



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2217A

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Cerruti Federico

MATERIA: Scienze dei materiali e Metallurgia - Teoria + Temi d'Esame - Lombardi e Scavino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

Materiali :

- **Solidi in grado di svolgere almeno una funzione** (meccanica, termica etc)
 - Naturali: di origine geologica o chimica.
 - Sintetici: da trattamento dei minerali con processi
 - Primari: atti a fornire una forma
 - Secondari: modificano geometria e proprietà

• **Ceramici:** materiali inorganici non metallici
Combinazioni di metalli e non metalli stechiometricamente definite. Legami covalenti (talvolta ionici)

- Tipo di struttura:
 - Ordinata (cristallina, anisotropa) a lungo raggio
 - Caotica (amorfa, vetri) a volte con un ordine a breve raggio.
- Tipi di elementi leganti:
 - Ossigeno (Ceramici ossidici) con silicio (silicati) o meno
 - Non ossidici
- Proprietà base:
 - Isolanti Termici ed elettrici
 - Tf elevate
 - Alta refrattarietà (invarianza chimico fisico meccanica a alte temperature)per tempi contenuti)
 - Alta inerzia chimica
 - Alta durezza
 - Non hanno deformabilità plastica, rottura fragile.
 - Formazione da polveri (fusione per i vetri)

• **Metalli:** materiali inorganici metallici.
Elementi con valenza elettronica delocalizzata. Struttura prevalentemente cristallina. Esistono le leghe (combinazione di metalli o di metalli e non metalli) che non sono definite stechiometricamente.

- Proprietà base:
 - Opachi (non trasparenti) ma lucenti
 - Ottimi conduttori elettrici e termici
 - Alta resistenza Meccanica
 - Duttile, deformabile plasticamente (irreversibile)
 - Tf variabili (per es. Al 660° C; Ti 1660° C; W 3420° C)
 - Medio-Alta densità
 - Si corrodono facilmente (bassa inerzia chimica)
 - Si formano per fusione

Rigidezza

Misura la resistenza di un materiale nell'opporci a sollecitazioni esterne. In campo elastico applico F a trazione (analogo per compressione) e provo uno spostamento δ .

– I legami si comportano come molle di rigidezza $\frac{F}{\delta}$

– Immagazzino energia pari a $U = F \frac{\delta}{2}$

– Entro un certo δ la trasformazione è reversibile.

Oltre il δ elastico:

- Materiale Fragile (brittle) si rompe (~ materiali ceramici ingegneristici)

- Materiale Duttile si deforma plasticamente =,

N.B. Resistenza a rottura [MPa] Azione esterna tollerabile prima della rottura:

- Metalli a trazione (se comprimo avvicino 2 + e rompo)

- Ceramici a compressione (a trazione allontanano + - e rompo)

Resistenza meccanica : opposizione continua alla sollecitazione f (energia di legame)

Rigidezza: capacità di reagire allo stress in modo più o meno elastico,

In campo elastico secondo Condon morse:

$ compressione \equiv repulsione \equiv \Delta E (\delta x)$	Trazione
$ trazione \equiv attrazione \equiv \Delta E (\Delta x)$	Compressione

Trazione e compressione a livello macroscopico.

Applico F a trazione uniassiale (analogo per compressione)

– F agisce su infinite porzioni di sezione A

– Vi è un allungamento $\Delta L = L - L_0$

- Grandezze Nominali

– Sforzo $\sigma = \frac{F}{A} [Pa] = [Nm^{-2}]$

– Deformazione $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$



In campo elastico vale la **Legge di Hooke** $\sigma = E \epsilon$ ove

$E =$ modulo di Young [GPa] dipende dal tipo di

materiale; quantifica la rigidezza, la capacità di reagire più o meno elasticamente.

- Deformazione ($\frac{W}{L_0} = \tan \gamma \approx \gamma$) w distanza di scorrimento

$$\tau = G \gamma \quad G \text{ modulo di taglio.}$$

• Coefficiente di Poisson ν (Hp isotropia $\rightarrow \epsilon_x = \epsilon_y$)

Misura il rapporto fra la deformazione trasversale e longitudinale.

$$\rightarrow \nu = - \frac{\text{deformazione trasversale}}{\text{deformazione longitudinale}}$$

Se trazione, trasversalmente si riduce (trasv. <0) $\rightarrow \nu > 0$

• Pressione idrostatica P

- compressione dilatazione volumica $p = k * \Delta$

N.B energia elastica

Organizzazione degli atomi nei solidi

• Solidi Cristallini

Struttura si ripete con ordine a breve e lungo raggio

- anisotropi: proprietà differenti in base alla direzione in cui si misurano

- talvolta monocristallini come il quarzo

• Solidi Amorfi (vetri)

Struttura caotica con ordine solo a breve raggio.

- isotropi :

- chiamati anche policristallini

• Celle elementari

Strato A impacchettamento compatto

Strato B su avvallamenti di A \rightarrow EC (base Esagonale con 3 atomi a triangolo + basi)

Dopo due possibilità:

- Strato C coincidente con A \rightarrow ABAB \rightarrow EC

- Strato B su avvallamenti A \rightarrow CCC

Allotropia e Polimorfismo

La configurazione atomica può variare in base alla temperatura

Esempio Fe

@ T_{amb} Fe α CCC \

@ 1000° C Fe δ CFC

• Densità (rapporto tra massa e volume $\delta = m/V$)

$$\delta_M > \delta_C > \delta_P$$

- δ_M e' molto alta per l'elevato FIA (dovuto alla nube elettronica e all'assenza di vincoli atomici) e per l'elevato PA.

- δ_C e' un valore medio dovuto ai rapporti stechiometrici ben precisi, disposizioni atomiche spesso CCC, e a PA inferiori

- δ_P e' molto basso per via dei bassissimi FIA e PA bassi

Proprietà intrinseche ed estrinseche

Difetti

Tutti i difetti interagiscono con le dislocazioni e hanno un ruolo nella duttilità. Il comportamento plastica aumenta la sicurezza (moto prima della rottura)

Difetti puntuali/adimensionali

– nei reticoli metallici esistono

- a) vacanze (mancanza di un atomo)
- b) autointerstiziali (si inserisce un altro atomo)

– nei reticoli ionici esistono i difetti:

- a) di Frenkel (rari, un catione si sovrappone ad un altro lasciando una vacanza)
- b) di Schotty (manca un anione)

I difetti puntuali permettono di creare leghe e soluzioni solide

a) Interstiziali (soluto << solvente per dimensioni) con solubilità parziale(sempre)

b) Sostituzionali, a patto che si rispetti la **regola di Hume – Rothery**

- Soluto e solvente devono avere :
 - Stessa valenza
 - Stesso reticolo cristallino
 - Simile elettronegatività' (per non creare legami)
 - Dimensioni atomiche simili (max 15% differenza)

Le soluzioni solide sfruttano la diffusione allo stato solido per modulare il comportamento del materiale e creare leghe.

• Gradiente di concentrazione $\frac{dC}{dx}$

se = 0 la concentrazione è costante → non c'è movimentazione
se != 0 c'e' driving force del fenomeno di A in B.

• Prima legge di Fick $J_x = -D \frac{dC}{dx}$, flusso atomico lungo x

• Legge di Arrhenius $D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$ in cui

- Q = energia di attivazione del moto
- D_0 = diffusività per T= 0 K

• Diffusività $\propto \frac{1}{FIA}$ (CCC > CFC)

• Solubilità $\propto FIA$ (CFC > CCC gli interstizi sono di meno ma di dimensioni maggiori)

Difetti di linea : dislocazioni (duttilità , CFC > CCC)

- Vi e' un semipiano aggiuntivo oltre al piano di scorrimento
 - il vettore di Burgers \vec{b} definisce il tipo di dislocazione
 - $\vec{b} //$ al semipiano aggiuntivo : dislocazione a vite

$$f_s = \tau * L_1 * L_2$$

La forza compie un lavoro $W = f_s * b = \tau * L_1 * L_2 * b$

ove b e' lo scorrimento relativo (effettivo)

f: resistenza intrinseca del cristallo alla deformazione plastica

– Un lavoro resistente e' dato da $W = f * L_1 * L_2$

– quindi uguagliando $\tau b = f \rightarrow$ la dislocazione avviene se lo sforzo di taglio

$$\tau > \frac{f}{b}$$

Tensione Lineare T

Atomi vicini al semipiano aggiuntivo sono compressi, gli altri trazionati

– localmente ci sono variazioni energetiche

– $E_{tot} > E_{min}$ per la stabilità

– La dislocazione tende ad aumentare E_{min} il meno possibile \rightarrow Ciò avviene mantenendosi corta, ovvero includendo il minor numero di atomi perpendicolari al piano di scorrimento, è come se fosse trattenuta dalla tensione lineare T

$$T \approx \frac{1}{2} E b^2, \text{ influenza di molto l'interazione dislocazione-ostacoli (altri difetti)}$$

Materiali duri e teneri

Duri : f molto alto, si oppongono molto alle dislocazioni (o completamenti \rightarrow fragili, ceramici)

Teneri: metalli puri, f contenute per legami adirezionali.

– a volte si vuole evitare la duttilità, cioè si vuole incrementare f ricorrendo al rafforzamento.

Contributo al rafforzamento

• In un reticolo ideale esiste una **resistenza allo scorrimento pari a f**

ogni ostacolo aumenta la resistenza (effetto Pinning), aumenta la resistenza meccanica

– l'aumento di f e' funzione del numero di ostacoli NL e del tipo

– definisco L = lunghezza fra due ostacoli

$$NL = 1/L \text{ numero ostacoli su dislocazione per lunghezza unitaria.}$$

Meccanismi di rafforzamento

• Obiettivo: aumentare il limite alle sollecitazioni esterne prima che inizi la dislocazione.

• Rafforzamento da soluzione solida (Leghe).

Inserisco atomi interstiziali o sostituzionali.

– chiamo d_i il diametro caratteristico dell'atomo di solvente

– se inserisco atomi con $d < d_i$ genero trazione negli atomi adiacenti, viceversa se $d > d_i$ genero compressione

– Solitamente gli atomi di soluto si portano nei pressi di una dislocazione .

– Sia C la concentrazione di soluto, α una costante del Mismatch (distorsione per cattivo abbinamento)

→ allora il contributo allo sforzo di taglio e' $\tau_{ss} = \alpha E C^{1/2}$

N.B. Maggiore e' la distorsione maggiore e' la variazione energetica e maggiore la stabilita. I difetti aumentano la stabilita e diminuiscono la duttilità.

$\uparrow \tau$ sopportabile → il materiale sopporta $\uparrow \sigma$ prima di deformarsi plasticamente

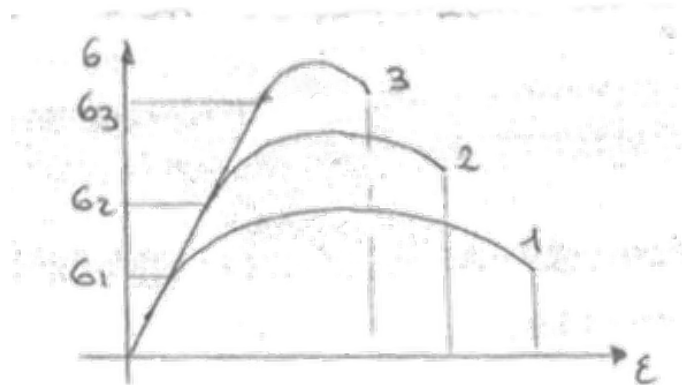
E (modulo di Young) non cambia è solo funzione del tipo di legame.

1) Materiale non trattato

2) \uparrow Raff SS $\rightarrow \uparrow \sigma, \downarrow$ duttilita (\downarrow campo plastico)

3) $\uparrow \uparrow$ Raff SS $\rightarrow \uparrow \uparrow \sigma, \downarrow \downarrow$ duttilita ($\downarrow \downarrow$ campo plastico)

$$E_1 = E_2 = E_3$$



Rafforzamento per dispersione e precipitazione di una seconda fase

• Dispersione ($\uparrow f$)

– Si procede includendo in un metallo fuso delle particelle solide

• Rafforzamento da bordi di grano

– I vari cristalli hanno medesima struttura ma sono ruotati tra loro (policristallini)

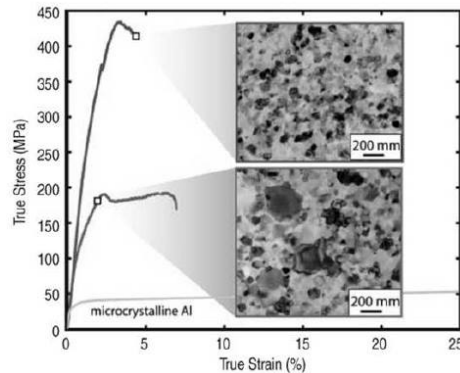
– Il salto energetico fra due grani e' troppo elevato → la dislocazione si concentra

– il BDG nel reticolo deformato rallenta la dislocazione di un $\tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}}$ **Legge di Hall-**

Petch

ove – k_p = costante di Petch – D = taglia del grano, dimensione

τ_{gb} e' molto più grande per materiali micro-nano cristallini



Processo di laminazione a freddo e relativo incrudimento (

$T \approx 0,3 - 0,5 T_f, T < T_{ricrist.}$)

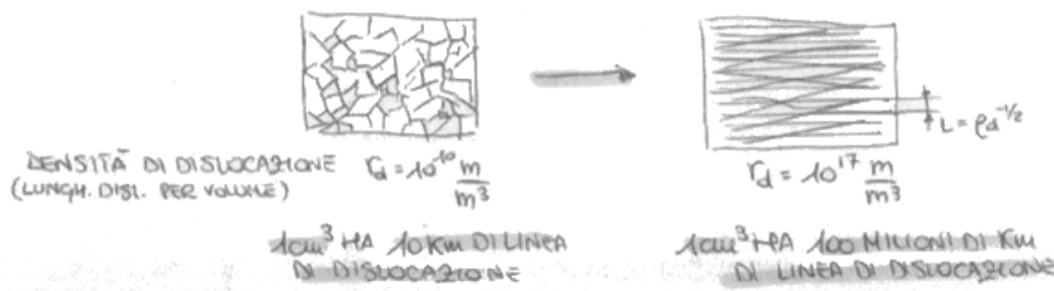
– Passando fra due rulli si verifica un allungamento dei grani tutti nella stessa direzione

– E' una distorsione indotta dalla deformazione plastica → rendo il policristallino anisotropo.

Es produzione lamina di acciaio – Una volta solidificati i blocchi (a $T > T_{amb}$) si sono formati i grani.

– Applico sollecitazione (rulli) e deformato plasticamente (regolazione a freddo)

– Si lavora a $T > T_{amb}$ perché' servono sollecitazioni minori a parita di deformazione voluta.



– Le infinite dislocazioni che si creano si compenetrano ostacolando mutualmente (con nuovi semipiani).

Appunti Scienza e Tecnologia dei Materiali (corso Lombardi)

Federico Cerruti

Lavorazione plastica a caldo

Avviene a $T > T_{ricrist}$, come a freddo si passa fra 2 rulli

•non creo dislocazioni ma nuovi grani che poi ricristallizzano.

Il rafforzamento avviene dunque per BDG una volta accresciuti (come prima per diminuzione della sezione)

giunge a rottura. → Nel campo elastico, Condon Morse verso dx, $a > a_0$ $E > E_{min}$.

Quando cesso lo sforzo (lo annullo o si rompe il provino) si torna sempre ad a-a₀, E
L'area tratteggiata e' l'energia elastica che si recupera.

L'area sottesa dalla curva e' la tenacità + Energia di Rottura Necessaria (inclusa la parte tratteggiata)

$$dw = \frac{fdL}{V} = \frac{fdL}{A_0 L_0} = \sigma * d\epsilon \quad (A_0 L_0 \text{ dimensioni } t=0 \text{ provino})$$

$$\int dw = \int_0^{\sigma_R} \frac{\sigma}{E} d\sigma \rightarrow W = \frac{\sigma_R^2}{2E} \quad (\text{con } \sigma_y \text{ e' l'energia elastica recuperata})$$

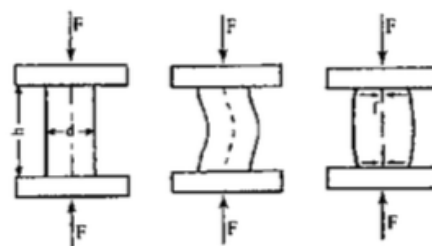
N.B. Resistenza a Rottura= Energia per avere Def. Elastica → Plastica → Rottura

N.B. Resistenza a rottura e limite elastico / di snervamento coincidono per un materiale fragile.

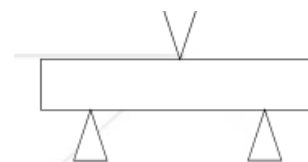
Ripasso nomenclatura

- Resistenza → σ_{el} o σ_y ; $\sigma_{0,2}$; σ_R
- Rigidezza → Modulo elastico E, opposizione +/- evidente all'allungamento.
- Duttilità → ϵ_R, S_R ; e' inversamente proporzionale alla rigidezza ($\uparrow \epsilon_R \rightarrow \downarrow E$ e VV)
- Tenacità → Area sottesa, Energia necessaria per rompere il provino.

- Metalli a compressione , provini cubici o cilindrici a facce perfettamente piane e parallele.



- Prova a Flessione (a 3 o 4 punti) contemporaneamente trazione e compressione



La Tenacità si misura tramite due metodi che sono chiamate

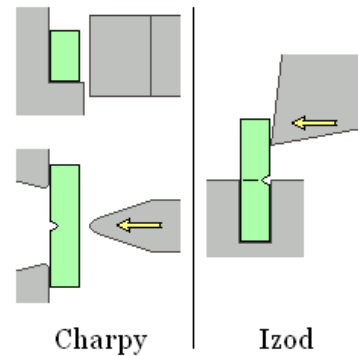
Prova di Resilienza, misurano la capacità di sopportare carichi impulsivi:

– Trazione su Provino con difetto di forma e geometria definita

– Pendolo di Charpy (2 prese)

(a 1 presa si chiama Prova d'urto di Izod)

Si fa un taglio nel provino per non disperdere energia cinetica in deformazione elastica, la cricca prosegue direttamente e tutta l'energia passa a rottura.



Meccanismo di Frattura

• Materiali fragili (Trazione)

– La cricca si espande e la rottura lascia due superfici speculari e nettamente divise.

• Materiali duttili e tenaci (Trazione)

– La cricca non si espande e c'è deformazione plasticamente

– All'aumentare di σ o f le inclusioni si espandono.

– Le inclusioni si distaccano dalla matrice inducendo la nucleazione di cavità

– Le superfici di separazione sono frastagliate

• Transizione Duttile-Fragile (ductile-brittle DBTT)

– Alcuni materiali hanno trasformazione duttile-fragile a Temperature specifiche.

Raffreddo → rallento atomi → fragilità aumenta

Es negli acciai il carbonio influisce con queste dinamiche:

Aumentando la percentuale di carbonio negli acciai aumento la sensibilità alla transizione, aumenta di molto la resistenza allo scorrimento → fragile.

Inoltre strutture CCC hanno solo comportamento fragile (non esistono piani di scorrimento), FCC sono sempre duttili (meno sensibili a DBTT).

$$\sigma_{locale} = \sigma_{nom} \left(1 + Y \sqrt{\frac{\pi c}{2\pi r}} \right)$$



Per $r \ll c$ (quindi $\sigma_{loc} \gg \sigma_{nom}$) $\sigma_{loc} = Y \frac{\sigma \sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}$

Se localmente $\sigma_{loc} >$ resistenza ideale, la cricca avanza ($\sigma_{loc} > \sigma_R$).

Il fattore critico di sollecitazione in modo 1 permette di riconoscere la tenacità

$$k_I = Y \sigma \sqrt{\pi c} \quad \text{con} \quad [k_I] = [MPa m^{1/2}]$$

Si definisce σ^* la sollecitazione nominale critica che induce $\sigma_{loc} = \sigma_R$

Introduco il fattore critico di sollecitazione in modo 1

– **Tenacità a frattura** (o Fattore critico di intensità di sollecitazione)

$$k_{IC} = Y \sigma^* \sqrt{\pi c} \approx \sigma^* \sqrt{\pi c} \quad (Y \text{ costante geometrica } \sim 1)$$

Le proprietà di un materiale contenente cricche $f(E, G_c)$ ove G_c e' definita come tenacità.

$k_{IC} \uparrow \rightarrow \uparrow$ tolleranza al difetto

N.B. Due esempi su due provini A e B

• A parità di dimensione di cricca A e' più tenace

$$\rightarrow (k_{ic})_A > (k_{ic})_B \quad \text{con} \quad c_A = c_B \quad \rightarrow \quad \sigma^*_A > \sigma^*_B$$

• A pari sforzo A sopporta cricche molto maggiori prima di rompersi

$$\rightarrow (k_{ic})_A > (k_{ic})_B \quad \text{con} \quad \sigma^*_A = \sigma^*_B \quad \rightarrow \quad c_A > c_B$$

Teoria di Griffith per i materiali fragili

Noti num. atomi per unità di superficie, superficie e tensione superficiale γ

• Posso calcolare l'energia persa nel corso dell'apertura delle cricche.

• Una frattura genera due nuovi superfici

per qualsiasi superficie esiste un surplus di energia per la tensione superficiale γ

γ : lavoro da impiegare per alimentare unitariamente la superficie [γ] = [J m⁻²]

Tenacità pari alle 2 tensioni superficiali $\rightarrow G_c = 2\gamma$ (SOLO per materiali fragili)

Sappiamo che tutto il materiale assorbe energia elastica $W = \frac{\sigma^2}{2E}$

– Cricca avanza di δ_c con una nuova area semicircolare $A_{sc} = \frac{\pi \delta_c^2}{2}$

– Viene liberata (persa) energia pari a $W_c = \left(\frac{\sigma^2}{2E}\right) \left(\frac{\pi c^2}{2}\right)$

\rightarrow ciò crea nuova superficie con energia pari a $G_c * \delta_c$

Allora $dW = \frac{\sigma^2 \pi c}{2E} \delta_c = G_c \delta_c \rightarrow G_c = \frac{\sigma^2 \pi c}{2E} = \frac{K_{IC}^2}{2E}$ (ricordo $k_{ic} = \sigma^* \sqrt{\pi c}$)

Visione per componente : $k_{ic} = \sigma^* \sqrt{\pi c}$ (microscopico)

Visione globale del materiale: $k_{ic} = \sqrt{E G_c}$ (macroscopico) con fattore correttivo 1/2 .

Fatica ad alti e bassi cicli

Pur avendo una $\sigma < \sigma_y$, ciclicamente si raggiungono delle σ_{max} e σ_{min} che potrebbero aumentare.

- Fatiche ad alti cicli con carichi $\sigma < \sigma_y$ (vitalità elevata)
- Fatiche a bassi cicli con $\sigma_y < \sigma < \sigma_R$ (σ più alte ma per meno tempo)
- Ingegneristicamente si osano gli alti cicli (si lavora sempre in campo elastico)

Fatica ad alti Cicli.

L'innesco e' una zona del reticolo non omogenea che oscillando genera il problema.

Esistono due approcci.

- Controllo il pezzo finché non si crea una cricca.
- So che esiste la cricca e ne valuto la propagazione.

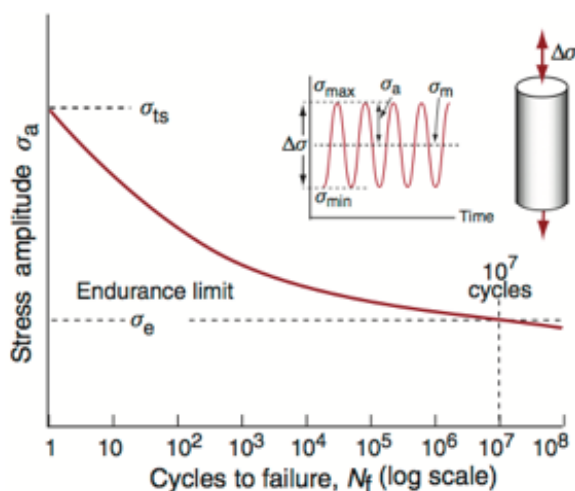
Immagino che il difetto esista, definisco dei **Parametri** per valutarne la propagazione.

- $\sigma_M = \frac{1}{2}(\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN})$ Sollecitazione Media
- $\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{min}}{2}$ Ampiezza di sollecitazione (S)
- $R = \frac{\sigma_{MAX}}{\sigma_{MIN}}$ Fattore di bilanciamento.

N = numero di cicli a rottura (max 10^7 se riduco il carico)

• Curve $\sigma - N$ di Vohler

Se $\sigma < \sigma_e$ (Endurance Limit, Limite a Fatica) non c'e' mai rottura prima di 10^7 cicli.



Pongo $C \approx 0,5$, esponente di Coffin

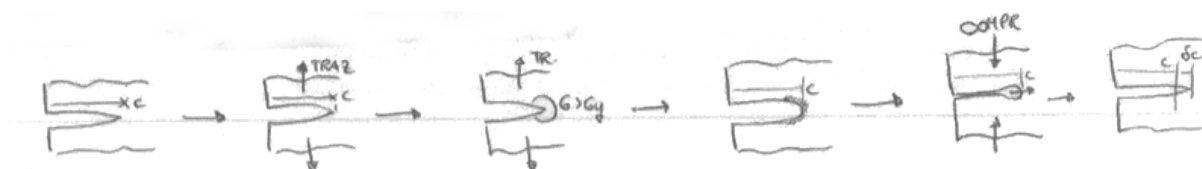
$$(\Delta \epsilon)_{plastico} = \frac{C_2}{N_f^c} \rightarrow \log \Delta \epsilon = \log C_2 - c \log N_f \quad \text{in campo plastico}$$

La σ_{loc} può essere superiore a σ_y anche se $\sigma_{nom} < \sigma_y$

Propagazione della cricca

Alla punta della cricca la zona diviene plastica

Trazione + Compressione fanno avanzare la cricca



La Propagazione a Fatica lascia delle striature caratteristiche

- Per qualsiasi striatura c'è stato un ciclo di carica-scarica

Appunti Scienza e Tecnologia dei Materiali (corso Lombardi)

Federico Cerruti

con $k_{MAX} = k_{th}$ il componente si rompe in un unico ciclo

Meccanismi di Prevenzione – Rafforzamento della propagazione della cricca

So che le cricche aumentano in trazione

• Pallinatura : Bombardo con micro-urti la superficie → creo compressione non distruttiva. In questo modo richiudo le cricche e riduco l'effetto delle linee di forza.

Materiali Polimerici

Formati da una serie di gruppi funzionali riconoscibili (monomeri)

Solitamente legati C-H. A volte con anelli benzenici, O, F,N, doppi o raramente tripli legami

– Tipologie di polimeri

•TP, duttili

– non reticolati con legami deboli (completamente amorfi o semi-cristallini)

– Basse T_f → flessibili ma resistenti a T_{amb}

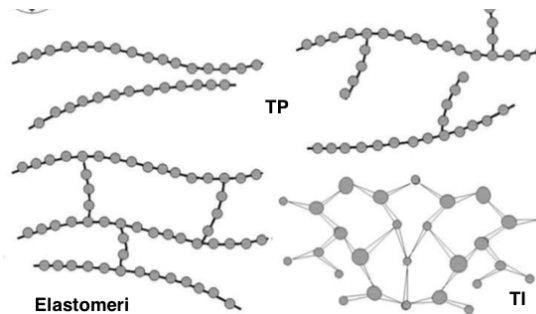
– Riscaldati si deformano plasticamente per assumere nuove forme.

L'addizione può avvenire, a seconda del grado di polimerizzazione, con

- Catene corte (libere)
- Catene lunghe (libere)

A seconda della disposizione delle unità ripetenti

- Lineare (una direzione), a volte TP
- Ramificata (più direzioni) tipico TP



- Reticolata (più macromolecole lineari con qualche interconnessione forte fra loro), tipico TI e elastomeri (legami covalenti trasversali)

TermoIndurenti – Processo di Reticolazione

(processo spontaneo non modificabile)

Formazione dei legami trasversali

- Per $T > T_g$ si possono formare dei ponti sui “colli” (attack points)
- A T_{amb} i ponti induriscono e si forma la reticolazione
- Con una disposizione quasi cristallina sono fragili

Elastomeri o Gomme – Processo di formatura

(polimeri amorfi con bassa reticolazione → facilmente deformabili)

- Vulcanizzazione → Creo legami trasversali (minori dei TI) → aumento il richiamo elastico

Temperatura di transizione Vetrosa

Cristallinità : rapporto percentuale tra peso polimero cristallino e totale

Un polimero cristallino e' molto ripiegato. Un semi-cristallino presenta qualche legame trasversale. Amorfo

Solitamente con la solidificazione ho prodotti semi-cristallini o amorfi.

La cristallinità diminuisce con la presenza di :

- Sostituenti ingombranti (Fluoro, Cloro etc) che rendono difficile il

$T_g < T < T_f$ Gomma ~ Fluido (rammollimento)

$T > T_f$ Fluido Viscoso

– Da cosa dipende la T_g di un polimero?

• Flessibilità e geometria della macromolecola

→ cresce la mobilità interna diminuiscono gli intrecci e quindi la T_g

• Tipo e forza dei legami → Aumentando le forze inter-molecolari diminuisce la mobilità e aumenta la T_g

• Percentuale di Cristallinità → aumentando la cristallinità diminuisce la mobilità e aumento la T_g

• Massa molecolare → maggiore massa molecolare comporta maggiore reticolazione e lunghezza catene quindi minore mobilità e maggiore T_g

Relazione $T_{Amb} - T_g$

– Polimero Amorfo

• $T_g < T_{Amb}$ Gomme con bassissime proprietà meccaniche

• $T_g > T_{Amb}$ Stato vetroso rigido ma fragile

– Polimero semi-cristallino

• $T_g < T_{Amb}$ Parti cristalline rigide e resistenti → complessivamente rigidi e tenaci

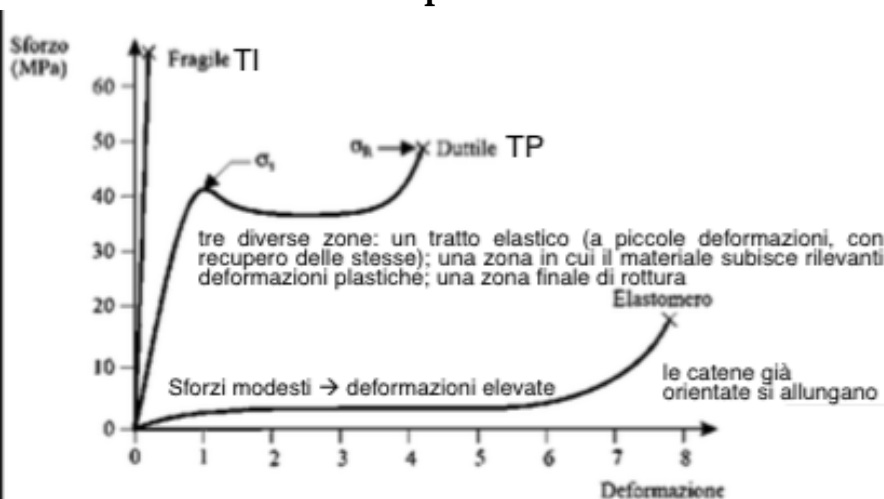
• $T_g > T_{Amb}$ Solidi rigidi ma fragili.

Comportamento meccanico dei materiali Polimerici

Tutti i polimeri variano proprietà in base alla temperatura

I TI sono fragili → Molto reticolati non hanno scorrimenti relativi

I TP hanno σ_y e σ_R ma la forma della curva dipende da T



Duttilità)

Dopo la σ_y si nota una strizione come nei metalli

- Ciò e' dovuto all'allineamento delle macromolecole (stiramento o trafilatura)

I grovigli si distendono generando strizione dal centro ← irrecuperabile.

Se e' semi-cristallino si orientano prima le parti amorfe.

Nota dai grafici che $\sigma > \sigma_{\text{sigma}}$ necessario al trafilamento.

Mantenere attivo lo stiramento e' più oneroso energeticamente che avviarlo.

I polimeri stirati sono ~ 8 volte più resistenti e rigidi ma con geometria limitata (bi-trazione)

Fenomeno del crazing

Punti di rottura (~cricche) nei polimeri a trazione.

- Non e' una cricca completa sono regioni fessurate divise da filamenti del polimero.

- I crazes diffondono la luce (zone diventano binacastre)

- N.B. con I crazes posso ancora deformare plasticamente a compressione tramite bande di taglio.

Comportamento meccanico dei **TermoIndurenti**

Il grado di reticolazione e la T modificano E

Per $T < T_g$ E non variabili

$T \geq T_g$ E varia in modo evidente con la Reticolazione

N.B. T_g aumenta di poco all'aumentare della reticolazione (legami forti)

Posso controllare la rigidezza, E non cambia con T per alta percentuale di reticolazione.

Solitamente i TI sono usati per $T < T_g$ (~150gradi)

Fino a 30-40° C → Elastico Segue Hooke

30° < T < 100° → Flebili Deviazioni da linearità

T > 100° C Duttilità Contenute

Visco-elasticità e visco-plasticità nei TermoIndurenti

Appunti Scienza e Tecnologia dei Materiali (corso Lombardi)

Federico Cerruti

– **Tre Step nel Processo produttivo**

1) Produzione di polveri ceramiche

- Alta purezza, polveri con composizione chimica omogenea
- Distribuzione granulometrica

2) Formatura

• Si conferisce all'impasto una forma con una pressione tale da deformarlo plasticamente, ottenendo il crudo (dotato di resistenza tale da sopportare il suo peso ma caratterizzato solo da legami deboli)

3) Sinterizzazione

• Passaggio da crudo a oggetto monolitico con forti legami chimici (tramite cottura di sinterizzazione)

Analizziamo Formatura e Sinterizzazione

Tipologie di Formatura (diversi tenori d'acqua)

– Per **Pressatura** (5-7% H_2O)

Per paste poco plastiche → le particelle si compattano con compressioni meccaniche superiori anche a 50 MPa. (in 2 tempi per liberare l'aria catturata). Maggiore e' la compattazione maggiore e' la resistenza meccanica.

– Per **Estrusione** (15-20% H_2O)

Caratteristiche plastiche maggiori, la percentuale di acqua consente di tagliare i prodotti. L'avvitamento sul profilo a vite senza fine permette di ottenere miscele migliori di pasta più riempitiva.

– Per **Colaggio ~ slip casting** (35-40% H_2O) alta porosità, tecnica usata per forme complesse.

In stampo di gesso → assorbe H_2O ed essicca il profilo (l'eccesso fatto fuoriuscire → “barbottina”)

Plasticizzante → natura omogenea ad H_2O , aiuta l'essiccazione coerente

Disperdente → evita l'aggregazione eccessiva sullo stampo crudo in essiccazione

i Pori lasciati dall'acqua vengono riempiti da ~ polimero (5.7% Volume, evita Cricche, difetti).

Questo e' il controllo della distribuzione granulometrica

Materiali e Calore

Oltre a sollecitazioni con forze un materiale può essere sollecitato con il calore.

Dilatazione Termica

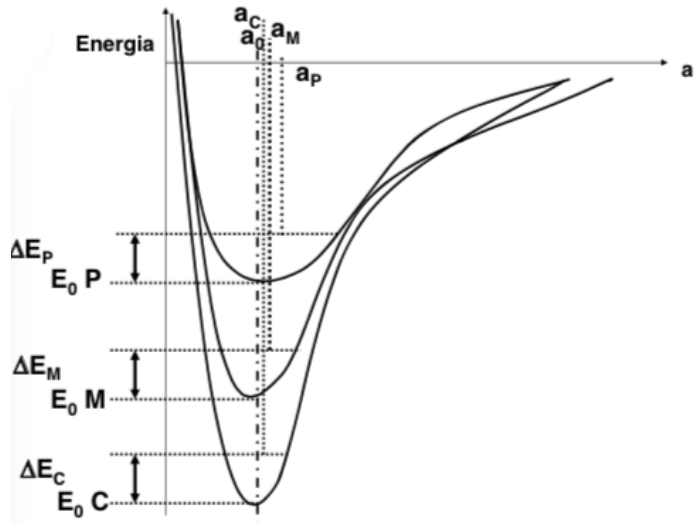
Fornendo calore pongo $E > E_0$ (stabilità)

• Gli atomi vibrano fra due posizioni di dilatazione a_{min} e a_{max}

– Per qualsiasi temperatura esiste una E correlata

– Per qualsiasi temperatura esiste una dilatazione a_{min} e una $a_{max} \rightarrow a_M$ (media)

– La a_M media aumenta l'aumentare della temperatura



Dilatazione termica nei diversi materiali

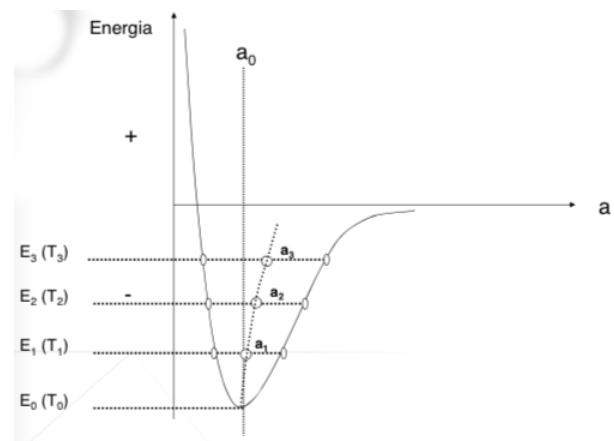
C-M dipendono dal tipo di legame

Forniscono lo stesso ΔE (da T) e noto come varia la posizione media:

Rigidezza : $E_c \gg E_M \gg E_P$

Dilatazione $a_{MP} > a_{MM} > a_{MC}$

(Per avere le stesse dilatazioni devo fornire $\neq \Delta E$)



Coefficiente di dilatazione termica lineare α (permette di valutare quanto T influisca sui materiali)

Materiali lungo L_0

Fornendo Calore \rightarrow Diventa $L_1 > L_0$

Materiali ad alte temperature operative

Analizzo i materiali cristallini a T diverse da quella ambiente

Avrò diverse δ ed E (Young). Le variazioni possono essere lineari o meno.

I cristallini hanno un'unica $T_f = T_{solid}$.

Scorrimento viscoso a caldo (Creep)

Se applico uno sforzo σ^* a T_{amb} avrò una deformazione ϵ^* . In campo elastico tolto lo sforzo la deformazione si annulla. A temperature molto elevate la stessa σ^* (anche se $\sigma^* \ll \sigma_y$) può indurre rottura.

- Mantenendo per t elevate il carico si induce uno scorrimento viscoso (o Creep)
- Ci sarà una deformazione lenta e continua nel tempo.

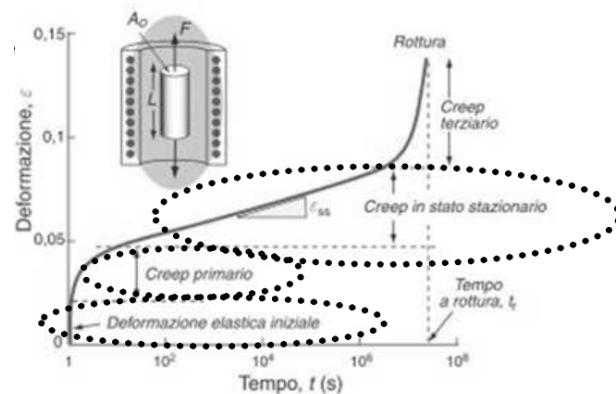
Fattore fondamentale : Tempo di Carico

– Metalli Per temperatura operativa $T_{operativa} \approx 0,5 T_f$

– Ceramiche $T_{operativa} \approx 0,7 T_f$

Applicando un carico costante $\sigma < \sigma_y$ noto una deformazione costante fino a rottura

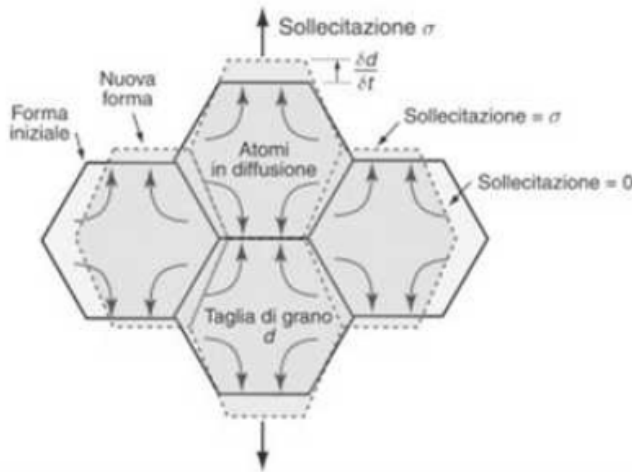
- 1) Deformazione Elastica
- 2) Creep primario (t applicazione ~ qualche minuto)
- 3) Creep stazionario o secondario
- 4) Creep terziario



Se annullo σ^* prima della rottura avrò una deformazione residua permanente.

N.B. E' vero che i ceramici hanno maggiore resistenza ad alte temperature rispetto agli altri materiali ma anche i ceramici subiscono il Creep.

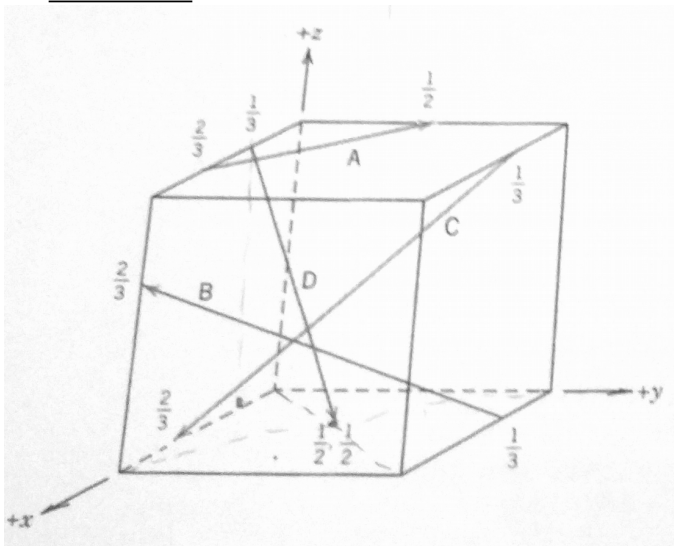
Nei policristallini ci sono i BDG , nei BDG ci sono le vacanze . Se sottopongo a alte temperature il materiale . a trazione, c'e' uno stretching per diffusione di atomi nelle vacanze, aumentando il numero di grani → maggiore creep → maggiore allungamento nella direzione di sollecitazione.



Indici di Miller

- La posizione degli atomi si indica tramite coordinate in parentesi tonde (a,b,c)
- Le direzioni cristallografiche si indicano invece all'interno di parentesi graffe e in caso di termini negativi si usa una sbarretta sopra il termine. Es $[ab\bar{c}]$
- Per i piani si usa la notazione a parentesi tonde senza virgole. (abc)

Direzioni

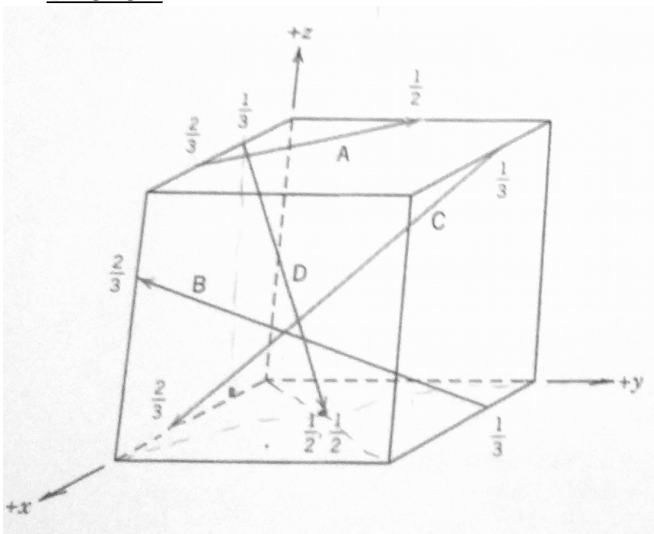


Date le coordinate della testa e della coda del vettore direzione è sufficiente sottrarre alla testa la coda e moltiplicare per un coefficiente tale da normalizzare a numeri interi le frazioni.

Direzione	Testa	Coda	Testa - Coda	Coeff	Indice
A	$(0, \frac{1}{2}, 1)$	$(\frac{2}{3}, 0, 1)$	$(-\frac{2}{3}, \frac{1}{2}, 0)$	6	$[\bar{4}30]$
B	$(1, 0, \frac{2}{3})$	$(\frac{1}{3}, 1, 0)$	$(-\frac{2}{3}, -1, \frac{2}{3})$	3	$[\bar{2}\bar{3}2]$
C	$(\frac{2}{3}, 0, 0)$	$(\frac{1}{3}, 1, 1)$	$(\frac{1}{3}, -1, -1)$	3	$[1\bar{3}\bar{3}]$
D	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$	$(\frac{1}{3}, 0, 1)$	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{2}, -1)$	6	$[13\bar{6}]$

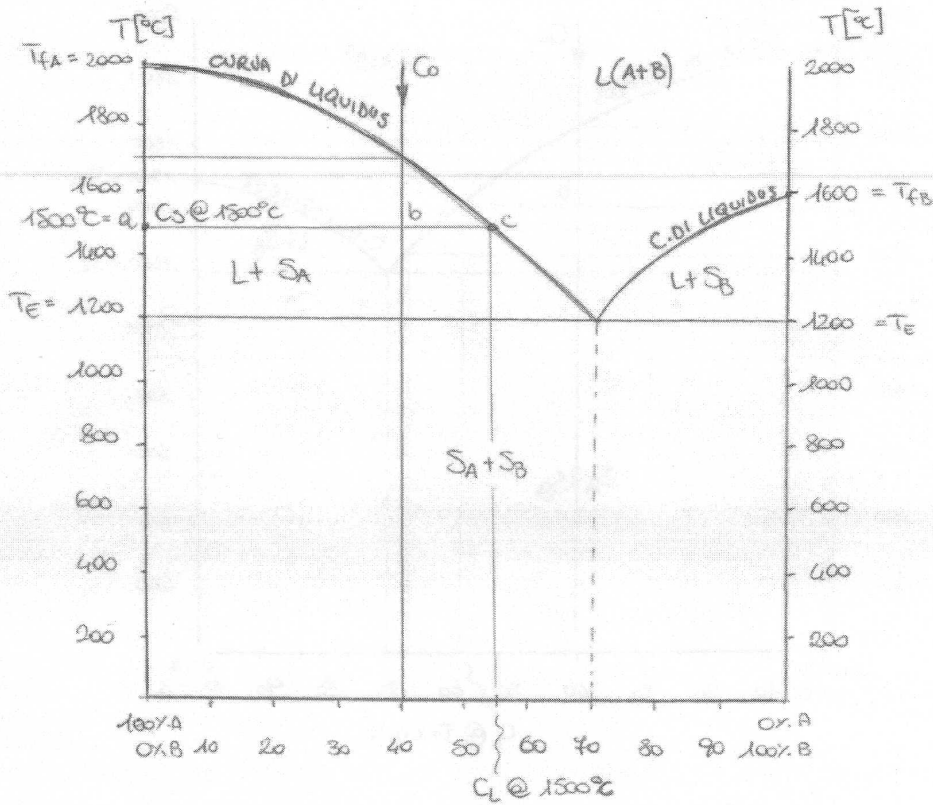
- La posizione degli atomi si indica tramite coordinate in parentesi tonde (a,b,c)
- Le direzioni cristallografiche si indicano invece all'interno di parentesi graffe e in caso di termini negativi si usa una sbarretta sopra il termine. Es $[a\bar{b}c]$
- Per i piani si usa la notazione a parentesi tonde senza virgole. $(a\ b\ c)$

Direzioni



Date le coordinate della testa e della coda del vettore direzione è sufficiente sottrarre alla testa la coda e moltiplicare per un coefficiente tale da normalizzare a numeri interi le frazioni.

Direzione	Testa	Coda	Testa - Coda	Coeff	Indice
A	$(0, \frac{1}{2}, 1)$	$(\frac{2}{3}, 0, 1)$	$(-\frac{2}{3}, \frac{1}{2}, 0)$	6	$[\bar{4}30]$
B	$(1, 0, \frac{2}{3})$	$(\frac{1}{3}, 1, 0)$	$(-\frac{2}{3}, -1, \frac{2}{3})$	3	$[\bar{2}\bar{3}2]$
C	$(\frac{2}{3}, 0, 0)$	$(\frac{1}{3}, 1, 1)$	$(\frac{1}{3}, -1, -1)$	3	$[1\bar{3}\bar{3}]$
D	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$	$(\frac{1}{3}, 0, 1)$	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{2}, -1)$	6	$[13\bar{6}]$



$T_{FA} = 2000^{\circ}\text{C}$
 $T_{FB} = 1600^{\circ}\text{C}$
 $T_E = 1200^{\circ}\text{C}$

Raffreddamento alla $C_0 = 40\%B, 60\%A$

1) $T = 1800^{\circ}\text{C}$ il sistema è completamente liquido.

$C_L = C_0 = 40\%B, 60\%A$



2) $T \approx 1700^{\circ}\text{C}$ il sistema forma il primo grano solido di A, S_A .

Il solido A è completamente formato da A $\Rightarrow C_S = 100\%A$

Il liquido si arricchisce progressivamente di B man mano che si prosegue nel raffreddamento

$C_L = C_0 = 40\%B, 60\%A$



3) $T = 1500^{\circ}\text{C}$ il sistema si arricchisce di grani di A.

Il solido continua ad avere $C_S = 100\%A$

Il liquido ha $C_L = 55\%B, 45\%A$

Secondo la regola delle leve, $m_L = \frac{ab}{ac} \approx \frac{4}{5,5} = \frac{8}{11}$

$m_S = \frac{bc}{ac} = \frac{1,5}{5,5} = \frac{3}{11}$



4) $T = T_E = 1200^{\circ}\text{C}$ ha luogo la trasformazione eutettica.

Tutti i grani solido di A precedentemente formati restano tali.

Il liquido restante solidifica in un solido A+B a lamelle

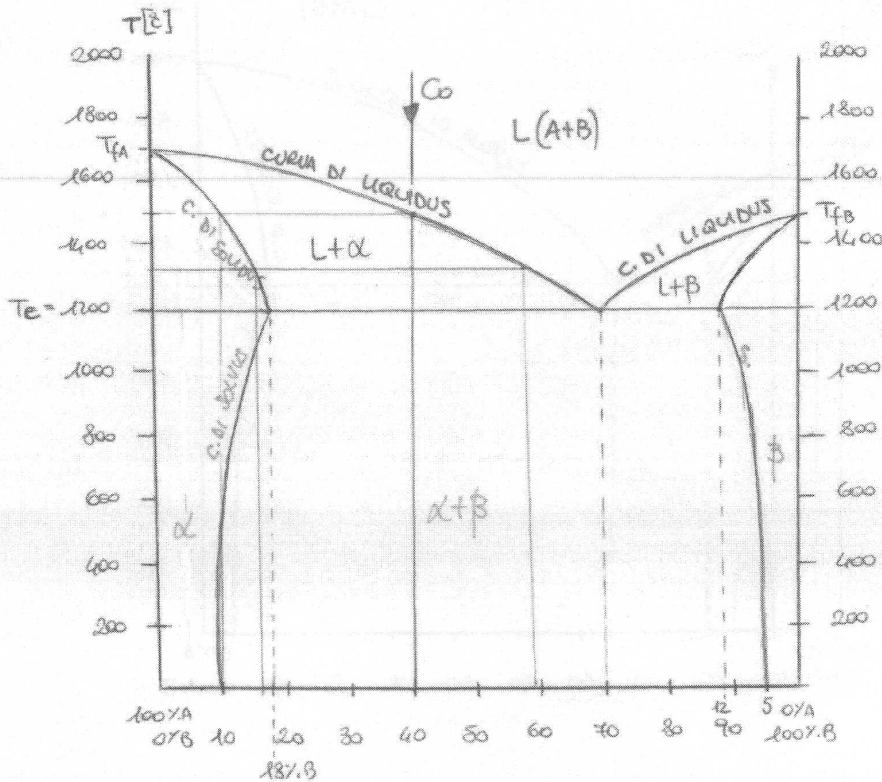
$C_S = C_0$



A B SOSTITUZIONALE

5) $T_{amb} < T < T_E$ non cambia la microstruttura né la composizione % del solido

Ricordo che il 60% di A è composto sia dai soli grani di A sia da A contenuto nelle lamelle.

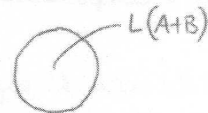


$T_{FA} = 1700^{\circ}\text{C}$
 $T_{FB} = 1500^{\circ}\text{C}$
 $T_E = 1200^{\circ}\text{C}$

• Raffreddamento a $C_0 = 40\% \text{ B}, 60\% \text{ A}$

1) $T = 1800^{\circ}\text{C}$

Tutto il sistema è liquido con composizione $C_L = C_0$



2) $T \approx 1500^{\circ}\text{C}$ incrociando la curva di liquidus

Si forma il primo granello solido α chiamato grano primario (α è la soluzione primaria)

Da ora in poi la C_S segue la curva di solidus e la C_L quella di liquidus.

$C_S = 10\% \text{ B}, 90\% \text{ A}$; $C_L = C_0 = 40\% \text{ B}, 60\% \text{ A}$



3) $T \approx 1300^{\circ}\text{C}$, continuando a raffreddare si formano sempre più grani di α .

La composizione di solido si arricchisce in B seguendo la curva di solidus.

La composizione di liquido si arricchisce in B seguendo la curva di liquidus e tendendo a $C_E = 70\% \text{ B}, 30\% \text{ A}$

$C_S = 16\% \text{ B}, 84\% \text{ A}$; $C_L = 59\% \text{ B}, 41\% \text{ A}$



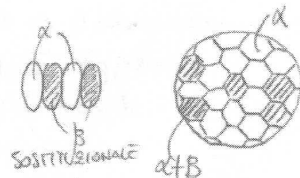
4) $T = T_E = 1200^{\circ}\text{C}$, avviene la trasformazione eutetica.

Tutto il liquido restante si trasforma in grani di $\alpha + \beta$ a lamelle

La C_S corrisponde al massimo di solubilità di B in A a $T = T_E$

La $C_L = C_E = 70\% \text{ B}, 30\% \text{ A}$; $C_S = 18\% \text{ B}, 82\% \text{ A}$

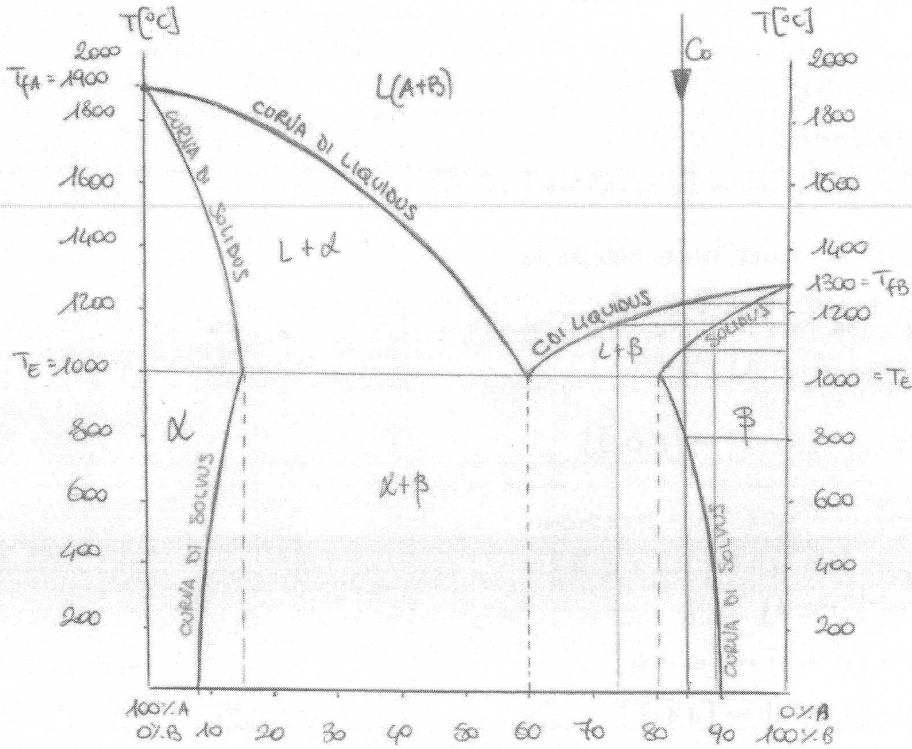
Tutti i grani precedentemente formati di α restano tali.



5) PER $T_{\text{omb}} < T_E = 1200^{\circ}\text{C}$ la composizione microstrutturale non varia.

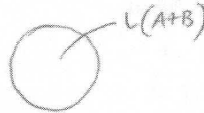
L'unica variabile è la composizione di α e di β , che segue le linee di solus

C_α cala dal 18% al 10% di B in A, C_β si arricchisce di B dall'88% al 95% di B in A.

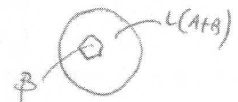


$T_{FA} = 1900^{\circ}\text{C}$
 $T_{FB} = 1300^{\circ}\text{C}$
 $T_E = 1000^{\circ}\text{C}$
 $C_E = 60\%B, 40\%A$
 $C_{\alpha^1} = 15\%A, 85\%B, C_{\alpha} = 8\%A, 92\%B$
 $C_{\beta^1} = 80\%B, 20\%A, C_{\beta} = 90\%B, 10\%A$
 • Raffreddamento a $C_0 = 85\%B, 15\%A$

1) $T = 1350^{\circ}\text{C}$ il sistema è completamente liquido
 $C_L = C_0 = 85\%B, 15\%A$



2) $T \approx 1250^{\circ}\text{C}$, incrocio la curva di liquidus. Si forma il primo granello di β .
 La soluzione β è cosiddetta primaria.

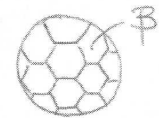


Dopo di poi, C_L segue la curva di solidus mentre C_{β} quella di liquidus, al proseguire del raffreddamento.

3) $T \approx 1150^{\circ}\text{C}$, C_L si arricchisce di A, C_{β} si arricchisce di B
 il sistema si arricchisce di grani solidi di β
 $C_L = 75\%B, 25\%A$
 $C_{\beta} = 89\%B, 11\%A$



4) $T = 1000^{\circ}\text{C}$, incrocio la curva di solidus. Tutto il liquido solidifica in grani β .
 $C_{\beta} = 85\%B, 15\%A$. Fino all'incrocio con la curva di solidus, il sistema non modifica la sua microstruttura ma varia la sua C_{β} fino ad un massimo di solubilità di A in B a $T = T_E$
 con $C_{\beta} = C_{\beta^1} = 80\%B, 20\%A$



5) $T \approx 800^{\circ}\text{C}$, incrocio solus. Avendo già raggiunto il massimo di solubilità, si formano dei precipitati α secondario. $C_{\beta} = 85\%B, 15\%A$. Raffreddando fino a T_{min} si arriva a $C_{\beta} = C_{\beta}$



- a) di Frenkel (rari, un catione si sovrappone ad un altro lasciando una vacanza)
- b) di Schottky (manca un anione)

• Descrivere soluzione solida sostituzionale e quali siano le necessità per cui avvenga, effetti sul reticolo.

Il soluto può incorporarsi nel reticolo cristallino del solvente sostituzionalmente, sostituendo una particella del solvente nel reticolo se rispetta le regole di Hume-Rothery:

- raggi atomici simili (15% o meno di differenza)
- stessa struttura cristallina
- elettronegatività simili
- valenza simile.

La sostituzione crea un insieme di tensioni localizzate che diminuiscono la duttilità, sfavorendo il moto delle dislocazioni.

• Meccanismi di rafforzamento,

f = contributo degli ostacoli alla resistenza. τ contributo allo sforzo di taglio necessario al moto dislocativo

Gli ostacoli generati esercitano una forza di bloccaggio (pinning) che causa la necessità di un ulteriore contributo di τ per superare la resistenza del reticolo e far muovere le dislocazioni.

– Soluzione solida (f_{ss})

Nei processi di alligazione, in una soluzione solida si crea un incremento allo sforzo necessario a muovere le dislocazioni pari a $\tau_{ss} = \alpha * E * \sqrt{c}$. α è detta costante di mismatch e descrive quanto il soluto distorce il reticolo del solvente.

– Precipitazione o dispersione (f_{ppt})

Disperdendo particelle altofondenti in un metallo fuso o controllando la precipitazione di un soluto nel cristallo (vd precipitazioni carburi negli acciai) ottengo degli ostacoli al movimento delle dislocazioni che si allungano tra le particelle stesse.

La resistenza è pari a $f_{ppt} = 2 \frac{T}{L}$

– Incrudimento (work hardening) f_{wh}

Lavorando a freddo un metallo (0.3/ 0.5 T_f) per deformazione plastica vi è un accumulo di densità di dislocazioni ρ_d . L'aumento di ρ_d provoca un ostacolo al movimento di dislocazioni perpendicolari con

una forza di bloccaggio il cui contributo è dato da $\tau_{wh} = \frac{E * b * \sqrt{\rho_d}}{2}$

Lavorare un metallo incrudito può portare a rottura, tramite ricottura (trattamento termico per ridurre le dislocazioni.

– Per taglia di grano, grain boundary f_{gb}

I metalli sono policristallini, costituiti da piccoli cristalli orientati casualmente (grani) che si collegano in corrispondenza dei bordi. I bordi ostacolano il moto dislocativo.

Questo è un ulteriore contributo alla resistenza, $\tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}}$

k_p = costante di Petch; D taglia del grano

Effetto HP: EC > CCC > CFC

τ_{gb} diventa significativo solo per materiali microcristallini o nanocristallini.

• Spiegare i fenomeni microscopici che inducono la duttilità nei polimeri.

Se $T < 0.75 T_g$ i polimeri sono fragili, sopra tale temperatura sono plastici. Sottoposti a trazione le catene di molecole scivolano le une sulle altre in modo da allinearsi nella direzione di trazione, questo processo si dice stiramento (o trafilatura). A temperatura ambiente subiscono il fenomeno del crazing, piccole regioni fessurate si propagano.

• Polimeri sono rafforzati

– Impedendo lo scorrimento di segmenti delle loro catene molecolari:

torna sempre ad $\sigma - \sigma_0$, E

L'area tratteggiata e' l'energia elastica che si recupera.

L'area sottesa dalla curva e' la tenacità + Energia di Rottura Necessaria (inclusa la parte tratteggiata)

$$dW = \frac{f dL}{V} = \frac{f dL}{A_0 L_0} = \sigma * d\epsilon \quad (A_0 L_0 \text{ dimensioni } t=0 \text{ provino})$$

$$\int dW = \int_0^{\sigma_R} \frac{\sigma}{E} d\sigma \rightarrow W = \frac{\sigma_R^2}{2E} \quad (\text{con } \sigma_y \text{ e' l'energia elastica recuperata})$$

N.B. Resistenza a Rottura= Energia per avere Def. Elastica → Plastica → Rottura

N.B. Resistenza a rottura e limite elastico / di snervamento coincidono per un materiale fragile.

• Strizione a trazione di un metallo generico

Quando deformati al di là del loro limite elastico, la maggior parte dei materiali incrudisce, il che induce una ripresa dell'aumento dello sforzo per avere deformazioni crescenti, finché non si raggiunge un massimo, la resistenza a rottura (resistenza a trazione). Questo massimo è seguito, nella curva a trazione, da una deformazione non uniformemente localizzata (strizione) e dalla successiva rottura.

• Definire l'effetto di una fessurazione di un materiale sulla resistenza a fatica. (192) Meno generale e direttamente Griffith

Quanto un materiale non opera sotto carichi statici ma ciclici questo porta a danneggiamenti e in seguito a rotture. Il materiale non restituisce completamente l'energia elastica immagazzinata ma la dissipa via smorzamento, questo accumulo porta alla comparsa di fessure, fino a rottura.

Nei componenti non danneggiati gran parte della vita si consuma nella generazione della fessura (fatica controllata dall'innesco).

In caso di componenti già danneggiati la fatica e' controllata dalla propagazione della cricca. (approccio per componenti ad alto rischio)

Le imperfezioni di un componente, anche piccole, i fori per i rivetti, le variazioni brusche di sezione, le filettature, gli intagli, la stessa rugosità superficiale possono agire per promuovere l'innesco di cricca a fatica. Anche se il livello di sollecitazione remota è $< \sigma_y$, la σ localmente moltiplicata al vertice dell'imperfezione porta a deformazione plastica

→ moto dislocativo limitato al piccolo volume in prossimità della concentrazione di sollecitazione genera danneggiamento e sviluppo della cricca.

Per fatica ad alto numero di cicli, una volta che la cricca è presente, propaga

Durante la fase di trazione si forma una piccola zona plastica al vertice della cricca, che induce apertura e creazione di una nuova superficie.

Nella fase di compressione la cricca si richiude e la nuova superficie formata si ripiega inducendo un avanzamento graduale, ciclo dopo ciclo, della cricca

• Descrivere la relazione che correla lo sforzo nominale applicato ad un provino con la tensione locale massima che si sviluppa per la presenza di un difetto direzionale.

La teoria di Griffith ci dice come una fessurazione diminuisce la resistenza del materiale, diminuisce la sezione resistente e concentra la sollecitazione. Definiti i parametri per studiare la cricca ρ , raggio minimo di curvatura; c dimensione caratteristica del difetto se la sollecitazione nominale $\sigma_{NOM} = F/A_0$ con A_0 sezione resistente,

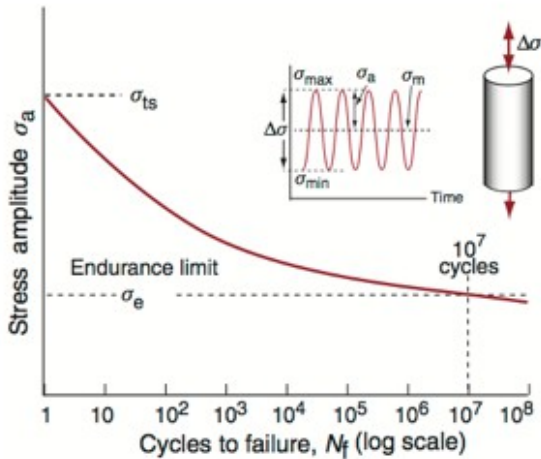
la sollecitazione massima all'apice della cricca sarà: $\sigma_{MAX} = \sigma_{NOM} [1 + \alpha \sqrt{(\frac{c}{\rho})}]$ ove α è 2 per trazione 1/2 per flessione.

Fattore di concentrazione della sollecitazione: $k_{SC} = \frac{\sigma_{MAX}}{\sigma_{NOM}} = [1 + \alpha \sqrt{(\frac{c}{\rho})}]$

$$(\Delta \epsilon)_{plastico} = \frac{C_2}{N_f^c} \rightarrow \log \Delta \epsilon = \log C_2 - c \log N_f \quad \text{in campo plastico}$$

• **Parametri importanti analisi cicli a fatica**

- **Sollecitazione media** $\sigma_m = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$
- **Ampiezza di sollecitazione** $S = \sigma_a = \Delta\sigma / 2$
- **Rapporto di sollecitazione** $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$



• **Curve di Vohler**

Nota S è possibile conoscere il numero di cicli di Rottura N tramite le curve di Vohler.

Se $\sigma < \sigma_e$ (Endurance Limit, Limite a Fatica) non c'è mai rottura prima di 10^7 cicli.

• **Immaginando un materiale sollecitato in maniera costante, descrivere cosa avviene all'aumentare della temperatura**

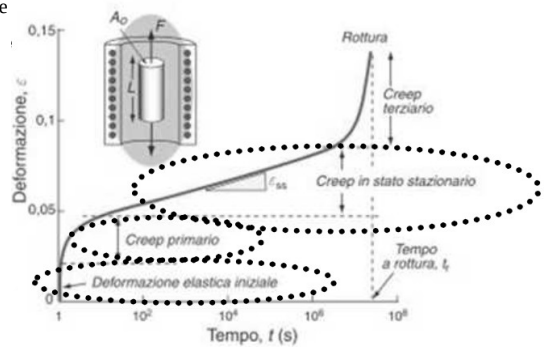
• **Si consideri un materiale sottoposto ad elevata temperatura costante nel tempo a sollecitazioni meccaniche crescenti. Descrivere il comportamento del materiale in relazione alle condizioni di esercizio.**

Se applico uno sforzo σ^* a T_{amb} avrò una deformazione ϵ^* . In campo elastico tolto lo sforzo la deformazione si annulla. A temperature molto elevate la stessa σ^* (anche se $\sigma^* \ll \sigma_y$) può indurre rottura.

- Mantenendo per t elevate il carico si induce uno scorrimento viscoso (o Creep)
- Ci sarà una deformazione lenta e continua nel tempo.

Fattore fondamentale : Tempo di Carico

- Metalli Per temperatura operativa $T_{operativa} \approx 0,5 T_f$
- Ceramici $T_{operativa} \approx 0,7 T_f$



Applico carico costante $\sigma < \sigma_y$ e noto una deformazione costante fino a rottura

- 1) Deformazione Elastica
- 2) Creep primario (t applicazione ~ qualche minuto)
- 3) Creep stazionario o secondario
- 4) Creep terziario

Se annullo σ^* prima della rottura avrò una deformazione residua permanente.

N.B. E' vero che i ceramici hanno maggiore resistenza ad alte temperature ma relativamente agli altri materiali, anche i ceramici subiscono il Creep.

Velocità di deformazione $\frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon}_{ss}$

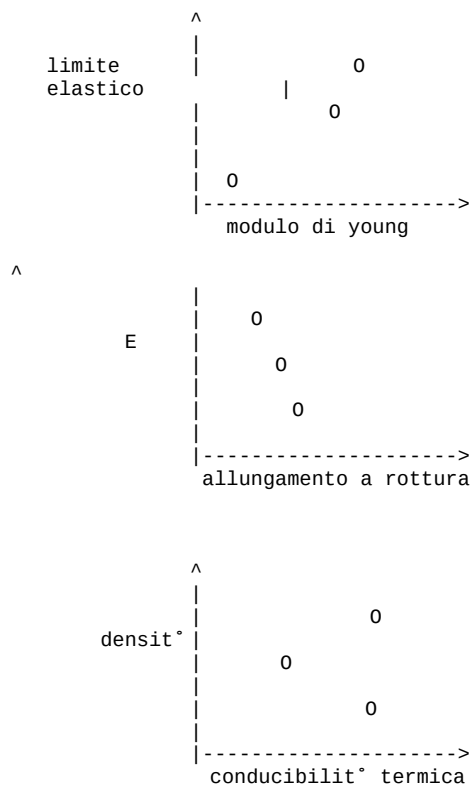


Hp : sono sempre a temperature operative elevate e $\sigma^* < \sigma_y$

Diagrammi di Stato

- fusione di A=2000°C, B=1500°C, E=1000°C con 65%A, B in A al 35% e poi al 10%, A in B al 40% e poi 5%.
calcolare al 35% di A e alle temperature di 1300°C e 800°C.
calcolare poi a 700°C la massa e la composizione delle fasi
- fusione di A=2000°C, B=1500°C, E=1000°C con 65%A, B in A al 30% e poi al 10%, A in B al 40% e poi 5%.
calcolare al 35% di A e alle temperature di 1300°C e 900°C.
calcolare poi a 750°C la massa e la composizione delle fasi

MAPPE



Durezza della martensite

La Martensite e' una metafase sovrassatura di Carbonio (conseguenza della carburazione post rinvenimento) che le conferisce una elevata durezza ma anche una elevata fragilità.

Temperatura di Curie

La temperatura di Curie e' la temperatura caratteristica al di sopra della quale i materiali perdono le proprietà ferromagnetiche e acquisiscono un comportamento paramagnetico. Per il ferro e' 768 C.

Materiali magneticamente dolci o duri

Un materiale dolce si magnetizza e smagnetizza facilmente, è povero di carbonio eliminato per es dal silicio.

In un materiale magneticamente duro rimane una carica residua (isteresi), ha un elevato tenore di carbonio, strutture martensitiche.

Quali caratteristiche influenzano le caratteristiche magnetiche

Temperatura di Curie, Dislocazioni, Contenuto di Carbonio → Isteresi.

Analisi SEM

SEM (scanning electron microscope) è uno strumento di analisi dei metalli non distruttiva.

Il rivelatore, che è disposto in modo tale da ricevere il massimo livello di radiazione assorbibile, può essere del tipo a dispersione di lunghezza d'onda (WDS) o a dispersione di energia (EDS).

•Rivelatore WDS: sfrutta le caratteristiche ondulatorie dei fotoni X. È costituito da un crystallo ricurvo, il "cerchio di Rowland", con un determinato passo d del reticolo cristallino, sul quale sono disposti il campione e il contatore di fotoni. Seguendo la legge di Bragg, solamente una determinata lunghezza d'onda sarà riflessa sul contatore, lunghezza d'onda che può essere variata ruotando il rivelatore.

•Rivelatore EDS: sfrutta l'interazione energetica tra i raggi X e un opportuno materiale. Il principio di funzionamento sfrutta la produzione di corrente elettrica, che viene sensibilmente amplificata, generata per interazione tra fotoni e crystallo. Sono i rivelatori attualmente più utilizzati.

Microscopio ottico senza attacco metallografico.

L'analisi senza attacco acido permette una sola analisi superficiale del provino di fessurazioni, rugosità.

Rapporto tra velocità di rotazione sensore e campione nell'analisi raggi X

(legge di Bragg $2d \sin \theta = n\lambda$)

• 2θ

Ordine di grandezza della profondità di penetrazione dei raggi x

Qualche micron ????????????

Corrosione Galvanica

I metalli meno nobili (zinco, ferro, nichel etc) presentano una maggiore tendenza a corrodersi rispetto a quelli nobili (rame argento acciaio etc). Mettendo a contatto uno non nobile con uno nobile, quello non nobile funge da anodo e si corrode (riduce).

Relazione che lega entalpia e entropia con l'energia libera di Gibbs

$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$ La componente entropica diventa preponderante ad alte Temperature

Come si ottiene un rame più puro?

Elettrolisi (costo maggiore), il rame puro ha la migliore convenienza in termini di conduttività, se consideriamo anche il peso l'alluminio e' più utilizzato per es linee ad alta tensione.

Cementite (caratteristiche e composizione)

La cementite è un composto intermetallico di Fe (93,3%) e C (6,67%) , perché chimicamente e' un carburo di ferro.

Acciai HSLA sono acciai dolci debolmente legati ad alta resistenza ma bassa stampabilità, vengono affinati aggiungendo Ti-Al.

Ruolo Carico di Snervamento negli acciai a profondo stampaggio

nei metalli da profondo stampaggio il carico di snervamento deve essere basso in modo che il ritorno elastico sia basso quindi le presse devono imprimere poca energia. Ciò si ottiene con aggiunta di elementi in lega e con grani grossi tenendo basso il tenore di carbonio.

In generale le caratteristiche di un materiale per profondo stampaggio sono :

basso carico snervamento ; elevata anisotropia; elevato coeff. di snervamento; grani grossi.

Acciai da Bonifica : sono adatti a sopportare carichi elevati urti e resistono bene a fatica, miglior compromesso fra resistenza e tenacità. Hanno un tenore di carbonio $0.2\% < C < 0.6\%$. La presenza di elementi leganti negli acciai da bonifica rallenta la trasformazione eutetoidica e permette di avere la concentrazione di carbonio che garantisca massima tenacità.

Acciai Duplex: Acciai inossidabili (contengono Ni e Cr) bifasici austeno-ferritici, hanno alta resistenza a tensione e snervamento, sono resistenti allo stress corrosion cracking.

Acciai Dual-phase (DPS) : acciai ad alta resistenza che hanno una microstruttura contenente sia ferrite che martensite. Basso o medio tenore di carbonio e temprato da una temperatura superiore alla A1, ma al di sotto della A3 in un diagramma di trasformazione al raffreddamento continuo. Conseguentemente la microstruttura è costituita da una matrice in ferrite duttile e una parte di martensite dura. Attualmente, questi acciai vengono utilizzati prevalentemente nelle applicazioni strutturali, dove hanno sostituito acciai più convenzionali quali gli acciai HSLA grazie a riduzione del peso, migliorata lavorabilità, capacità di assorbire l'energia d'urto e resistere alla fatica.

Acciai Trip (Transformation induced plasticity): sono acciai rafforzati tramite trasformazione per deformazione plastica dell'austenite residua in martensite.

Come evitare il Creep :

Per migliorare la resistenza allo scorrimento viscoso sono utili i trattamenti che contribuiscono a ridurre la superficie dei giunti come ricottura, normalizzazione. solidificazione direzionale creazione di difetti in monocristallo. La produzione di metalli resistenti al creep avviene spesso sotto vuoto per eliminare le impurezze gassose (in particolare l'ossigeno).

Per evitare il Creep nelle superleghe (leghe che lavorano a temperature molto alte) :

Grano grosso, inserimento precipitati a bordo grano, composti intermetallici, carburi.

ALTOFORNO

$1 \text{ ton Minerale} + 2 \text{ ton Aria (aggiunta } CH_4) = \frac{1}{2} \text{ ton Ghisa} + \text{gas (CO, CO}_2)$

Un altoforno da minerale ferroso e carbon coke (riducente) e calcare (fondente, fluidifica) produce ghisa liquida e gas ($CO, CO_2, e N$), ha una capacità di produzione di 10k tonnellate al giorno.

Nel processo LD (Linz-Donawitz) il **convertitore** (capacità 100 ton) estrae carbonio dalla ghisa per ottenere acciaio insufflando ossigeno puro con refrattario basico. Non si usa l'aria perché contenendo Azoto causerebbe invecchiamento.

I **cowpers** bruciano gas prodotti con la ghisa (CO, CO_2) per preriscaldare aria da immettere nell'altoforno.

•Trattamenti termici:

– **Il più economico** e' la **normalizzazione** (una austenizzazione seguita da un raffreddamento in aria calma), se con la normalizzazione ottengo un effetto di tempra sto lavorando su acciai autotemperanti.

– **Tempra**

Aumento la velocità di raffreddamento usando Gas, olio acqua o bagni salini.

Le condizioni ottimali per una tempra sono:

Non potendo conoscere la presenza di H si elimina preventivamente con una **deidrogenazione**
→ si riscalda il pezzo a 180-200° C per tempo legato alle dimensioni del pezzo (da 4 a 24h), posso anche operare a temperature maggiori.

Per proteggere la superficie del pezzo finito o

- lavoro sotto vuoto (troppo costoso ma ecologico, usata per stampaggio)
- lavoro in atmosfere protettive
 - Gas inerte come azoto molecolare
- atmosfere ossidanti o riducenti o inerti prodotte da generatori endo/eso termici che bruciano metano(inquina producendo CO)

Leghe di alluminio

- gruppo 1.x.x.x (alluminio minimo 99%)
- gruppo 2.x.x.x (leghe Al – rame) → *Elevate caratteristiche meccaniche*
- gruppo 3.x.x.x (leghe Al - manganese) → *Edilizia*
- gruppo 4.x.x.x (leghe Al – silicio) → *Pistoni, bacchette di saldatura*
- gruppo 5.x.x.x (leghe Al – magnesio)
- gruppo 6.x.x.x (leghe Al – Mg- Si)
- gruppo 7.x.x.x (leghe Al – Zn) → *Campo Aeronautico*
- gruppo 8.x.x.x (leghe Al – Li / miste)

Rafforzamento leghe Alluminio

- Serie 1000 3000 5000 rafforzabili solo per incrudimento
- Serie 2000 4000 6000 7000 anche per trattamento termico.

→ Invecchiamento dell' alluminio

È un indurimento dovuto a un riscaldamento di solubilizzazione (con conseguente rilascio di precipitati dagli elementi della lega che impediscono il moto dislocativo) seguito da tempra e riscaldamento a 100-150 C. È governato dal tempo e dalla Temperatura.

Il rame è solubile in Al solo a T elevate : si scalda Al fino al T eutettico e si raffredda velocemente per ottenere a T ambiente solubilità. Si procede all'invecchiamento.

Soluzione di rame sovrassatura → Il Cu tende ad uscire formando composti duri e metastabili (durezza cresce nel t e poi diminuisce).

A T maggiori si creano composti di equilibrio, non hanno caratteristiche di durezza. Leghe da Getto

Lega Al-Si eutettico a 12.6%, spesso si aggiunge sodio che fa passare la temperatura da 577 a 575°C e il tenore di silicio da 12,6% a 13%.: si formano molti più nuclei di solidificazione.

Alluminio e Saldabilità La saldatura tradizionale (quella ad arco) non si può utilizzare perchè sviluppa allumina. Quella a filo sviluppa in varie serie (come quella Al-Cu) ZTA (zono alterate termicamente) che riducono la resistenza. Quindi è preferibile rivettare bullonare o incollare.

GLOSSARIO DI METALLURGIA

ACCIAIO AL CARBONIO. Acciaio costituito essenzialmente da ferro e carbonio senza altri elementi intenzionalmente aggiunti.

ADDOLCIMENTO PER INVECCHIAMENTO. Spontanea diminuzione di resistenza e di durezza che avviene a temperatura ambiente in alcune leghe incrudite, specialmente a base di alluminio

ATMOSFERA. Ambiente gassoso nel quale il metallo da trattare è riscaldato per il processo. Atmosfere particolari sono utilizzate per proteggere la superficie del metallo o per modificare l'attività chimica degli elementi sulla superficie, in modo da aggiungere o rimuovere carbonio, azoto, idrogeno, e per aggiungere alcuni elementi quali cromo, silicio etc

AUSTEMPERING. Trattamento termico nel quale l'austenite è raffreddata fino ad una temperatura costante (superiore ad M_s), in modo da ottenere una completa trasformazione bainitica. In alcuni acciai, per alcuni livelli di durezza, la bainite presenta una maggiore tenacità delle strutture bonificate.

AUSTENITE. E' il nome attribuito a qualunque soluzione solida nel quale il ferro γ sia il solvente. E' il nome di una struttura e non indica nulla a proposito della composizione chimica. E' la struttura dalla quale tutti i trattamenti termici di tempra devono partire.

AUSTENITIZZAZIONE. Formazione dell'austenite mediante riscaldamento di una lega ferrosa nell'intervallo di trasformazione (austenitizzazione parziale) oppure al di sopra dell'intervallo di trasformazione (austenitizzazione completa). Senza ulteriori indicazioni, il termine fa riferimento all'austentizzazione completa.

BAINITE. Costituente strutturale formato da cementite aciculare in una matrice ferritica, con una durezza compresa fra 30 e 55 HRC.

BONIFICA. Trattamento termico costituito dalla sequenza di tempra seguita da rinvenimento.

CALORE LATENTE. Energia termica assorbita o rilasciata quando una sostanza è sottoposta ad un cambiamento di fase.

CARBONIO LIBERO. Indica la frazione di carbonio in un acciaio oppure in una ghisa presente sotto forma di grafite.

CARBONIO TOTALE. Ammontare complessivo del carbonio in una lega a matrice ferrosa, costituito dalla sommatoria del carbonio libero e del carbonio legato.

CARBONITRURAZIONE. Trattamento termico degli acciai che consiste nell'arricchimento superficiale in carbonio ed azoto da una atmosfera ricca di questi elementi, in condizioni più vicine a quelle di cementazione.

CARICO DI SNERVAMENTO. Sollecitazione alla quale il metallo mostra una evidente deviazione dalla proporzionalità fra sollecitazione e deformazione. Uno scostamento dello 0,2% è solitamente utilizzato per diversi metalli.

CEMENTAZIONE. Aggiunta di carbonio alla superficie di un metallo mediante riscaldamento in contatto con solidi, liquidi o gas ricchi in carbonio.

CEMENTITE. E' la designazione più utilizzata per il carburo di ferro Fe_3C , combinazione chimica di ferro e carbonio.

CND MEDIANTE LIQUIDI PENETRANTI. Controlli non distruttivi (CND) che permettono di determinare la posizione di discontinuità aperte sulla superficie del metallo mediante dapprima l'impiego di un liquido fluorescente che penetra la discontinuità, seguita dalla rimozione del liquido e quindi dall'applicazione di una polvere (ad esempio farina fossile) che permette di evidenziare la discontinuità.

CORROSIONE INTERGRANULARE. Corrosione che avviene preferibilmente al bordo grano, solitamente con un attacco trascurabile o nullo dei grani adiacenti.

CRICCA. Discontinuità microscopica o macroscopica di un metallo in cui due dimensioni sono decisamente più importanti della terza. La presenza di questa discontinuità in un manufatto sollecitato implica all'apice della cricca l'incremento delle sollecitazioni locali.

DUTTILITA'. Capacità del metallo di deformarsi plasticamente senza fratturarsi, misurata dall'allungamento oppure dalla riduzione dell'area del tratto utile durante la prova di trazione.

DUREZZA SECONDARIA. Durezza più elevata sviluppata da alcuni acciai legati quando vengono raffreddati dalla temperatura di rinvenimento. Vedi anche fragilità al rinvenimento

ENERGIA DI IMPATTO. Quantità di energia richiesta per fratturare un metallo, solitamente misurata mediante prove Charpy o Izod. Il tipo di provino e le condizioni di prova influenzano notevolmente i valori ottenuti e quindi devono essere precisati.

EUTETTICO. (1) Reazione isoterma reversibile nella quale una soluzione liquida si trasforma mediante raffreddamento in due o più soluzioni solide intimamente miscelate. Il numero di fasi solide ottenute è pari a quello dei componenti del sistema. (2) Una lega avente la composizione indicata dal punto eutettico nel diagramma di equilibrio. (3) Struttura di una lega costituita da una miscela di soluzioni solide che si formano mediante reazione eutettica.

FATICA. Rottura che avviene mediante propagazione di una cricca sollecitata ripetutamente mediante carichi che non inducono, singolarmente, macroscopiche deformazioni.

FATICA TERMICA. Frattura causata dalla presenza di gradienti termici variabili nel tempo in modo da ottenere degli sforzi ciclici nella struttura.

FERRITE. E' il nome dato alla soluzione solida nella quale il ferro alfa (CCC) svolge il ruolo di solvente. La ferrite denomina una struttura e NON una composizione.

FERRITE ACICULARE. Ferrite fortemente substrutturata non equiassica che si forma a seguito di un raffreddamento continuativo ad una temperatura leggermente superiore all'intervallo relativo alla formazione di bainite superiore.

FERRITE LIBERA. Ferrite ottenuta direttamente dalla decomposizione di austenite ipoeutetoidica durante il raffreddamento, senza la contemporanea formazione di cementite, indicata anche come ferrite proeutetoidica.

FISSAGGIO. Operazione che implica il posizionamento di manufatti che debbono essere trattati termicamente in apparati che impediscono le distorsioni legate alle variazioni di temperatura.

FORMABILITA'. Valuta la facilità con la quale un metallo può raggiungere la forma desiderata mediante deformazione plastica.

FORNO CONTINUO. Forno utilizzato per trattamenti termici che progrediscono continuamente, con il metallo che entra da un lato e fuoriesce dall'altro.

FRAGILITA' AL RINVENIMENTO. Infragilimento caratteristico degli acciai altoresistenziali dovuto al rinvenimento per temperature comprese fra 200 e 400 °C, è ritenuto essere il risultato dell'effetto combinato della precipitazione della cementite ai bordi grano della primitiva austenite (quella poi trasformata in martensite) e la segregazione di impurezze negli stessi siti.

FRATTURA DUTTILE. Frattura caratterizzata da una evidente deformazione plastica del metallo e che procede mediante consumo di una notevole quantità di energia. Opposto della frattura fragile.

FRATTURA GRANULARE. Tipo di superficie irregolare prodotta a seguito della rottura di un metallo, caratterizzata da una morfologia ruvida e granulosa, da contrapporre alla morfologia liscia, setosa oppure fibrosa. Può essere classificata in transgranulare oppure intergranulare. Questo tipo di frattura è spesso denominata "frattura cristallina". Da comparare con la frattura "fibrosa" oppure "setosa".

FRATTURA INTERGRANULARE. Frattura fragile di un metallo nella quale la frattura si verifica fra i grani, o i cristalli, che formano il metallo.

GHISA. Termine generico che indica un'ampia famiglia di leghe ferrose per getti nelle quali il tenore di carbonio supera la solubilità del carbonio nell'austenite alla temperatura eutettica. La maggior parte delle ghise contiene almeno il 2% di carbonio, più silicio e zolfo, e possono o meno contenere altri elementi di lega. Si possono suddividere in ghise grigie, ghise bianche, ghise malleabili, ghise sferoidali, ghise legate.

GHISA BIANCA. Ghisa che solidifica secondo il diagramma di fase metastabile, nella quale il carbonio si presenta in forma legata come cementite. Può essere ottenuta riducendo il tenore di Si e di altri elementi grafitizzanti, oppure aumentando la velocità di solidificazione e di raffreddamento.

INVECCHIAMENTO. E' una trasformazione strutturale, solitamente per precipitazione, che avviene in alcune leghe dopo un trattamento termico preliminare o dopo una lavorazione a freddo. L'invecchiamento può avvenire in alcune leghe alla temperatura ambiente in un tempo non lunghissimo (giorni) oppure in altre può avvenire in tempi più brevi, a temperature più elevate. Un sovrainvecchiamento ottenuto ad una temperatura superiore a quella ambiente comporta trasformazioni a volte indesiderate delle proprietà fisiche e meccaniche.

INVECCHIAMENTO INTERROTTO. Invecchiamento in due o più temperature, a gradini, seguito da un raffreddamento a temperatura ambiente dopo ogni gradino.

INVECCHIAMENTO NATURALE. Invecchiamento spontaneo di una soluzione solida sovrassatura alla temperatura ambiente.

LEGA BINARIA. Lega che contiene solo due componenti.

LEGA IPEREUTETTICA. In una lega che forma un eutettico, qualunque lega avente una composizione che supera la composizione eutettica e la cui struttura di equilibrio contiene in parte la struttura eutettica.

LIMITE DI FATICA. Sollecitazione massima alla quale un metallo può essere sottoposto in modo ciclico per un numero virtualmente infinito di cicli. Se il valore medio non è zero, il limite di fatica è dato dal valor medio del carico applicato, con la sollecitazione minima e massima che devono comunque essere riportati. Da comparare con il limite di fatica.

LIMITE ELASTICO. Sollecitazione massima che un metallo può sostenere senza che si abbiano deformazioni residue una volta che la sollecitazione viene completamente rimossa.

MALLEABILIZZAZIONE. Vedi ghise malleabili

MANTENIMENTO (DELLA TEMPERATURA). Parte del ciclo termico durante il quale la temperatura del manufatto è mantenuta costante ad un determinato valore (temperatura di mantenimento) e per una certa durata (tempo di mantenimento).

MARAGING. Trattamento termico effettuato su un particolare gruppo di acciai, in conseguenza del quale si ottiene la precipitazione di uno o più composti intermetallici in una matrice martensitica praticamente priva di carbonio.

MARTEMPERING. E' una forma di tempra interrotta nel quale l'acciaio è rapidamente raffreddato dalla temperatura di austenitizzazione fino ad una temperatura leggermente superiore ad M_s , mantenuto a tale temperatura finché la temperatura non è omogenea su tutto il manufatto, e, quindi, raffreddato in aria fino a temperatura ambiente. Tale trattamento è indicato per gli acciai non legati, nel caso in cui le distorsioni durante il raffreddamento possano divenire un problema.

MARTENSITE. Prodotto di trasformazione estremamente duro che si forma nel caso in cui l'acciaio viene raffreddato rapidamente dalla sua temperatura di austenitizzazione (tempra) fino ad una temperatura inferiore ad M_f (solitamente la temperatura ambiente). La martensite deve essere considerata come una soluzione solida sovrassatura di carbonio in un reticolo tetragonale (praticamente un cubico distorto) di ferro. Al microscopio appare con una struttura aciculare. La sua durezza oscilla fra 30 e 68 HRC in funzione del tenore di C.

METALLIZZAZIONE. (1) Produzione di uno strato metallico mediante applicazione mediante spruzzamento di un metallo fuso o mediante deposizione a vuoto. (2) Applicazione di uno strato metallico conduttivo sulla superficie di un metallo non conduttivo elettricamente.

MICRODUREZZA. Durezza di un metallo determinata mediante l'impiego di un penetratore Vickers o Knoop cui sia applicato un carico decisamente basso. Le impronte sono solitamente così piccole da dover essere misurate al microscopio. Tale misura è in grado di valutare la durezza dei differenti costituenti.

MICROSEGREGAZIONE. Segregazione che ha luogo in un grano, in un cristallo o in una particella di piccole dimensioni.

MICROSTRUTTURA. Struttura di un metallo, visibile al microscopio per ingrandimenti elevati, solitamente superiori a 100x.

MODULO DI ELASTICITA'. E' una misura della rigidità, definito come il rapporto fra la sollecitazione unitaria, al di sotto del limite di proporzionalità, ed il corrispondente valore della

PROVA DI RESILIENZA IZOD. Prova di impatto mediante pendolo nel quale il provino, solitamente intagliato, è fissato ad un estremo e rotto da pendolo in caduta. L'energia assorbita, misurata dalla seguente risalita del pendolo, è una misura della resistenza all'impatto o resilienza. Comparare con la prova Charpy.

PROVA DI TEMPRABILITÀ (PROVA JOMINY). Procedura di laboratorio per determinare la temprabilità di un acciaio o di una ghisa. La temprabilità è determinata mediante il riscaldamento di un provino standard al di sopra della sua temperatura critica, il suo posizionamento in modo tale da procedere ad un rapido raffreddamento mediante getto d'acqua di una delle sue estremità, e, dopo che il provino è arrivato alla temperatura ambiente, la misura della evoluzione della durezza a partire dall'estremità raffreddata. I risultati sono quindi riportati in un grafico durezza-distanza dall'estremità temprata.

PROVA DI TENACITÀ A FRATTURA (O DI K_{IC}). Procedura con la quale viene determinata la resistenza del metallo alla propagazione instabile della cricca.

PROVA DI TRAZIONE. Procedura con la quale viene determinata il comportamento di un metallo sottoposto ad un processo di deformazione unidirezionale.

PUNTO CRITICO. Temperatura in corrispondenza della quale un cambiamento di struttura o inizia o finisce.

PRERISCALDAMENTO. Riscaldamento effettuato prima di qualche trattamento termico o meccanico. Nel caso degli acciai per utensili, riscaldamento ad una temperatura intermedia immediatamente prima della austenitizzazione finale. Nel caso di alcune leghe non ferrose, riscaldamento a temperatura elevata per una durata prolungata in modo da omogeneizzare la struttura. Nella saldatura, è il riscaldamento che viene effettuato ad una temperatura intermedia per una durata breve, immediatamente prima della saldatura

RAFFREDDAMENTO CONTROLLATO. Raffreddamento da una temperatura elevata in maniera predeterminata, in modo da evitare indurimenti, cricature, danneggiamento interno, ed ottenere la microstruttura o le proprietà meccaniche desiderate.

RAPPORTO DI POISSON. Valore assoluto del rapporto fra la deformazione unitaria trasversale e la deformazione unitaria longitudinale, in un corpo cui sia applicata una sollecitazione longitudinale solitamente in campo elastico.

REFRATTARIO. (1) Materiale caratterizzato da un punto di fusione decisamente elevato utilizzato per le pareti interne di forni e siviere. (2) La qualità di resistenza al calore.

RESISTENZA A COMPRESSIONE. La massima resistenza a compressione che un metallo è capace di sviluppare, riferita alla sezione iniziale. Se il metallo si rompe a compressione per frattura improvvisa, la resistenza a compressione ha un valore definito. Altrimenti, il valore corrispondente alla resistenza a compressione risulterà essere un valore arbitrario dipendente dal grado di deformazione considerato come limite per il metallo in esame.

RESISTENZA ALLO SCORRIMENTO. (1) Sforzo costante nominale che comporta uno specifico scorrimento viscoso in un tempo determinato, a temperatura costante. (2) Sforzo costante nominale che implica una specifica velocità nella fase secondaria dello scorrimento viscoso a temperatura costante.

RESISTENZA A ROTTURA. E' il valore massimo dello sforzo unitario nominale che il materiale può sopportare.

RICARBURAZIONE. Recupero del tenore di carbonio perso dallo strato superficiale di un acciaio fino ad ottenere un sostanziale ripristino del primitivo tenore di carbonio.

RICOTTURA. Termine molto generale che indica il processo di riscaldamento di un metallo ad una determinata temperatura ed il successivo raffreddamento con una velocità opportuna in modo da ottenere il risultato desiderato. Con la ricottura si possono ottenere:

- A. Diminuzione delle tensioni interne
- B. Indurre un addolcimento strutturale
- C. Aumentare le proprietà fisiche, elettriche o magnetiche
- D. Migliorare la lavorabilità

RINVENIMENTO AD INDUZIONE. Rinvenimento di un acciaio ottenuto mediante riscaldamento per induzione a bassa frequenza.

RISCALDAMENTO PER INDUZIONE. Riscaldamento del manufatto metallico dovuto all'effetto combinato della resistenza elettrica ed alle perdite di isteresi indotte dal sottoporre il pezzo ad un campo magnetico variabile.

RISCALDAMENTO SELETTIVO. Riscaldamento intenzionalmente effettuato solo su alcune parti del manufatto (ad esempio tempra superficiale).

ROTTURE PER TEMPRA. Frattura di un metallo durante una tempra da temperatura elevata. Può verificarsi con maggior frequenza nel caso di acciai al carbonio, acciai legati oppure acciai per utensili con elevata durezza e bassa tenacità. Le cricche partono solitamente da filettature, fori, angoli, e qualunque punto possa innalzare la sollecitazione locale. E' conseguenza degli sforzi dovuti all'aumento di volume specifico legato alla formazione di martensite.

SCORRIMENTO VISCOSO (CREEP). Processo di deformazione a sollecitazione costante, per temperature elevate.

SENSIBILIZZAZIONE. Processo di notevole importanza negli acciai inossidabili austenitici in cui, per permanenze intorno a 600°C, consegue la precipitazione di carburi di Cr a bordo grano. Se il tenore di Cr libero scende localmente al di sotto del 12%, il bordo grano diventa suscettibile di attacco locale corrosivo (corrosione intergranulare).

SEVERITA' DI TEMPRA. Capacità del mezzo temprante di estrarre il calore da un acciaio austenitizzato

SFORZI MACROSCOPICI. Sforzi residui che possono andare dalla trazione alla compressione per distanze che sono diverse volte la dimensione del grano e comunque macroscopicamente quantificabili.

SFORZI PER RAFFREDDAMENTO. Sforzi residui che risultano da una non uniforme distribuzione delle temperature durante il raffreddamento.

SFORZI RESIDUI. Sforzo interno che non dipende dalle sollecitazioni esterne, dovuto a incrudimenti, cambiamenti di fase oppure gradienti di temperatura.

SFORZO UNITARIO (O SOLLECITAZIONE UNITARIA). Forza per unità di area, può essere scomposta fra una componente perpendicolare all'area di riferimento ed una parallela, rispettivamente denominate sforzo normale e sforzo di taglio. Lo "sforzo reale" indica lo sforzo unitario in cui la forza e l'area vengono misurati nello stesso istante, mentre lo "sforzo ingegneristico" fa riferimento all'area iniziale.

SFORZO TERMICO. Sforzi in un metallo causati da una distribuzione della temperatura non uniforme.

SHOCK TERMICO. Sviluppo di un ripidissimo gradiente di temperatura cui conseguono elevati sforzi nella struttura.

SOLUBILIZZAZIONE. Riscaldamento di una lega ad una temperatura e per una durata per le quali uno o più costituenti entrano in soluzione solida, seguito da un raffreddamento sufficientemente rapido da conservare questi costituenti in soluzione.

SOLUBILIZZAZIONE (DI UN ACCIAIO). Riscaldamento di un acciaio austenitico ad elevata temperatura (intorno a 1000°C), seguito da un rapido raffreddamento.

SOLUZIONE SOLIDA. Fase cristallina solida, omogenea, contenente due o più specie chimiche.

SOTTORAFFREDDAMENTO. Raffreddamento al di sotto della temperatura in corrispondenza della quale si ha l'equilibrio di trasformazione di fase, senza avere la trasformazione prevista.

SOVRAINVECCHIAMENTO. Invecchiamento eseguito in condizioni di temperatura e durata superiori a quelle richieste per ottenere la migliore combinazione di proprietà meccaniche.

SOVRARISCALDAMENTO. Riscaldamento di un acciaio o di una lega ad una temperatura così elevata che la combinazione delle sue proprietà risulta notevolmente alterata. Nel caso in cui le originarie proprietà non siano ripristinabili mediante un trattamento termo-meccanico, tale riscaldamento verrà denominato "bruciatura".

TEMPRA SUPERFICIALE (INDURIMENTO ALLA FIAMMA). Processo che consiste nel riscaldare un'area, solitamente localizzata, mediante cannello ossiacetilenico oppure altro tipo di fiamma ad elevata temperatura, e, quindi, nel raffreddare rapidamente, in modo da indurre la tempra solo dello strato superficiale.

TEMPRABILITA'. Caratteristica fondamentale di un acciaio che determina la facilità di prevenire la trasformazione dell'austenite in qualsiasi altra cosa che non sia martensite durante la tempra.

TENACITA'. Capacità di un metallo di assorbire energia e di deformarsi plasticamente prima di rompersi.

TERMOCOPPIA. Apparecchiatura per la misura delle temperature, costituita da due metalli o leghe connessi elettricamente ad un estremo e connessi ad un voltmetro dall'altro. Nel caso in cui una delle due giunzioni sia più calda dell'altra, si produce una differenza di potenziale che risulta essere approssimativamente proporzionale alla differenza di temperatura fra le due giunzioni.

TRASFORMAZIONE ISOTERMA. Cambiamento di fase che ha luogo a temperatura costante. Il tempo richiesto affinché la trasformazione sia completa e, a volte, il tempo necessario affinché la trasformazione abbia inizio (incubazione), dipendono dal livello di sottoraffreddamento o di sovrariscaldamento, a seconda che ci si trovi rispettivamente al di sotto oppure al di sopra della temperatura di equilibrio per la stessa trasformazione.

TRASFORMAZIONE MARTENSITICA. Reazione che ha luogo in alcuni metalli durante il raffreddamento, con formazione di una struttura aciculare (a forma di aghi) denominata martensite.

TRATTAMENTO A FREDDO. Raffreddamento a temperature a 0°C con l'obiettivo di ottenere desiderate condizioni o particolari proprietà, quali ad esempio la stabilità microstrutturale o dimensionale. Nel caso in cui il trattamento implica la trasformazione di austenite residua, è normalmente seguito da un rinvenimento.

TRATTAMENTO DI PRECIPITAZIONE. Invecchiamento artificiale nel quale un costituente precipita da una soluzione solida sovrassatura.

TRATTAMENTO DI STABILIZZAZIONE. (1) Prima di portare il manufatto alle dimensioni finali, nuovo riscaldamento dell'acciaio o della lega non ferrosa, fino alla temperatura di esercizio (o anche leggermente al di sopra), seguito da un raffreddamento fino a temperatura ambiente, in modo da assicurare la stabilità dimensionale durante l'esercizio. (2) Trasformazione dell'austenite residua in un acciaio temprato. (3) Trattamento termico effettuato sugli acciai inossidabili austenitici a temperature comprese fra 870 e 900°C in modo da far precipitare tutto il carbonio sotto forma di TiC, NbC or TaC, in modo da prevenire la possibile sensibilizzazione dell'acciaio conseguente all'esposizione ad elevata temperatura.

TRATTAMENTO ISOTERMICO. Modalità di trattamento nel quale il manufatto è rapidamente raffreddato ad una data temperatura e mantenuto fino a che tutte le trasformazioni non siano completate.

TRATTAMENTO TERMOCHIMICO DI DIFFUSIONE. Trattamento termico nel quale lo strato superficiale di un acciaio è sostanzialmente più duro del cuore grazie ad una modifica della sua composizione.

TRATTAMENTO TERMICO. Riscaldamento e raffreddamento di un metallo o di una lega in modo tale da ottenere le condizioni o le proprietà desiderate. Il riscaldamento effettuato con il solo obiettivo di effettuare una lavorazione meccanica a caldo è escluso da questa definizione.

VELOCITA' DI RAFFREDDAMENTO CRITICA. Velocità di raffreddamento continuo richiesta per prevenire trasformazioni indesiderate. Nel caso degli acciai, è la velocità di raffreddamento minima per la quale l'austenite deve essere continuamente raffreddata per sopprimere qualunque altra trasformazione al di sopra di M_s .

provocare modifiche strutturali durante la solidificazione.

10) Inoculazione della ghisa.

- Garantisce una prima trasformazione attraverso un processo di nucleazione aggiungendo piccole quantità di sostanze quali carburi, nitruri ed ossidi che fungono da agenti nucleanti. Si può introdurre Magnesio nella ghisa fusa per rendere la struttura sferoidale.

11) Cono di ritiro nei lingotti.

- Durante il raffreddamento qualsiasi metallo o lega metallica si ritira (il suo volume diminuisce), dando luogo al cosiddetto cono di ritiro. La materozza, cioè un serbatoio di metallo liquido, serve a compensare via via tutti i ritiri che si formano naturalmente nel pezzo. Alla fine del processo di solidificazione il cono di ritiro sarà presente solo nella materozza, la quale viene segata e riciclata per produrre altro fuso.

Lavorazione a vuoto.

12) A cosa servono i reattori endotermici.

- Servono a creare atmosfere inerti, ovvero carenza di O_2 nelle lavorazioni a vuoto in modo da rendere meno inquinato e dannoso l'ambiente di lavorazione evitando l'ossidazione.

13) Perché si crea il vuoto durante le lavorazioni.

- Per proteggere il pezzo durante la lavorazione in modo che non ci sia assorbimento o ossidazione. I costi sono maggiori ma migliora la sicurezza ed il materiale ottenuto.

Deformabilità plastica e difetti.

14) Come varia E al variare di sforzo e deformazione.

- Proporzionalmente allo sforzo, inversamente proporzionale alla deformazione, secondo la legge di Hooke. $\sigma = E \epsilon$

15) Caratteristica ingegneristica fondamentale del legame metallico.

- Il legame metallico è adirezionale, ovvero non si forma seguendo direzioni o angoli precisi: ciò rende i metalli duttili, ovvero capaci di subire deformazione plastica, rendendoli adatti a diversi tipi di lavorazioni.

16) Quali caratteristiche influenzano il comportamento magnetico dei metalli?

- Il comportamento magnetico dei metalli è dovuto alle caratteristiche del legame metallico, che forma la nube elettronica, la quale permette agli elettroni di muoversi liberamente. Sono quindi le proprietà chimiche che danno ai metalli il comportamento magnetico. In particolare, le proprietà magnetiche dei metalli sono legate ai moti orbitalici e di spin degli elettroni atomici spaiati degli orbitali "d".

17) Cosa sono le dislocazioni e perché si formano.

- Sono difetti cristallini lineari che consistono nella formazione di un semipiano aggiuntivo nella parte superiore del cristallo. Si ottiene lo scorrimento della parte superiore del cristallo rispetto a quella inferiore. Si formano spontaneamente in seguito ad uno sforzo in quanto ogni materiale presenta dei difetti pre-esistenti (vacanze e lacune interstiziali).

28) Ferrite beta.

- La ferrite β è ferrite α stabile fra 770°C (punto di Curie) e 912°C , che differisce dalla forma α non per caratteristiche cristalline ma per le proprietà magnetiche. La ferrite α è magnetica, la ferrite beta è amagnetica.

29) Temperatura di Curie.

- E' detto punto o temperatura di Curie, il valore di temperatura che segna il passaggio per un materiale da uno stato ferromagnetico ad uno stato paramagnetico.

30) Solubilità massima di C nella ferrite delta a 1492°C .

- 0.1% di carbonio.

31) Cosa causa il carbonio nel reticolo del ferro, e perché?

- a

32) La cementite è un composto o una miscela meccanica? Perché?

- La cementite è un composto interstiziale, Fe_3C , perché si ottiene per solidificazione di fusioni metalliche, dove gli atomi dei componenti si legano insieme e sono presenti in un rapporto preciso e costante. Una miscela, invece, è una materia di composizione variabile, formata da 2 o più sostanze che conservano ognuna le proprie caratteristiche.

33) Qual è la percentuale di Carbonio nella Cementite?

- 6.7% in peso.

34) Qual è la percentuale in peso di Fe in Fe_3C ?

- 93.3% in peso.

Utile3) Cementite.

- Cementite primaria: $4.3\% < C < 6.69\%$ (dopo punto eutettico).
- Cementite secondaria: $0.77\% < C < 4.3\%$ (tra punto eutettoidico e punto eutettico).
- Cementite terziaria: $0\% < C < 0.77\%$ (tra 0 e punto eutettoidico).

Utile4) Trasformazioni invariati.

- Peritettica: Liquido + ferro delta \rightarrow Austenite.
- Eutettica: Liquido \rightarrow Austenite + Cementite.
- Eutettoidica: Austenite \rightarrow Ferrite + Cementite.
 - \rightarrow Se raffreddo una lega con $C < 0.77\%$ \rightarrow Ferrite.
 - \rightarrow Se raffreddo una lega con $C > 0.77\%$ \rightarrow Cementite.
 - \rightarrow Se raffreddo una lega con $C = 0.77\%$ \rightarrow Ferrite + Cementite = Perlite.

35) Fase eutettoidica.

- Miscela bifase di ferrite e cementite.

36) Temperatura e %C del punto peritettico.

- 1492°C , 0.18% di C.

Utile5) Temperatura e %C del punto eutettico.

- 1148°C , 4.3% di C.

37) Temperatura e %C del punto eutettoidico (la trasformazione eutettoidica nel diagramma Fe - C avviene a:).

➤ Energia libera di Gibbs?

Utile10) Bainite.

- Aggregato di ferrite e di cementite a forme aciculari (a forma di ago). Si ottiene per rapido raffreddamento dell'austenite. A T intermedie si formano carburi costituiti da ammassi sempre più fini, non visibili al microscopio ottico. Al microscopio elettronico la bainite, a differenza della perlite, non ha un aspetto lamellare ed il carburo di ferro è presente sotto forma di particelle isolate.
- Bainite superiore ($T > 350^{\circ}\text{C}$): miscela di ferro α e cementite. Chimicamente è uguale alla perlite, ma ha cristalli molto più fini e geometrie differenti.
- Bainite inferiore ($T < 350^{\circ}\text{C}$): miscela di ferro $\alpha + \epsilon$. χ e ϵ sono carburi metastabili, non di equilibrio, con struttura $Fe_{2.4-2.6}C$. La differenza con la bainite superiore è che in quella inferiore le particelle di cementite precipitano anche all'interno delle lamelle di ferrite.

Utile11) Martensite.

- Strutture aciculari ottenute per tempra degli acciai. La sua formazione non procede per nucleazione ed accrescimento e non coinvolge alcuna diffusione di atomi.
- E' una soluzione solida di carbonio in ferrite metastabile a temperatura ambiente che si forma partendo dall'austenite delle leghe ferro-carbonio in seguito ad un rapido raffreddamento.
- Partendo da una T tale da avere austenite stabile (CFC), gli atomi di carbonio presenti nella soluzione solida γ si posizionano nell'ampia lacuna presente al centro della cella elementare. Questo reticolo, raffreddando, tende a trasformarsi in ferro α (CCC), nel quale possono rimanere solo piccolissimi quantitativi di C per intrusione nella soluzione solida. Se si raffredda con velocità tale da non permettere diffusione, atomi di C restano inclusi nel nuovo reticolo e vanno ad occupare gli spigoli ed il centro delle 2 basi della cella, trasformando la simmetria da cubica a tetragonale.
- Il tenore di carbonio deve essere uguale a quello in soluzione nel ferro γ e pertanto non si osservano discontinuità fino a circa il 2% di C.
- La martensite presenta una elevatissima durezza per la distorsione reticolare provocata dall'inserimento interstiziale degli atomi di carbonio.
- La struttura martensitica dell'acciaio temprato è troppo fragile nella maggior parte degli impieghi. Si sottopongono questi materiali ad un successivo trattamento in modo da favorire la diffusione degli atomi di C che abbandonano il reticolo della martensite per precipitare sotto forma di carburi. Col rinvenimento si ottiene una riduzione delle tensioni provocate dalla tempra, una decomposizione dell'austenite residua ed un aumento della tenacità.

45) Che cos'è la martensite?

- E' una soluzione solida di carbonio in ferrite metastabile a temperatura ambiente che si forma partendo dall'austenite delle leghe ferro-carbonio in seguito ad un rapido raffreddamento (tempra). Ha struttura aciculare e la sua formazione non procede per nucleazione ed accrescimento e non coinvolge alcuna diffusione di atomi.

46) Durezza della martensite.

- La martensite presenta una elevatissima durezza per la distorsione reticolare provocata dall'inserimento interstiziale degli atomi di carbonio. Fino a 260°C si ha precipitazione di carburi e decomposizione dell'austenite residua. Si osserva un leggero aumento della durezza. Sopra i 260°C , al crescere della T, si osserva la formazione di cementite in particelle sempre meno fini e la durezza continua a diminuire. A 600°C si ha la massima tenacità del materiale.

facilitano la partenza di una cricca.

- Ghisa trotata: si ha compresenza di carburi e grafite. E' fragile.

48) Differenza tra acciaio e ghisa, e motivare.

- Ghisa: lega di ferro e carbonio con tenore di C > 2%.
- Acciaio: lega di ferro e carbonio prodotta allo stato fuso con tenore di C fino al 2%.
- Negli acciai non avviene la trasformazione eutettica, predominante nelle ghise, dove può portare alla formazione di grafite. Pertanto l'acciaio è una ferrolega in cui il C non è mai presente sotto forma elementare.

49) Ghise bianche.

- Varietà di ghisa che si ottiene per rapido raffreddamento e contiene solo cementite e non perlite e grafite. Presentano altissima resistenza all'usura e alla corrosione ma sono notevolmente fragili e non lavorabili all'utensile, ma solo per fusione.

Utile?) Ghise grigie.

- Varietà di ghisa che si ottiene per lento raffreddamento e contiene quantità variabili di perlite e grafite. Risultano più tenaci e lavorabili delle ghise bianche.

50) Cosa fa il Magnesio nelle ghise.

- Ne rende la struttura sferoidale attraverso il processo di inoculazione. Le rende più tenaci.

Utile?) Acciai.

- Se %C aumenta:
 - ➔ σ_s , σ_r , durezza e temprabilità aumentano;
 - ➔ allungamento, strizione, duttilità, resilienza e saldabilità diminuiscono.
- Bassa resistenza alla corrosione: forma ossidi e ruggine.

Utile?) Acciai dolci e duri.

- Acciai dolci: C fino allo 0.25%.
- Acciai semi dolci: $0.25\% < C < 0.40\%$.
- Acciai semi duri: $0.40\% < C < 0.60\%$.
- Acciai duri: $0.60\% < C < 0.85\%$.

51) Acciai dolci.

- Contengono una quantità di carbonio < 0.25%.

Utile?) Acciai bassolegati e altolegati.

- Acciai bassolegati: il tenore di ognuno degli elementi di lega è < 5%.
- Acciai altolegati: il tenore di almeno uno degli elementi di lega è > 5%.

52) Acciai a lavorabilità migliorata (o acciai automatici).

- Contengono zolfo e manganese che formano carburi in grado di interrompere la continuità della matrice e migliorare la lavorabilità del materiale. Possono contenere anche piombo. Zolfo e piombo uniti a manganese conferiscono truciolabilità.
- Zolfo, 0.1%: serve ad infragilire l'acciaio così da poter essere facilmente lavorato.
- Manganese, fino a 1.5%: si forma solfuro di manganese anziché solfuro di ferro. Disossidante. In alte percentuali aumenta il tasso di incrudimento.
- Piombo, da 0.15% a 0.35%: autolubrificazione del materiale durante la lavorazione.

53) In quali acciai è pericoloso l'idrogeno (infragilimento da idrogeno)?

- Aumenta la temprabilità, la resistenza all'usura, la stabilità di rinvenimento (e la tenacità?).

63) Che effetto ha il cromo nella lavorazione?

- Allunga i tempi della tempra e sposta verso destra le curve CC (?)

Utile?) Cromo negli acciai.

- Acciai perlitici: 1-5% Cr + 0.4-0.8% C.
- Acciai martensitici: 11-15% Cr + 0.15-0.45% C. Lavorabili, caratteristiche meccaniche molto elevate, elevata resistenza allo scorrimento viscoso, saldabilità difficoltosa, elevata durezza, fragile.
- Acciai ferritici: Cr > 14% + 0.05-0.15% C. Buona resistenza a corrosione.
- Acciai austenitici: 18-20% Cr + 8-10% Ni. Acciai inox, ottima resistenza alla corrosione, facilmente lavorabili, forgiabili e saldabili. Bassa resistenza a fatica, possono essere impiegati anche basse T (fino a -200°C): sono immuni alla transizione duttile-fragile.
- Acciai da utensili: 4-15% Cr.
- Acciai da costruzione: 0.5-1% Cr. Duri e cementabili.

64) Perché si aggiunge Na o Mg negli acciai?

- a

65) Perché lo zolfo è dannoso per gli acciai (perché si desolfora l'acciaio)?

- Lo zolfo è presente negli acciai perché è presente nel materiale di partenza. Fa diminuire la resistenza alla corrosione. I solfuri di ferro fanno diminuire la saldabilità.

66) Dove si posiziona il carbonio nel ferro e come questo influisce sugli acciai.

- A

67) Acciai calmati.

- Il calmaggio consiste nella disossidazione totale o parziale del tenore di ossigeno disciolto nel bagno di acciaio liquido, il quale si combinerebbe, altrimenti, con il carbonio residuo in soluzione generando monossido di carbonio gassoso (processo evidente nel caso degli acciai effervescenti).
- Gli acciai calmati hanno maggiore stampabilità.
- Aggiungo Al che forma l'ossido. (?)

68) Cosa fa il sodio nelle leghe alluminio-silice.

- Aggiungendo piccole quantità di sodio nelle leghe Al-Si si modifica la struttura eutettica, da grossolana a fine.
- Benefici:
 - ➔ caratteristiche meccaniche migliori (allungamento, carico di rottura);
 - ➔ abbassamento dell'eutettico ed allungamento dell'intervallo di solidificazione;
 - ➔ riduzione dei difetti da ritiro.

69) Effetti del sodio nell'alluminio.

- a

70) Acciai effervescenti.

- Acciai a basso contenuto di carbonio < 0.25% (acciai dolci) e a tenore di manganese < 0.6%, aventi grado di disossidazione nullo o molto limitato per cui, durante la solidificazione, si ha lo sviluppo di ossido di carbonio con conseguente effervescenza.

- Non ferromagnetici.
- Gli elementi austenizzanti sono: carbonio, nichel, manganese.

73) Acciai Duplex.

- La composizione chimica è tale da formare sia austenite sia ferrite.
- Leghe Fe – Cr – Ni: 18-26% Cr, 4.5-6.5% Ni. Valori insufficienti per determinare una struttura cristallina totalmente austenitica.
- Alta resistenza a trazione e snervamento.
- Resistenza allo *stress corrosion cracking*.

74) Acciai Dual Phases.

- Microstruttura di ferrite e martensite: soffice matrice di ferrite contenente isole di martensite (dal 20 al 70%) in seconda fase.
- La ferrite conferisce un'eccellente duttilità e la martensite un'ottima resistenza.
- Quando l'acciaio viene lavorato, la deformazione si concentra nella ferrite: si ha un elevato incrudimento per deformazione.

75) Acciai HSLA (debolmente legati ad alta resistenza).

- Tipologia di acciai dolci bassolegati, ovvero contenenti solo piccole quantità di altri elementi, come il V, Nb, Ti.
- L'acciaio dolce di partenza permette buona formabilità e saldabilità.
- L'aggiunta di piccole quantità di elementi leganti porta alla sufficiente formazione di precipitati che aumentano la resistenza dell'acciaio.
- Resistenza meccanica anche a basse T e resistenza alla corrosione superiore a quelle degli acciai al carbonio, ma stampabilità inferiore.
- Affinamento (presenza di cricche): si aggiunge (Ti, Al).

Utile?) Acciai Trip.

- Composti da una matrice continua di ferrite, una seconda fase di martensite ed una frazione (5-10%) di austenite trattenuta, non trasformata e metastabile.
- L'austenite residua si trasforma progressivamente in martensite con crescente tensione per deformazione plastica, aumentando l'incrudimento sotto elevati livelli di carico: la trasformazione dell'austenite nella martensite rafforza l'acciaio (si ottengono elevati valori della resistenza a trazione e della deformazione plastica).

76) A cosa è dovuto il rafforzamento negli acciai trip?

- Il rafforzamento negli acciai trip è dovuto alla trasformazione dell'austenite residua nella martensite per deformazione plastica.

Utile?) Fosforo.

- Con 0.2% di fosforo negli acciai la resilienza diviene praticamente zero.

Trattamenti termici.

Utile?) Ricottura.

- Attenua gli effetti sulla struttura dovuti alla solidificazione e alla deformazione plastica e l'eterogeneità della composizione chimica del materiale.
- Si riscalda l'acciaio progressivamente fino ad una temperatura tale da trasformare la sua struttura nella soluzione solida gamma (fase 1).
- Si mantiene l'acciaio a questa temperatura per un tempo sufficiente ad assicurare che tutte le parti del pezzo abbiano raggiunto tale temperatura e abbiano potuto trasformarsi

- La maggior velocità di raffreddamento inibisce completamente la diffusione del C, che rimane intrappolato nelle lacune eutettoidiche dell'austenite. L'austenite da CFC diventa CCC, e a causa della presenza del C, la cella CCC subisce una distorsione assumendo struttura martensitica.
- Il rapido raffreddamento necessario alla tempra dell'acciaio si ottiene immergendo il pezzo in un mezzo temprante che può essere:
 - ➔ Acqua: può portare *califrazione*, si crea una guaina di vapore che funge da isolante termico. Le gocce d'acqua penetrano attraverso la guaina a basse T, arrivando alle zone calde ed evaporando sottraggono calore. Il rischio di rottura è molto elevato.
 - ➔ Miscela di acqua e alcoli: gli alcoli riducono la velocità di raffreddamento a basse T.
 - ➔ Olio: il raffreddamento è più lento ed è poco conveniente: produce fumi d'olio, infiammabili ed inquinanti.
 - ➔ Gas: di solito azoto in pressione raffreddato. Il raffreddamento è ancora più lento di quello con olio.
 - ➔ Aria, soluzioni saline o metalli fusi.
- Se non si può agire sul mezzo di raffreddamento si agisce sulla composizione dell'acciaio per inibire la trasformazione eutettoidica ed avere maggiori velocità di raffreddamento:
 - ➔ aggiunta di elementi in grado di stabilizzare l'austenite (Ni, Mn, N);
 - ➔ aggiunta di elementi che tendono a formare carburi di grosse dimensioni (Cr, V, W), in modo da rendere difficoltosa la diffusione.

83) Differenza della tempra negli acciai e nelle ghise.

- a

Utile?) Ricottura di addolcimento.

- Ha lo scopo di migliorare la lavorabilità o l'attitudine alla deformazione a freddo del materiale.
- E' un trattamento termico il cui ciclo prevede:
 - ➔ un riscaldamento ad una temperatura inferiore a quella della ricottura;
 - ➔ mantenimento a tale temperatura per un tempo conveniente;
 - ➔ raffreddamento arbitrario.

84) Rinvenimento, e come viene influenzato dalla T.

- Serve a ridurre gli effetti negativi della tempra sul materiale, nel caso questo presenti eccessiva durezza e quindi fragilità. La durezza diminuisce e la tenacità aumenta, si migliorano le caratteristiche di duttilità. Si passa dalla martensite (troppo fragile) ad una struttura alfa + cementite.
- Il ciclo termico comprende:
 - ➔ riscaldamento fino ad una temperatura determinata;
 - ➔ una permanenza per un tempo sufficiente;
 - ➔ raffreddamento fino a temperatura ambiente: raffreddamento all'aria o, per rapidità, in acqua quando la temperatura di rinvenimento è $< 500^{\circ}\text{C}$.
- Durante questo processo:
 - ➔ A circa 180°C , se c'è ferrite gamma residua si trasforma in martensite.
 - ➔ A circa 250°C , la martensite si decompone, perde C che finisce nei carburi metastabili $\epsilon e \chi$; si ottiene una struttura simile alla bainite.
 - ➔ A circa 400°C , i carburi metastabili $\epsilon e \chi$ si sciolgono nella ferrite alfa e precipitano i carburi.

85) Un rinvenimento segue:

- La tempra.

93) Valore del coefficiente di incrudimento.

$$n = \frac{5}{10 + d^{-\frac{1}{2}}} - \sum_{i=1}^n \alpha_i (\%)_i$$

- Varia tra 0 ed 1.

94) I laminati a freddo destinati a ricottura statica:

- Devono essere avvolti a temperatura più bassa possibile.

95) Cosa sono le atmosfere endotermiche?

- Atmosfere controllate. Sono atmosfere particolarmente indicate per i trattamenti termici, create tramite generatori endotermici che producono un gas (oppure una miscela di gas) endotermico, la cui composizione è formulata in modo da garantire un ambiente protettivo oppure da originare utili interazioni col materiale portato ad alta temperatura.

96) Come evitare creep ?

- evitare grani troppo fini e aggiungere Nichel

- a

Leghe di alluminio.

Utile?) Leghe di Alluminio.

- Al 1000: Alluminio.
- Al 2000: Alluminio + Rame (Applicazioni strutturali).
- Al 3000: Alluminio + Manganese.
- Al 4000: Alluminio + Silicio.
- Al 5000: Alluminio + Magnesio.
- Al 6000: Alluminio + Magnesio + Silicio.
- Al 7000: Alluminio + Zinco (Aeronautica).
- Al 8000: Alluminio + Litio (o altri elementi).

97) Leghe di alluminio 6000.

- Alluminio + Magnesio + Silicio.

98) Lega di Al 7000.

- Aeronautica: Alluminio + Zinco.

99) Rafforzamento delle leghe di alluminio.

- Incrudimento, cioè per deformazione plastica a freddo.

Utile?) Le leghe di alluminio contenenti rame non si saldano.

Utile?) Il prezzo delle leghe di alluminio è elevato a causa del processo di fabbricazione.

Utile?) Le leghe di alluminio con formazione Al_2O_3 forniscono una protezione estremamente resistente alla corrosione atmosferica.