerente dove si alternano zone di coerenza separate da dislocazioni di tipo EDGE** (vedi figura seguente).

69

Dislocazioni a spigolo



Rappresentazione schematica di un composto intermetallico semi coerente con la matrice.

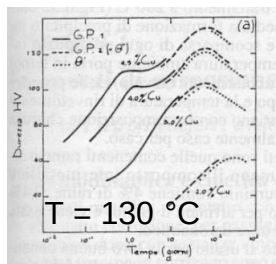
70

Rafforzamento per alligazione

Le particelle q' possono essere considerate i nuclei di q infatti con successivo riscaldamento ingrossano e danno luogo al fenomeno di **sovrainvecchiamento**.

La serie di trasformazioni è quindi:

$1^\circ \text{picco} \quad 2^\circ \text{picco}$
 $\uparrow \quad \uparrow$
S.S. sovrasatura $\Rightarrow$ **GP1** $\Rightarrow$ **GP2** $\Rightarrow$ $q' \Rightarrow q$ (CuAl_2)
| -max. dur.- |

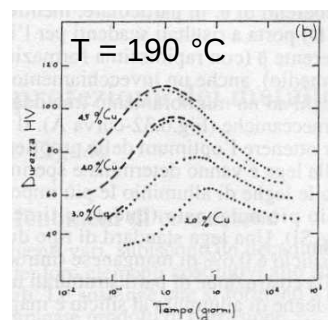


71

Rafforzamento per alligazione

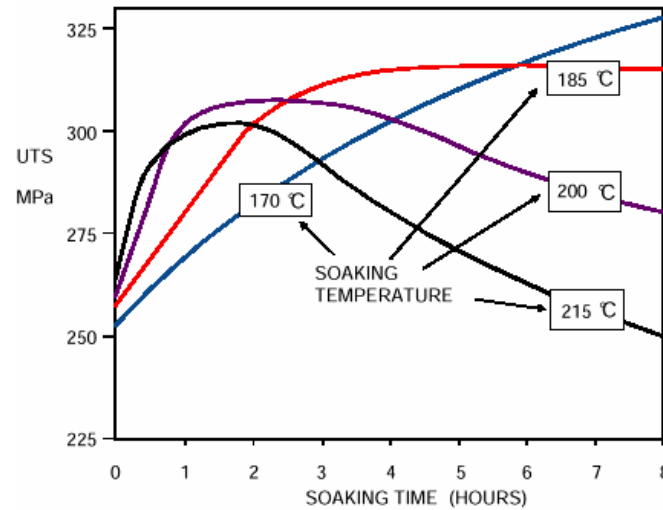
Operando a **190 °C** si ottiene **un solo picco di durezza** in cui compare sia θ' che **GP2**.

Il massimo valore di durezza dipende dal tenore di Cu ed il trattamento viene effettuato alla massima temperatura di trattamento ammissibile per ottenere i massimi valori con i minimi tempi.



72

Rafforzamento per alligazione



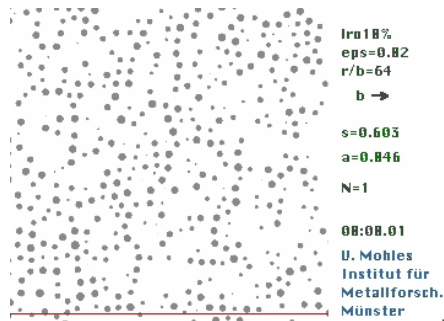
Effetto dell'invecchiamento artificiale delle leghe Al-Mg-Si sul carico di rottura, al variare della temperatura e dei tempi di trattamento

73

MATERIALE INVECCHIATO

- Vista sul piano di scorrimento della lega Nimonic PE16
- frazione in volume di precipitato: 10%
- dimensione media del precipitato: 64 b (b = 1 atomic slip distance)

EFFICACE BLOCCO DELLE DISLOCAZIONI

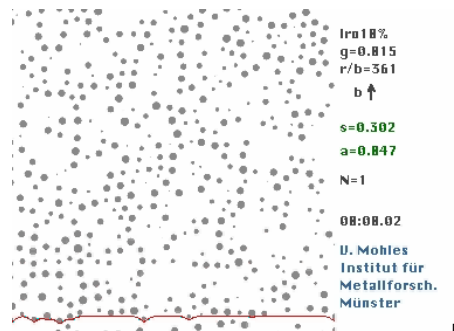


74

MATERIALE SOVRAINVECCHIATO

- Vista sul piano di scorrimento della lega Nimonic PE16
- frazione in volume di precipitato: 10%
- dimensione media del precipitato: 361 b (b = 1 atomic slip distance)

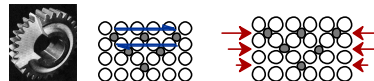
NON EFFICACE BLOCCO DELLE DISLOCAZIONI



75

Altri tipi di rafforzamento

• Rafforzamento per diffusione



Rafforzamento mediante fine precipitazione dispersa facendo reagire determinati gas con alcuni componenti del metallo. Caso importante per le applicazioni industriali:

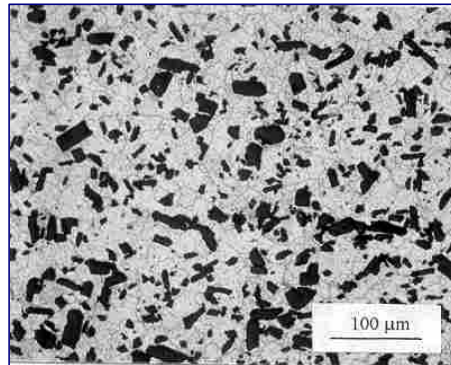
- **Nitrurazione** e **cementazione** superficiale degli acciai.

• Rafforzamento per dispersione

E' possibile **disperdere nel liquido** (solvente) una fase che non presenti solubilità nello stesso per cui durante la solidificazione rimane inalterato e finemente disperso dando alla lega una particolare **resistenza sia nelle applicazioni a temperatura ambiente, sia ad alta temperatura**. Si realizza una dispersione di particelle molto minute (**< 0,5-3 μm**) di **ossidi refrattari** di Al, Mg, Ti, Be, B, Th.

76

RAFFORZAMENTO PER DISPERSIONE



77

Altri tipi di rafforzamento

- **Rafforzamento con fibre**

I **materiali** che possiedono caratteristiche resistenziali come carico di rottura e moduli elastici più elevati sono anche **molto fragili** (vetri, strutture covalenti come boro, diamante, carborundum (carburo di silicio), azoturi, ossidi, carburi ecc.).

Si cerca quindi di ovviare a tale fragilità intrinseca **annegando queste sostanze sotto forma di fibre in una matrice metallica.**

In tale maniera si aumentano le caratteristiche della matrice anche di **5 - 10** volte per l'azione di rafforzamento dovuto alle fibre **le cui microcricche non trovano propagazione nella matrice.** Inoltre **la presenza di fibre costituisce un ostacolo al movimento delle dislocazioni.**

78

Altri tipi di rafforzamento

Le fibre possono essere :

- **lunghe o corte**
- **monocristalli (whiskers) o policristalli.**

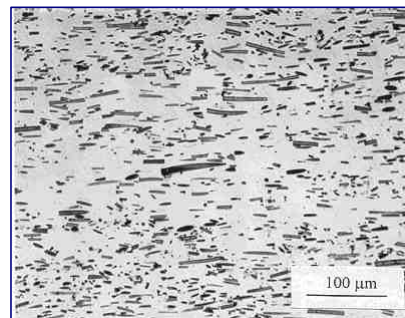
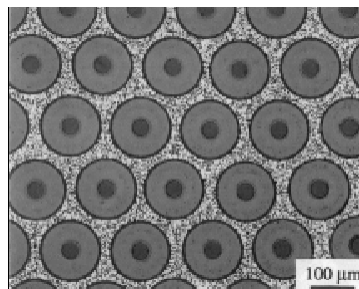
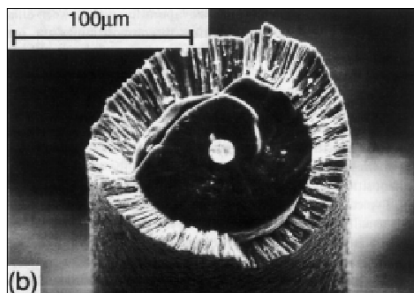
I whiskers di diametro inferiore ai 10 μm e di lunghezza tra 1 e 10 mm presentano piccola densità di dislocazioni e legame covalente (più forte del metallico).

Nel caso dell'allumina la deformazione avviene in regime elastico fino alla rottura e le proprietà meccaniche si conservano eccellenti fino a 1300°C.

Si usano anche **fibre di B, SiC, grafite ecc.** con diametri di 100 μm circa che possono resistere, immerse in materiali come W, Si, o grafite, fino a 25 kg/mm² a 700°C.

79

Rafforzamento con fibre

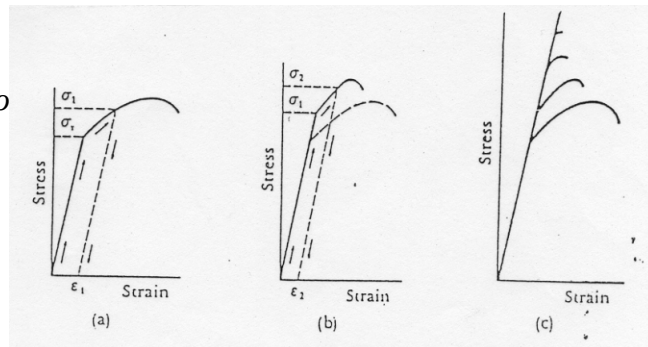


80

Rafforzamento mediante deformazione, incrudimento e ricristallizzazione

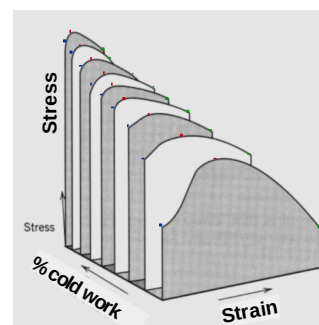
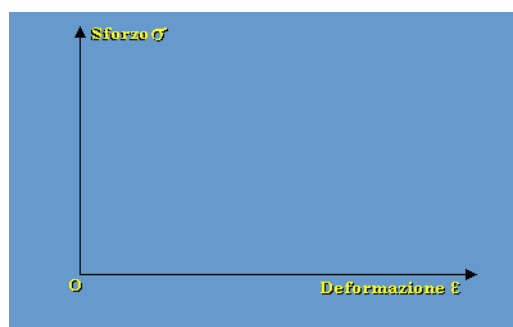
Applicando una sollecitazione che superi il carico originario di snervamento del materiale, abbiamo indotto una deformazione permanente sul materiale ed aumentato il carico di snervamento dello stesso. Si dice che il materiale è stato **incrudito** (*strain hardened*) o **deformato a freddo** (*cold worked*).

Sviluppo dell'incrudimento dal diagramma tensione - deformazione.



81

Incrudimento



- La tensione di snervamento (σ_y) aumenta.
- La tensione di rottura (**TS**) aumenta.
- La duttilità (**An%**) diminuisce.

82

La risposta del metallo alla deformazione a freddo è data dal **coefficiente di incrudimento n** che è individuato dalla pendenza della parte plastica della curva ϵ contro σ .

$$s_t = k e_t^n$$

$$\ln s_t = \ln k + n \ln e_t$$

k = alla sollecitazione quando $\epsilon_t = 1$

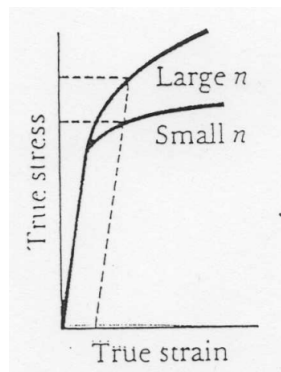


Diagramma **True stress - True strain** per metalli con piccolo e grande coefficiente di incrudimento.

83

In tabella sono riportati i valori del coefficiente di incrudimento per alcuni metalli a struttura cristallina diversa.

Metal	Crystal Structure	n	K (MPa)
Titanium	HCP	0.05	1200
Annealed alloy steel	BCC	0.15	640
Quenched and tempered medium-carbon steel	BCC	0.10	1570
Molybdenum	BCC	0.13	725
Copper	FCC	0.54	315
Cu-30% Zn	FCC	0.50	895
Austenitic stainless steel	FCC	0.52	1515

84

Tecnologie di deformazione a freddo

Tecnologie di deformazione

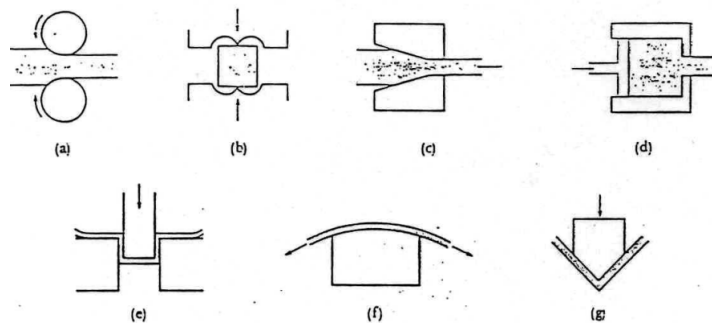
Molte sono le tecniche utilizzate per deformare un metallo. La **grandezza** che però si cerca sempre di misurare è il controllo della deformazione ovvero la % della deformazione.

$$\% \text{ Deformazione a freddo} = (A_0 - A_f) / A_0 * 100$$

Dove A_0 e A_f sono le **sezioni** iniziali e finali dopo deformazione.

85

Tecnologie di deformazione a freddo

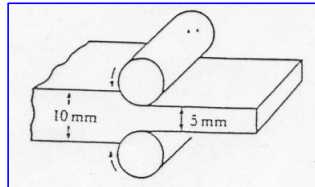


Disegni schematici di tecnologie di deformazione. a) **laminazione**; b) **forgiatura**; c) **trafilatura**; d) **estrusione**; e) **imbutitura**; f) **stiropiegatura**; g) **piegatura**.

86

Esempio

Calcolare la percentuale della deformazione a freddo quando un piatto 10x60x200 è deformato per laminazione ad un piatto di spessore 5x60x400 mm.



$$\begin{aligned}\% \text{ Deformazione a freddo} &= (A_0 - A_f) / A_0 \\ &= [(10 \times 60) - (5 \times 60)] / (10 \times 60) \\ &= 50 \%\end{aligned}$$

Andando a verificare le proprietà del piatto troveremo che la resistenza è aumentata mentre è diminuita la duttilità. Quando la duttilità tenderà a zero il metallo si romperà sotto l'azione di una ulteriore deformazione.

87

Quando si desidera un materiale con certe caratteristiche si deve anche selezionare o meglio progettare il processo di deformazione e definire l'entità della deformazione richiesta.

Esempio

Supponiamo di voler produrre una barra di Cu che abbia un carico di rottura di almeno 415 MPa, un carico di snervamento di 380 MPa ed un allungamento almeno del 5% .

Quale deformazione mediante lavorazione a freddo viene richiesta?

Dalla figura seguente ricaviamo che:

per produrre $R > 415 \text{ MPa}$ la % deformazione $> 25 \%$

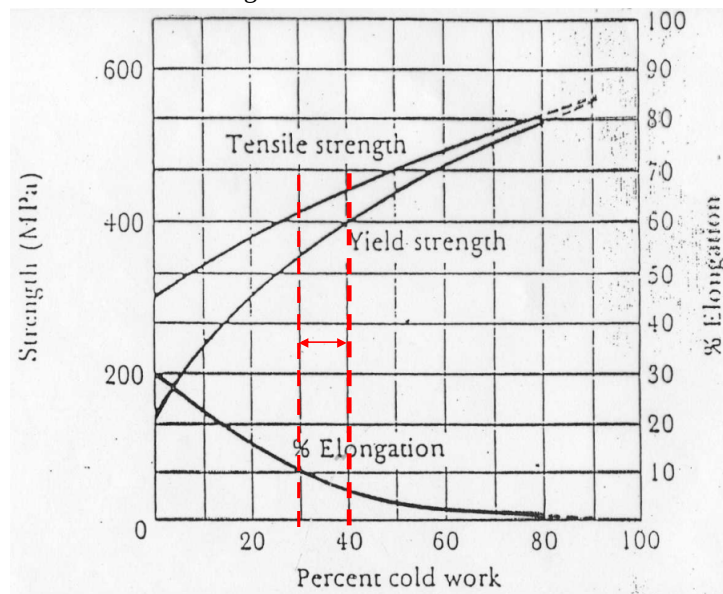
" " $R_s > 380 \text{ MPa}$ " " " $> 30 \%$

" " $A\% > 5 \%$ " " " $< 42 \%$

Pertanto ogni deformazione compresa tra il 30 e 42 % sarà soddisfacente.

88

Tecnologie di deformazione a freddo



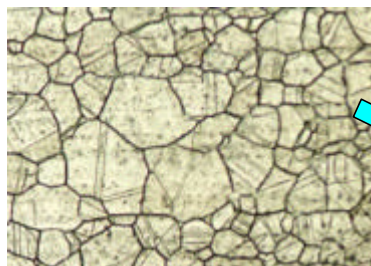
Effetto della lavorazione a freddo sulle proprietà meccaniche del rame.

89

Tecnologie di deformazione a freddo

Microstruttura dei metalli lavorati a freddo

Durante la deformazione si produce una **microstruttura fibrosa**. Il **comportamento** del metallo diventa **anisotropo** per **orientamento di certi piani cristallini di scorrimento** preferenziale con la formazione di tessiture.



Struttura dei grani **prima** della laminazione (alti ingrandimenti).



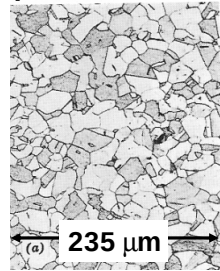
Struttura dei grani **dopo** laminazione.

90

Anisotropia in σ_{yield}

- Può essere causata da laminazione di un policristallo

- prima della laminazione



- **isotropico**
I grani sono approssimativamente sferici e orientati casualmente

- dopo laminazione



Direzione di laminazione

- **anisotropico**
la laminazione modifica la **forma** e l'**orientazione** dei grani

91

Tecnologie di deformazione a freddo

Allineamento e deformazione di seconde fasi

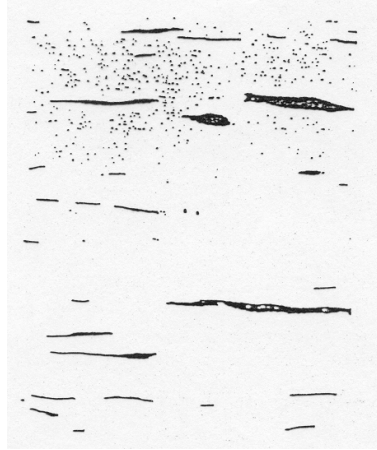
Ogni fase anche estranea che sia presente nel materiale viene deformata durante il processo.

Si possono avere **inclusioni facilmente deformabili o fragili**. Le prime seguono la direzione di deformazione, mentre le seconde se dure innescano degli intagli o microcricche nel materiale.

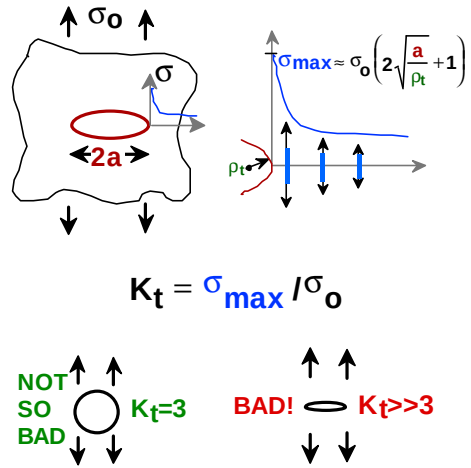
In entrambi i casi quando il materiale viene sottoposto a sforzi in esercizio dobbiamo tenere presente il **fattore di intaglio dovuto alla discontinuità presente nel materiale**.

92

Tecnologie di deformazione a freddo

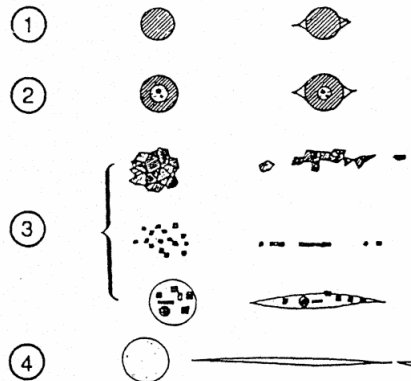


Inclusioni allungate di solfuri di ferro prodotte durante la laminazione di un acciaio.



93

Tecnologie di deformazione a freddo



- 1) inclusioni vetrose indeformabili,
- 2) inclusioni vetrose bifase, parzialmente non deformabili;
- 3) inclusioni parzialmente o totalmente cristallizzate
cioè parzialmente o completamente deformabili;
- 4) inclusioni generalmente vetrose, facilmente deformabili

Differente comportamento delle inclusioni durante la laminazione di un acciaio, al variare delle loro caratteristiche.

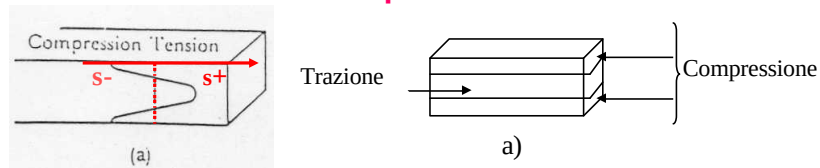
94

Tensioni residue

Quando un materiale viene sottoposto ad una certa tensione una parte di questa viene incamerata dal materiale e immagazzinata nella struttura dalla rete di dislocazioni.

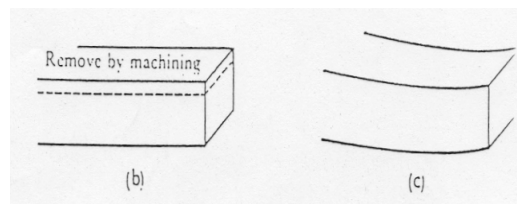
Le tensioni residue potrebbero essere **dannose** o **benefiche**.

Esempio 1



Supponiamo di avere un materiale **(a)** che presenti tensioni residue di compressione in superficie e di trazione al centro. Le due si bilanciano e la situazione risulta di equilibrio.

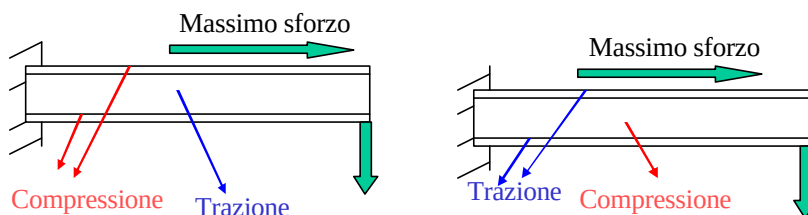
95



Ma se un lato della superficie è rimosso per lavorazione meccanica **(b)** si modifica il bilancio delle tensioni.

Per restaurare l'equilibrio delle tensioni la barra si piega **(c)**.

Esempio 2



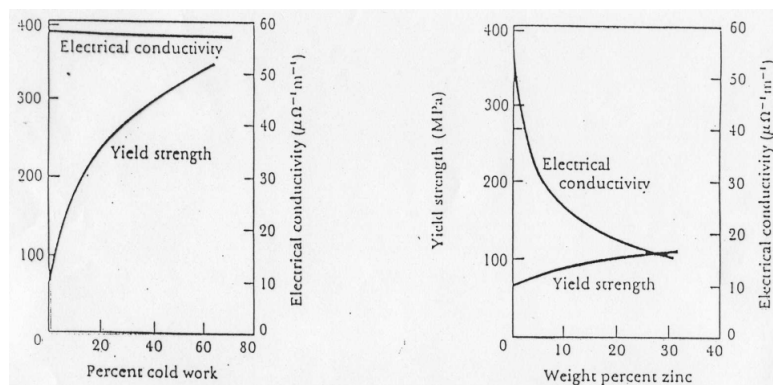
96

Deformazioni a freddo

- 1) Permette di **rafforzare** il metallo **più** produzione della **forma desiderata**.
- 2) **eccellenti tolleranze** dimensionali.
- 3) **metodo economico per piccoli pezzi**. Possibilità di rottura durante il processo se si richiedono **grandi deformazioni**. **Attrezzature costose** dati i **carichi in gioco**.
- 4) alcuni **metalli** sono **fragili a freddo HCP**.
- 5) la **duttilità**, la **conduttività elettrica** e la **resistenza alla corrosione** sono **danneggiate** dal processo. La conduttività elettrica viene però meno danneggiata rispetto ad altri metodi di indurimento quali la soluzione solida.

97

- 6) le **tensioni residue** ed il comportamento anisotropo se controllati sono **positivi**.
- 7) alcuni processi di deformazione avvengono solo se si esegue una deformazione a freddo. Esempio: trafilatura di un tondo.

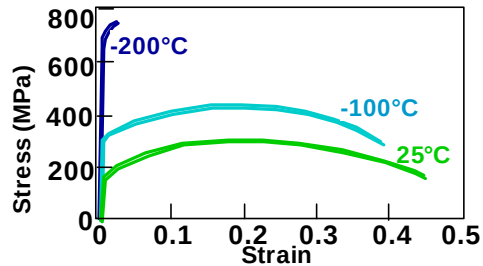


Confronto del rafforzamento del rame (a) per lavorazione a freddo; (b) per soluzione solida.

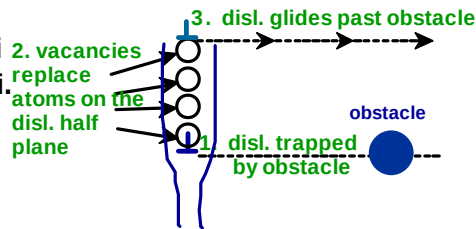
98

ANDAMENTO σ - ϵ FUNZ. DELLA T

- risultati per il ferro policristallino:



- σ_y e TS *diminuiscono* all'aumentare della temperatura.
- %An *aumenta* all'aumentare della temperatura.
- Perché? Le vacanze aiutano le dislocazioni a superare gli ostacoli.

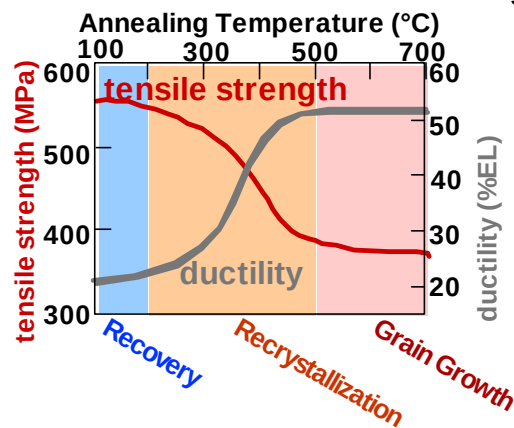


23

99

EFFETTO DEL RISCALDAMENTO DOPO %DEFORMAZIONE A FREDDO

- 1 h di trattamento alla $T_{ricrist...}$ (temperatura a cui la ricristallizzazione si completa in 1 ora) diminuisce TS e aumenta %EL.
- gli effetti della deformazione a freddo vengono annullati!



100

RICRISTALLIZZAZIONE

L'energia libera di un materiale deformato è maggiore di quella di un metallo ricotto di una quantità approssimativamente uguale all'energia di deformazione accumulata.

Il materiale deformato si trova in uno stato di equilibrio metastabile e cercherà di evolvere verso lo stato stabile riorganizzandosi, prima in una configurazione di minore energia ed in un secondo tempo riducendo, in diversi stadi, la densità di difetti per unità di volume.

Il processo a T ambiente è lentissimo per cui viene condotto ad una temperatura pari a circa 0,4 la temperatura assoluta di fusione del metallo.

101

Sperimentalmente si è visto che vi sono alcuni stadi attraverso i quali il metallo recupera le sue proprietà durante la ricottura.

- deformazione plastica (aumento dislocazioni)

Riscaldamento ↓

- recovery (riassetto dei difetti puntiformi). Si intendono i primi processi di riorganizzazione dei difetti e diminuzione di vacanze e interstiziali creati per deformazione all'interno del metallo incrudito con conseguente abbassamento dell'energia del reticolo. Consiste in una variazione microstrutturale su scala atomica entro i grani già esistenti.

- poligonizzazione: riorganizzazione delle dislocazioni nelle "buche" o nei bordi di subgrano (zone a minore energia)

102

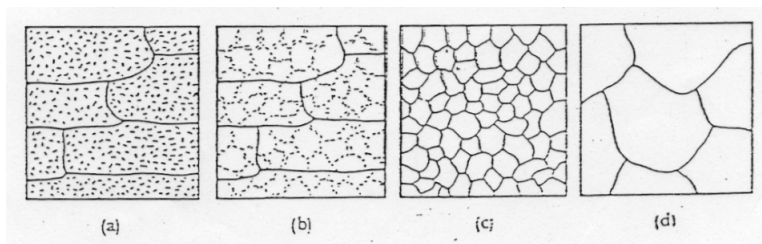
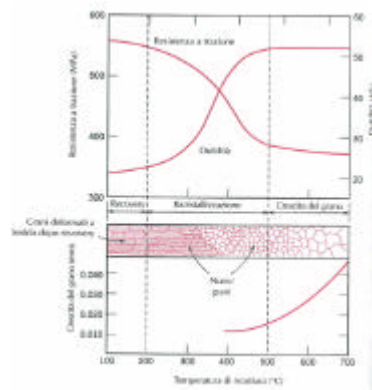
Ricristallizzazione

Riscaldamento



- **ricristallizzazione: formazione nuovo grano** (riduzione del numero di dislocazioni)
- **ricristallizzazione secondaria** (**ingrossamento**). E' una fase negativa per le proprietà meccaniche.

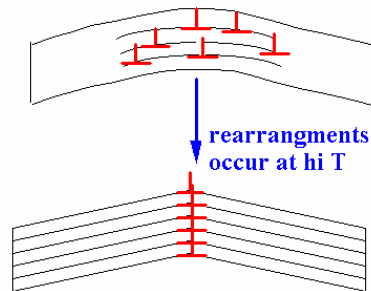
103



104

POLIGONALIZZAZIONE

riarrangiamento delle dislocazioni allo scopo di diminuire l'energia di distorsione elastica

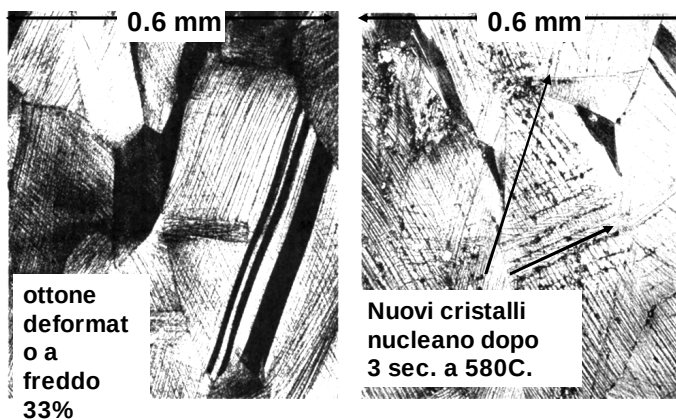


Prevede movimento delle dislocazioni per scorrimento (**glide**) e salto (**climb**) (quest'ultimo è possibile grazie alla temperatura elevata e allo stato tensionale)

105

RICRISTALLIZZAZIONE

- Si formano nuovi cristalli che:
 - hanno bassa densità di dislocazioni
 - sono piccoli (**rafforzamento per affinamento del grano**)
 - 'consumano' i cristalli incruditi.



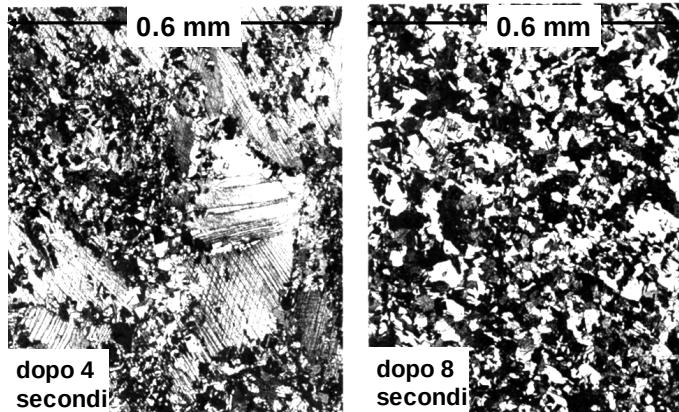
ottone
deformat
o a
freddo
33%

Nuovi cristalli
nucleano dopo
3 sec. a 580C.

106

ULTERIORE RICRISTALLIZZAZIONE

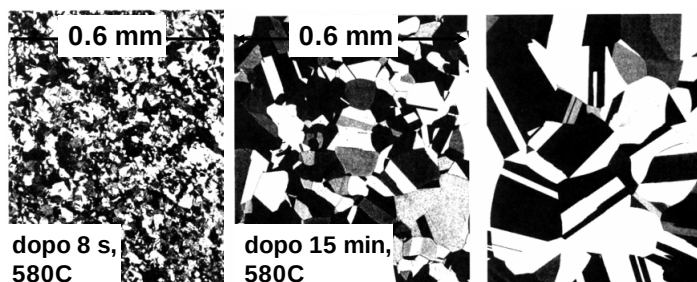
- Tutti i cristalli deformati a freddo sono 'consumati'.



107

CRESCITA DEL GRANO

- All'aumentare del tempo, i grani più grandi consumano quelli più piccoli
- Perché? La superficie di bordo grano (e quindi l'energia) si riduce.



- Relazione empirica:

Tipico exp. ~ 2

Diametro
del grano
al tempo t.

d^n

$- d_0^n$

$=$

Kt

Diametro del grano al
tempo t=0.

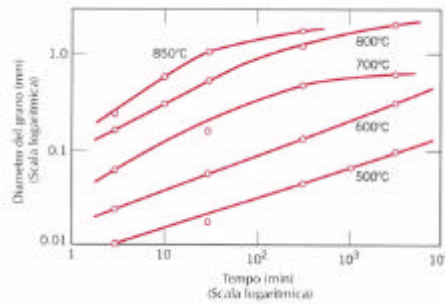
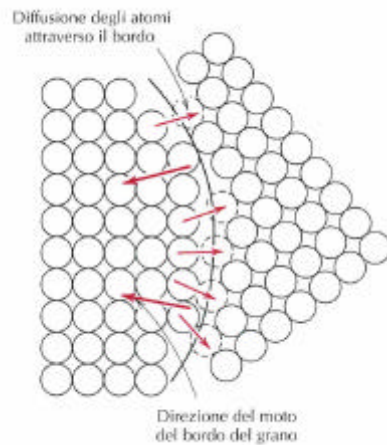
Coefficiente dipendente
dal materiale e dalla T.

Tempo trascorso

28

108

CRESCITA DEL GRANO

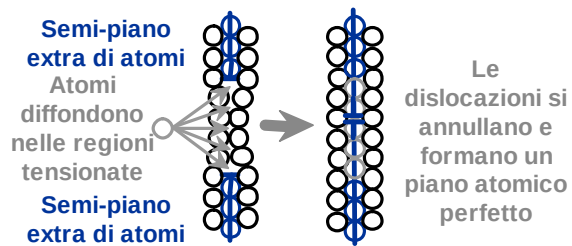


109

Altri ..meccanismi di annichilimento delle dislocazione

Il movimento dei difetti puntiformi crea una diminuzione delle dislocazioni.

• Scenario 1

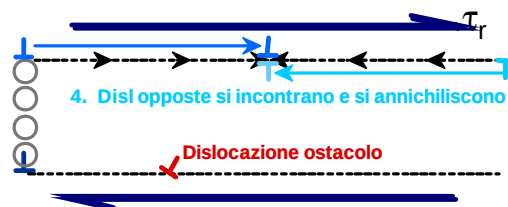


• Scenario 2

3. La dislocazione che ha saltato può ora muoversi su un nuovo piano

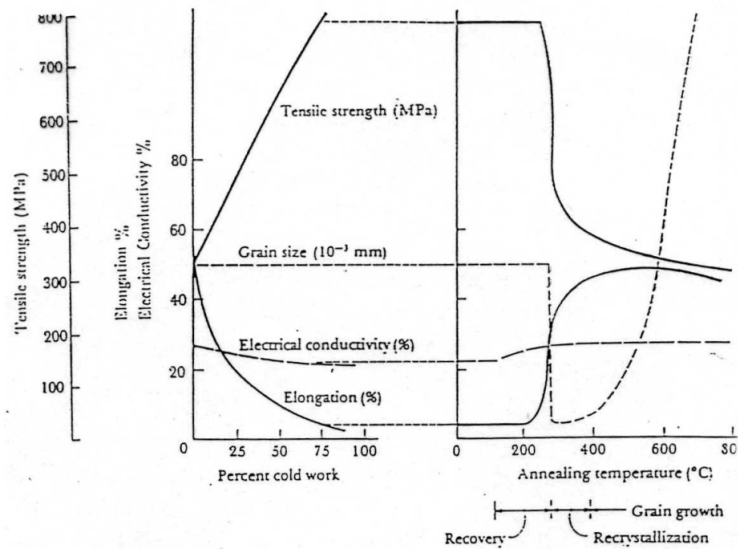
2. Gli atomi in grigio migrano per diffusione di vacanze permettendo alla dislocazione di saltare

1. Dislocazione bloccata; non può muoversi a destra



110

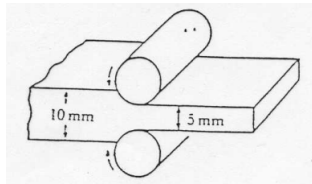
Ricristallizzazione



Effetto della lavorazione a freddo e della ricottura sulle proprietà della lega Cu-35%Zn.

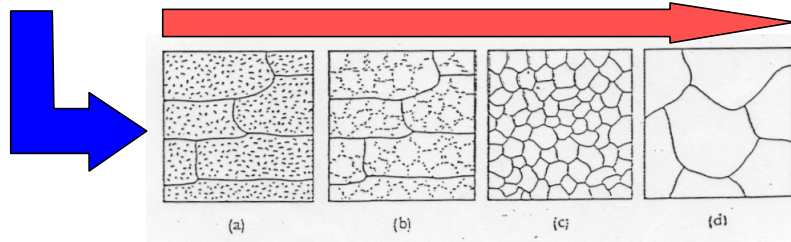
111

Ricristallizzazione



Deformazione a freddo

Ricottura

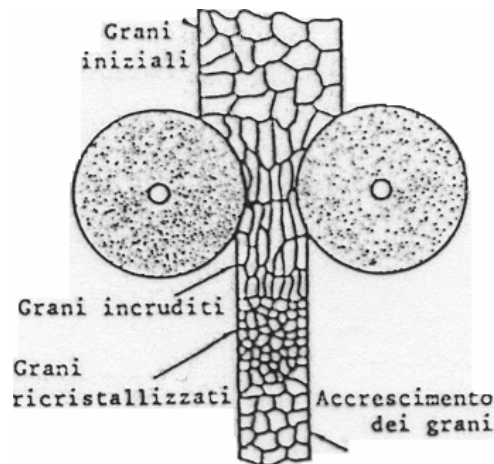


Effetto della temperatura di ricottura sulla microstruttura di un materiale incrudito. a) Incrudito: si nota la struttura allungata dei grani dopo la laminazione; b) dopo recovery; c) dopo ricristallizzazione; d) dopo ingrossamento del grano.

112

Ricristallizzazione

Il processo di **deformazione plastica** può avvenire anche **a caldo**.

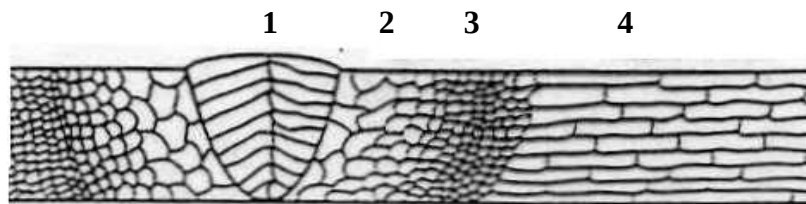


Laminazione a caldo e ricristallizzazione.

113

Ricristallizzazione

Processo che induce ricristallizzazione: Saldatura.



Struttura del grano in prossimità della zona di saldatura.

1. Zona fusa: Struttura colonnare in quanto la conducibilità termica è elevata.

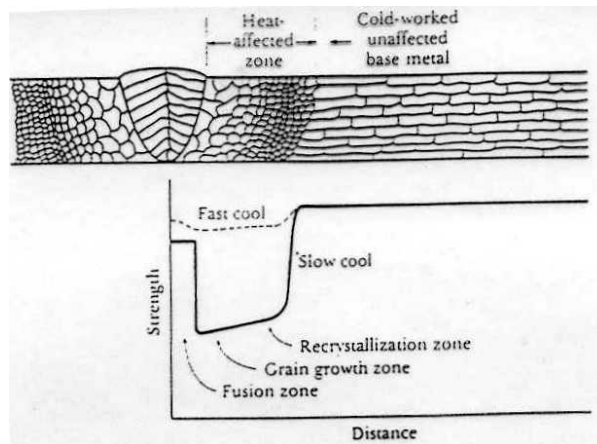
2 e 3. Zona termicamente alterata (ZTA). Il calore della saldatura induce ricristallizzazione e addirittura ingrossamento del grano nella zona 2, più vicina alla sorgente di calore.

4. I grani risultano allungati, come conseguenza di un precedente processo di laminazione, ma non risentono dell'alterazione termica indotta dalla saldatura.

114

Ricristallizzazione

Saldatura



La struttura e le proprietà attorno al cordone di saldatura di un metallo lavorato a freddo.

115

Ricristallizzazione

Controllo della ricottura

Vi sono **tre** importanti **fattori** che devono essere considerati quando **scegliamo** un **trattamento termico** di ricottura:

- la **temperatura di ricristallizzazione**;
- la **dimensione dei grani ricristallizzati**;
- la **temperatura di ingrossamento del grano**.

La ricristallizzazione dipende da una molteplicità di variabili di processo.

(i) La **temperatura di ricristallizzazione** **decresce** quando la **percentuale di deformazione aumenta**. Una più elevata percentuale di deformazione rende il metallo meno stabile e favorisce la nucleazione dei grani ricristallizzati. Se la percentuale di deformazione è bassa, al di sotto di circa del 3% -5%, la ricristallizzazione non avviene.

116

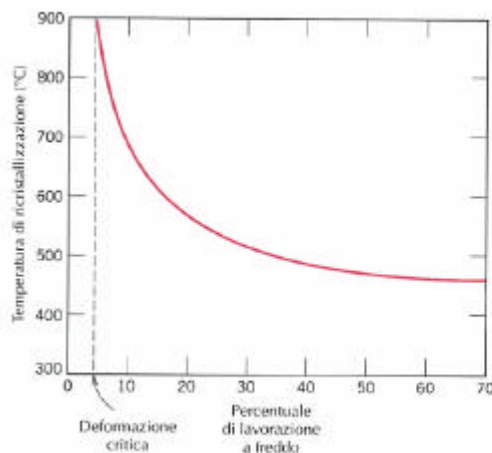


FIGURA 7.23 Variazione della temperatura di ricristallizzazione con la percentuale di lavorazione a freddo, per il ferro. Per deformazioni inferiori a quella critica (circa 5%), non si verifica ricristallizzazione.

117

Ricristallizzazione

(ii) **Un grano**, originario del lavorato a freddo, **più piccolo**, **riduce la temperatura di ricristallizzazione**. I vecchi bordi grano, forniscono più siti nei quali possono nucleare i nuovi grani.

(iii) I **metalli puri ricristallizzano a temperature più basse** delle leghe rafforzate per soluzione solida. Spesso questo è utile. Ad esempio, le leghe che devono essere brasate o saldobrasate potrebbero essere ricotte e addolcite durante l'operazione di giunzione più efficacemente del metallo puro.

(iv) **Incrementando il tempo di ricottura si riduce la temperatura di ricristallizzazione**, poiché vi è più tempo per la nucleazione e l'accrescimento dei nuovi grani ricristallizzati. **Tuttavia la temperatura è di gran lunga il parametro più importante**: raddoppiando il tempo di ricottura la temperatura di ricristallizzazione si riduce di soli 10 °C.

118

Ricristallizzazione

(v) Le leghe con più alta temperatura di fusione hanno una temperatura di ricristallizzazione più alta. Poiché la ricristallizzazione è un processo controllato dalla diffusione, la temperatura di ricristallizzazione è approssimativamente proporzionale a $0,4 T_m$ (temperatura assoluta di fusione). Tipici valori della temperatura di ricristallizzazione per alcuni metalli sono riportati nella tabella di seguito.

119

Ricristallizzazione

Metal	Melting Temperature (°C)	Recrystallization Temperature (°C)
Sn	232	< Room temperature
Cd	321	< Room temperature
Pb	327	< Room temperature
Zn	420	< Room temperature
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Au	1064	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Pt	1769	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
Ta	2996	1000
W	3410	1200

Adapted from R. Brick, A. Pense, and R. Gordon, *Structure and Properties of Engineering Materials*, McGraw-Hill, 1977.

Temperature di ricristallizzazione per alcuni metalli.

120