



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1756A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Marchisa Paola

MATERIA: Materiali per l'aerospazio - prof. Biamino

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.**

2-MARZO

ESAME: 16 domande da 2 punti (brevi) x 2h

INTRODUZIONE

4 materiali utilizzabili sono principalmente:

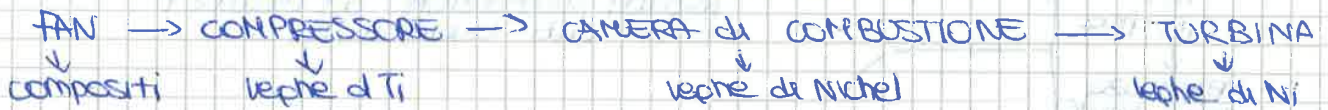
- materiali ceramici (+ietzi) → barriere termiche Alluminio/SiC/NC/
B-piere/respire
- materiali polimerici (+ elastomeri) → matrici per compositi PE/PP/PEE/PC/PS/PEEK/PA
- materiali metallici → Acciai - Al - Ti - Ni - Cu - Zn leghe ferrosiche/epassiviche

Tutti questi possono essere combinati insieme per creare materiali compositi o ibridi (matrice di diverso materiale aspetto al rinforzante). Il rinforzante è tale perché migliora sempre le proprietà della matrice.

PROPRIETÀ CONTROLVANTI: quelle che ci interessano dal punto di vista tecnologico

- **DENSITÀ** → volta al minor peso $\text{massa} \times \text{unito di volume}$
- **COSTO** del materiale e della tecnologia produttiva per unito di massa
- **RESISTENZA** a trazione, creep, a fatica → **PROPRIETÀ MECCANICHE**
- **PROPRIETÀ TERMICHE**: conducibilità, CTE, acciaggio termico → sopportare sollecitazioni
- **PROPRIETÀ CHIMICHE**: reazioni chimiche (ossidazione - riduzione) che possono avvenire in seguito alle condizioni ambientali
- **PROPRIETÀ OTTICHE**
- **PROPRIETÀ ELETTRICHE**
- **PROPRIETÀ MAGNETICHE**

AEREO: MATERIALI STRUTTURALI



+ ASSE CENTRALI: acciai

+ INVOLUCRI ESTERNI: compositi e alluminio per la prima parte
leghe di Ti / Ni per la seconda

→ + Temperatura
+ Velocità (supersonica Ti → Ni)

Acciaio: per componenti molto sollecitati ma a basse temperature

↓ - buona conducibilità termica
 mantengono questi requisiti anche ad alta T

Importante soprattutto la resistenza al ciclo termico
 studiata con l'indice TSR

$$TSR = \frac{\sigma_k (1-\nu)}{E \alpha}$$

- σ res. del materiale
 - κ conducibilità termica
 - ν coeff. di Poisson ~ 0,3
 - E modulo elastico
 - α CTE
- ↓
non è molto impattante

La conducibilità termica limita la presenza di differenze di temperatura nel materiale

Più è rapido il materiale, più è sottoposto a criccare per ciclo termico o per shock termico

Ma TSR per le superleghe di Nichel è molto elevato rispetto a tutti gli altri materiali.

STORIA: - forgiatura (Hastelloy)

- migliorare la composizione chimica
 - migliorare la tecnologia produttiva → colata → **CAST Alloy**
 - solidificazione direzionale ▲
 - colata di tipo single crystal ▲
- } prima linea ○

COMPOSIZIONE CHIMICA

Esistono le superleghe di Nichel, di Cobalto e di Nichel-ferro.
 Ma Ni, Fe, Co non danno prestazioni elevate da soli, dobbiamo migliorare le prestazioni

Nichel: CFC fino a T_{fus} di 1455°C; reticolo con massimo numero di sistemi di scorrimento
 ↓
 elevate duttilità

Ferro: CCC ↔ CFC ↔ CCC
 910°C 1394°C 1538°C

Cobalto: esagonale ↔ CFC a 400°C

↓
 minor numero di sistemi di scorrimento
 ↓
 fragilità

T_{fus} = 1495°C

↓
 inserire alliganti significa portare la CFC a T_{omb}

↓
otteniamo carburi e precipitati
 ↓
 rafforzano il materiale

SUPERLEGHE di NICHEL :-50-70% Ni

- 10-25% Cr - entra in soluzione solida e migliora la resistenza all'ossidazione

- Al-Ti-Nb 0-10% danno un precipitato intermetallico
 → se bene rafforzate per precipitazione

- Altri elementi: Co (20%), Mo, W, Ta, ...

Le superleghe di cobalto non possono essere rafforzate per precipitazione. (caricando quindi prestazioni meccaniche inferiori)

Possiamo avere una matrice γ con dei luchi di γ' (per vedere la fase γ' dobbiamo fare un attacco selettivo perché se no non la distinguiamo dalla matrice)



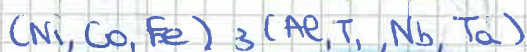
• Matrice rafforzata per soluzione solida + precipitazione di seconda fase

Le precipitati intermetallici è sempre della forma:



per esempio: Ni_3AE + sostituzione in parte di AE con Ti e Nb e viceversa. Anche le Ni può essere sostituito da Co e Fe.

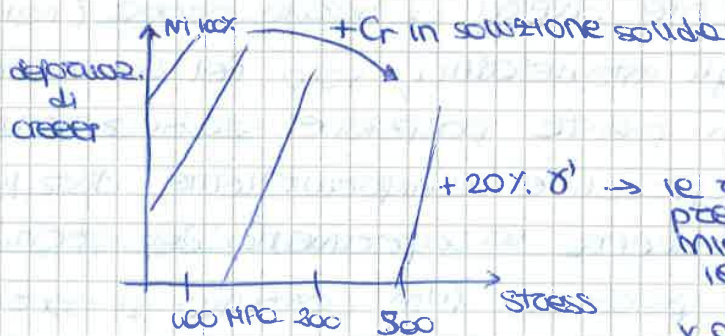
Ottenuto un intermetallico complesso:



① Le SOLUZIONI SOLIDE il reticolo della matrice è quello del Ni quindi OFC.

AE: effetto di rafforzamento elevato per sol. solida → ma da precipitati intermetallici
 Fe-Ti-Ta-Co rafforzano poco.

Le rafforzamento si ha per lavorazione di distorsioni, che distorcono il reticolo e: rafforzano il moto delle dislocazioni.



→ il rafforzamento per precipitazione è il migliore per ridurre il creep
 ↓
 e questo le leghe di Co non sono buone

② Le precipitati intermetallici si differenzia per la struttura

- Cristallino:
- Ni_3AE OFC → solo questo ha la stessa struttura della matrice
 - Ni_3Ti esagonale compatto
 - Ni_3Nb ottaedrico corpo centrato
 - Ni_3Ta tetragonale corpo centrato

Nei intermetallici misti, si mantiene la struttura fino a circa il 60% dei sostituenti.

e la resistenza a fatica

La stechiometria può essere differente

4 prami carbonizi de fusio che si ottengono sono di tipo MC, con i trattamenti termici otteniamo $M_{23}C_6 + \gamma'$ e la cosa può ancora evolvere

Ne carbonio viene aggiunto in piccole quantità e peggiora la resistenza alla corrosione del materiale perché tende a formare un carburo di cromo, lasciando meno cromo libero disponibile per la formazione di ossido superficiale.

④ Boro

Ne boro agisce in modo simile al carbonio: M_xB_y

e anche i boruri stabilizzano le bordi di grano.

Tipicamente il boro si colloca nelle vacanze tetraedriche (più numerose nei bordi di grano) e quindi non si formano nel grano e non ostacolano i movimenti delle dislocazioni.

Anche in questo caso le composizioni possono essere estremamente complesse.

[TAVOLA 6.1 : ciascun elemento con principale meccanismo rinforzante]

→ Ne rischio è che si formino fasce che non vogliamo che possano ridurre le proprietà meccaniche, sono comunque fos i intermetalliche:

A_xB_y con A e B metalli

$A \neq Ni$

- fase sigma σ : $(Cr,Mo)_x(Ni,Co)_y$ Stechiometria $\neq 1:3$

- fase eta η : $(Cr,Fe,Ni)_x(Mo,W,Cr)_y$

- fase di doles.

Un graino di slip, piacchette, sono facilmente riconoscibili e per la loro forma le punte agiscono come concentrazione degli sforzi e quindi di incomincio cricca.

Con un trattamento termico ottimizzo la formazione di composti evitando questi composti nocivi!

Non contano soltanto i livelli a cui fare l'isoterma, ma anche la velocità di raffreddamento: quanto più è maggiore tanto saranno più fini i precipitati, ma questo è anche in parte determinato dalla permanenza in temperatura si sceglie: - livello di precipitazione

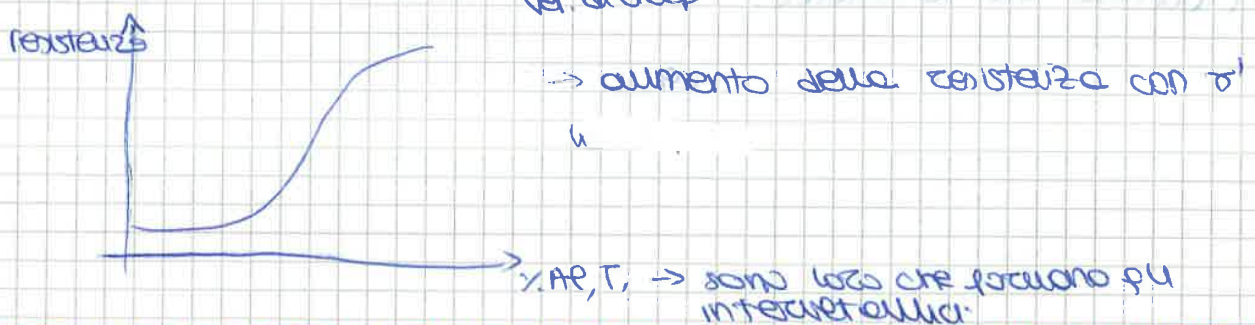
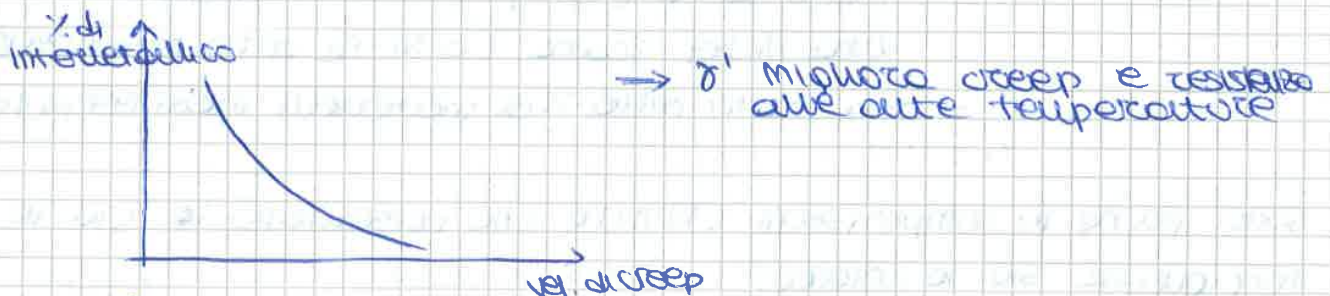
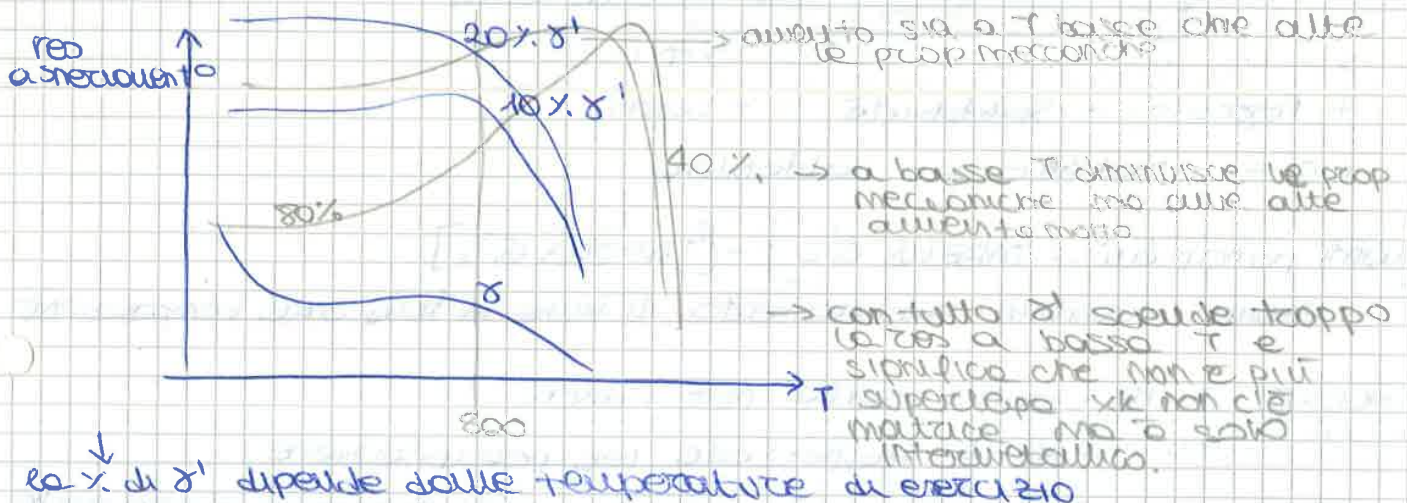
- tempo di precipitazione → minimo
- velocità di raffreddamento → massimo

Discute i TT anche i carburi variano: diventano più piccoli e si formano a bordo grano.

Per studiare le microstrutture possiamo usare un attacco acido sull'intermetallico o sulla matrice indistintamente.

SCOPO del TT: - aumentare δ'

- regolarizzare distribuzione
- carburi
- regolarizzare forma e dimensione



PRODUZIONE delle SUPERLEGHE

I nomi delle superleghe sono nomi commerciali che poco ci dicono sulla composizione degli acciai.

Le differenti leghe si differenziano con le sigle:

- AM: ottenute per metallurgia delle polveri
- MA: allungazione meccanica
- ODS: rafforzate per dispersione di ossidi (Y_2O_3)
- DS: solidificazione direzionale da casting
- SX o SC: solidificazione monocristallina da casting

Abbiamo quindi tre tecnologie produttive:

- colata
- forgiatura
- metallurgia delle polveri

Possono quindi essere seguite differenti strategie nella scelta della composizione e della microstruttura della superlega in dipendenza dall'impiego a cui è destinata.

- Le superleghe che operano a T basse devono avere elevata resistenza quindi una struttura policristallina con grani piccoli. Sono ottenute per forgiatura e il controllo del creep può essere affidato alla precipitazione di carburi e boruri e alla presenza di elementi che stabilizzano le grane.
- Le leghe che operano ad alte T sono ottenute per colata (normale/direzionale/ai monocristallo) e devono essere maggiormente resistenti al creep (i grani cristallini saranno molto grandi). Si utilizzano spesso la solidificazione direzionale, il monocristallo o leghes ODS.

Quando si produce un componente in superlega esistono due vie principali:

- del plastica:
 - metallurgia del lingotto o forgiatura
 - metallurgia delle polveri
- colata

Con la prima otteniamo grani più fini, maggior resistenza a trazione e snervamento, a fatica, all'impulso e maggior durezza.

Con la seconda otteniamo grani più grossi e maggior resistenza al creep.

VIM: processo comune a tutte le vie. → ci dà la composizione chimica si introducono gli elementi in un crogiolo ceramico e vengono portati a fusione. Il campo magnetico generato dalle spire che circondano il crogiolo provoca il mescolamento del fuso. Con un crogiolo di Al_2O_3 evitiamo le contaminazioni.

lavorando in vuoto evito le contaminazioni di O_2, H_2, N_2 . Posso anche partire da scarti di superlega in cui aggiungo i correttivi.

la velocità di raffreddamento non è controllata quindi ottergo un getto con microstruttura grossolana e non omogenea.

Se il getto così prodotto, per via della sua microstruttura, non può venire lavorato per deformazione plastica perché i difetti potrebbero innescare cricche che porterebbero a rottura.

Per questo si effettuano Re-Melting di tipo ESR o VAR.

METALLURGIA del LINGOTTO:

Sul lingotto ottenuto dal VIM si effettua un Re-Melting.

ESR: Electroslag Remelting



Il lingotto fonde da elettrodo, la lingottiera chiude il circuito e circola corrente tra lingotto e lingottiera.

La scoria è un fluoro di calcio e protegge il lingotto. In questo modo il lingotto che si forma non vede l'aria.

Il processo lavora con corrente alternata.

La scoria è un materiale ad alta resistenza e per effetto Joule aumenta molto la sua temperatura che supera la T_{fus} del lingotto grossolano fondendolo. In questo modo cadono delle porzioni di superlega nella lingottiera a causa della maggior densità della superlega rispetto alla scoria.

Si crea un film di liquido che solidifica man mano che si forma un altro film sopra ed essendo piccola la porzione di liquido che solidifica si riesce ad ottenere una microstruttura più controllata ed omogenea.

METALLURGIA delle POLVERI

Si polverizza il lingotto ottenuto dal vim con l'ATOMIZZATORE: si ottiene una polvere alligata che verrà sottoposta a pressatura a caldo (isostatica) (pressione di gas o di liquido in vuoto). → HIP
La forma del contenitore di pressatura dà la forma all'oggetto.
Durante la pressatura si ha la sinterizzazione delle polveri e la conseguente realizzazione del componente massivo.

Il processo può essere:

- near net shape: si ottiene il componente finale e ha un minor scarto nelle fasi successive
- forma alligata del componente su cui si esegue def. plastico.

Di solito, le superfaccie che hanno maggior quantità di alliganti sono prodotte per metallurgia delle polveri.

ATOMIZZATORE

Si cola il materiale e il fuso viene spacciolato in una apertura che viene investita da gas ad alta pressione (upello). Si formano goccioline separate che si solidificano prima di arrivare a contatto con il reattore o con le altre particelle.

Si ottengono così particelle sferiche perfette (in teoria).

Non importa la microstruttura iniziale.

→ se l'atomizzatore è piccolo toccano le pareti e non sono più sferiche.

Con particelle sferiche perfette la sinterizzazione è favorita.

Al fondo del reattore ricade la polvere che verrà poi divisa per granulometria.

Il gas usato è inerte (Argon o Elu), non uso Azoto perché questo può ossidare il metallo fuso.

Esistono diversi impianti in base alle caratteristiche proprie ma il metodo di funzionamento del processo è sempre uguale.

Con la metallurgia delle polveri è molto più speso di materiale e i passaggi di lavorazione successive rispetto alla metallurgia del lingotto.

Un disco di compressore è solo stato studiato con la metallurgia delle polveri, in realtà non si è ancora prevista la realizzazione di un disco perché può rimanere una richiesta.

quindi un composito con rinforzante ceramico.

L'alligazione meccanica consiste in:

- miscelazione, frantumazione e omogeneizzazione delle polveri
- compattazione
- sinterizzazione
- def. plastica e ricristallizzazione

Si usano mulini a sfere (ceramiche) al cui interno si inserisce la superlega sia come miscela alligata sia come miscela di componenti necessari per la composizione chimica desiderata, più l'ossido di itrio.

Le particelle metalliche si debolcano plasticamente e si legano meccanicamente (alligazione). Dopo questa fase segue la normale metallurgia delle polveri: mettiamo la miscela ottenuta nell'hot isostating pressing e poi la sottoponiamo a debolcazione plastica.

Ottengo sempre leghe policristalline (monocristalline si ottengono solo con le casting).

Queste superleghe sono in competizione con quelle single crystal: componenti destinati a lavorare alle alte T.

COATA-CASTING

VIM \rightarrow unpozzo \rightarrow casting $\left\{ \begin{array}{l} \text{solidificazione direzionale / single crystal} \\ \text{solidificazione equassiale.} \end{array} \right.$

Di solito le superleghe che raggiungono le T più elevate sono ottenute per colata o per metallurgia delle polveri.

Migliori delle single crystal ci sono solo le Addizioni di reppo.

CASTING TRADIZIONALE - FUSIONE A CERA PERSA

Si fa una forma in cera del componente: un albero con un asse centrale su cui si attaccano i componenti.

Si immerge le tutto in uno slurry ceramico con leganti polimerici. Si essicca le tutto e si ripete l'operazione più volte. Si inserisce in forno e la cera cola via: rimane un guscio ceramico cavo in cui coliamo le metallo fuso.

COVATA SINGLE-CRYSTAL

Anche in questo caso vogliamo una composizione ad hoc simile alla covata direzionale.

Alla radice della palette inserisco un selettore di grano che seleziona un solo grano che cresce direzionale.

I selettori di grano sono evoluti in sistemi a spirale più efficienti.

Non avendo più bordi di grano posso togliere del tutto il carbonio dalla composizione.

Si riduce progressivamente C, Zr e B per la stessa ragione.

Si è visto che introducendo del renio si migliorano le proprietà del componente, però questo appartiene alla classe degli elementi strategici cioè costosi e poco abbondanti.

Questo favorisce la crescita dei precipitati di δ' a caldo.

Per lo stesso motivo si è passati al Rutenio.

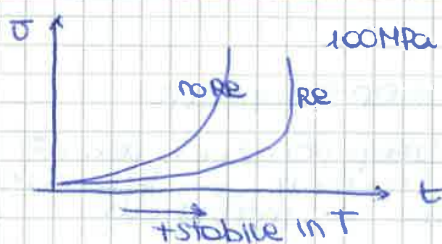
Il Rutenio entra in soluzione solida, ostacola fortemente le dislocazioni e controlla la crescita del δ' che a caldo non tenderà più a crescere mantenendo le dimensioni ottimali.

1^a Generazione \rightarrow no Re

2^a-3^a Generazione \rightarrow + Re

4^a Generazione \rightarrow - Re e + Ru

La superficie con il Rutenio si deforma di meno.



res a creep in funzione del t
 \rightarrow le curve si spostano più a destra anche se passo da solidificazione policristallina - direzionale - single crystal

Alla fine del processo bisognerà poi togliere il selettore di grano dal pezzo finito.

Tutto dipende dalla temperatura di lavoro.

Se la temperatura è elevata le ODS diventano competitive con le single crystal (sopra 1.000°C)



Sopra 1.000°C le ODS sono più performanti, sotto no

diminuisce sia con l'aumentare del carico che con l'aumentare della T .

Spesso vogliamo conoscere il carico che ci consente una vita di TOT ore ad una determinata temperatura (diagramma i dati di creep in un altro modo: considero le coppie di valori di sollecitazione e temperatura che apportano la rottura e creep dopo un certo tempo).

Un altro metodo prevede di utilizzare il parametro di Konser-Miller:

$$PLM = T(k) [20 + \log(t)] \cdot 10^{-3}$$

\swarrow questo costante può variare
 \searrow tempo di rottura



COMPORIANENTO A FATICA

Le prove di fatica sono di diverso tipo! Conchiamo le prove con una sollecitazione che di per sé non è in grado di portare a rottura il materiale, ma i continui cicli lo portano a rottura.

4 cicli possono essere: - assiali

- a flessione alternata
- a flessione rotante
- a torsione

La Temperatura di solito è costante.

Esistono anche prove di fatica termomeccanica in cui si variano sia la sollecitazione sia la temperatura: ciclo meccanico + termico.

Esistono anche prove a fatica multiasiale sempre più in grado di simulare la condizione operativa.

Di solito però si varia la sollecitazione e si lasciano invariati le metodo di prova, il tipo e la forma di applicazione della sollecitazione, la frequenza, la T , l'atmosfera, etc.

DIAGRAMMA di WOLTCER



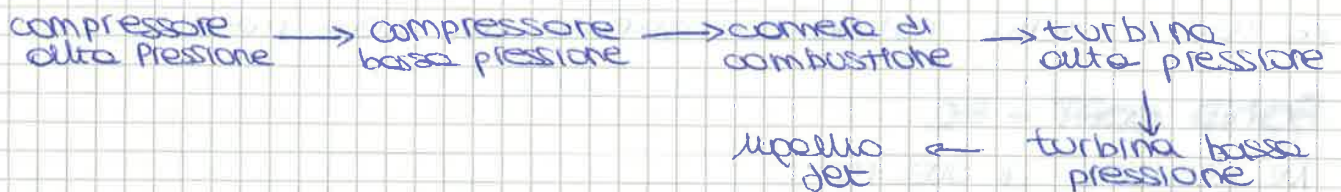
Le linee rappresentano la durata del componente alle diverse sollecitazioni.

BARRIERE TERMICHE TBC

Materiali ceramici per impieghi funzionali:

- Rivestimenti protettivi: barriere termiche TBC e barriere ambientali EBC
→ proteggere il metallo sottostante dalla temperatura o dall'ambiente.
- dispositivi di protezione termica TPS e rientro in atmosfera: protezioni passive, riutilizzabili o non (shuttle)
- ceramici ad altissime Temperature UHTC
- riparazione nello spazio

CICLO BRAYTON AERONAUTICO:



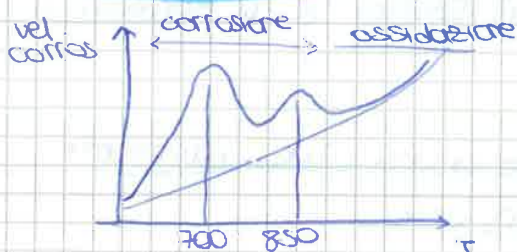
l'efficienza del motore aumenta quanto più in alto riesce a spostare ~~in alto~~ la temperatura. usa una barriera che fa sì che le componenti vedano una temperatura inferiore a quella reale.

l'entalpia, ovvero l'energia del gas che può essere convertita in lavoro, è funzione diretta della temperatura in trasformazioni che avvengono a pressione costante.

se utilizzo una barriera termica posso passare da un limite di 1100°C a un limite di 1200°C, aumentando così la temperatura di introduzione del gas in turbina ho migliori rendimenti e prestazioni e minori costi.

Bisogna tener presente quali sono i meccanismi di degrado dei materiali per queste condizioni operative:

- Corrosione: alta T + combustibile (es. zolfo)
 - ad alta T (> 900°C)
 - a bassa T (< 800°C)
- Ossidazione: dovuta all'aria di combustione e all'elevata T.



1° picco dovuto agli SOx

2° picco di corrosione acida o basica (hot corrosion)

In questi rivestimenti l'elemento appiuntito non interapisce molto con la superlega e si possono ottenere spessori maggiori e più controllati.

Questi rivestimenti sono identificati con la sigla MCrAlX

La limitazione principale di questi processi è quella di poter rivestire solo le superfici in vista.

TGO

strato di Al_2O_3 che si fa crescere facendo ossidare un po' di alluminio del BC.

TOP COAT - TC

Esistono due processi: - APS: in aria, per la camera di combustione (plasma spray)
- PVD: sottovuoto in atmosfera inerte per le palette.

Con entrambe le tecniche si deposita zirconia stabilizzata con itria, ottenuto una morfologia diversa a seconda della tecnica di deposizione:

- con la PVD otengo grani colonnari ↓ al substrato,
difetti: alta conducibilità termica
vantaggi: tolleranza agli sforzi
- con l'APS otengo strutture organizzate sull'orizzontale
difetti: bassa tolleranza agli sforzi
vantaggi: alta conducibilità termica

Le morfologie diverse creano barriere termiche con prestazioni molto diverse.

Non è indifferente il BC in base alla tecnica scelta per una questione di affinità.

MECANISMI di DANNEGGIAMENTO

Derivano quasi tutti dal BC:

- ossidazione del BC; il TC non fa da protezione all'ossidazione se il TGO cresce molto si può arrivare a rottura per la variazione di spessore
- effetti di sintenziazione: +E, +conducibilità
- differenza dei coefficienti di espansione termica: il metallo a contatto con il ceramico cede per fatica termomeccanica.

due subito riscaldano e per questo si creano bande orizzontali sul substrato. Le goccioline sferiche diventano lamine dette splat.

Si possono creare porosità.
Si parte da particelle o filamenti.

4 processi si differenziano a seconda del metodo utilizzato per fornire calore:

- Air Plasma Spray APS
- Vacuum Plasma Spray VPS
- Inert plasma Spray IPS
- Reactive Plasma Spray RPS
- High Pressure Plasma Spray HPPS

PROCESSO PVD

Un raggio elettronico (EB) ad alta energia fonde e fa evaporare da una barra termica il materiale da depositare in una camera in vuoto. I substrati sono riscaldati e messi in rotazione. Si ottiene un deposito colonnare con ritmi di 0,1-0,25 mm/s. Più è alta la temperatura, più i grani saranno più ampi; più è veloce la rotazione, più la struttura sarà irregolare tra la base e la parte più esterna.

La scelta dei materiali ottimali va fatta valutando a valutare tutte le proprietà del materiale. importante è considerare l'affinità del materiale con la striscia.

PROBLEMATICHE

A seconda della tecnica di deposizione otteniamo materiali con diversi difetti.

L'influenza dei difetti puntuali dipende dal materiale preso in considerazione.

La porosità e le impurezze influiscono negativamente sulla conducibilità termica.

Con la sinterizzazione in fase liquida otteniamo fasi vetrose a bordo grano che diminuiscono la conducibilità termica.

Si valuta il parametro di resistenza agli sbalzi termici TSR, indice della variazione di T_{max} che può subire un materiale senza rompersi.

MATERIALI INTERMETALLICI (Materiali Strutturali)

Per sostituire in determinati campi le superleghe in particolare nei componenti più freddi, per cercare di allegerire il motore: materiali con densità inferiore alle superleghe.

Gli INTERMETALLICI sono composti intermedi o fasi intermedie che si ritrovano nel diagramma di stato tra due elementi metallici.

Gli intermetallici più importanti sono quelli Al-Ni e quelli Al-Ti questi hanno densità minore, T fus maggiore, E simile alle superleghe e buona resistenza all'ossidazione (fino a 600-700°C non rivestiti).

Tuttavia esistono anche svantaggi dovuti alla fragilità del materiale: bassa duttilità a T amb, scarsa tenacità a frattura, elevata velocità di propagazione dello scalfatura a fatica.

INTERMETALLICI NI-AL

Esistono 5 intermetallici: Al_3Ni , Al_3Ni_2 , $NiAl$, $Ni_3Al(\alpha')$, Al_3Ni_5 ma solo due sono di interesse perché sono quelli con T_{fus} maggiore: $NiAl$ e Ni_3Al

Ni_3Al

Stabilito e abbandonato perché tra i due ha la T_{fus} minore e presenta maggior densità.

Se creo una superlega dove tutto è α' perdo le prestazioni a bassa temperatura però miglioro la resistenza meccanica ad alta temperatura.

È molto fragile.

$NiAl$

Ha elevata T_{fus} , una bassa densità e una conducibilità termica 3-8 volte più grande delle superleghe di nichel.

Studiati dai russi, anche le tecnologie produttive sono state studiate: si preferisce la ossidazione per via della fragilità. Si introducono Ga, Hf e Ti per migliorare la

1ª GENERAZIONE

Si prova per mettere insieme queste due fasi in cui le δ -TiAl sono la fase maggioritaria.

Tuttavia queste leghe non sono mai state utilizzate industrialmente.



Attorno al 48% di Al c'è il massimo della duttilità.



Le resistenze al di sopra dei 600°C iniziano a cedere e per questo non vengono usate.

A 700°C abbiamo la transizione duttile-fragile.

2ª GENERAZIONE

Si introducono elementi in lega in un quantitativo $< 5\%$ per migliorare la duttilità (Cr) e la resistenza all'ossidazione (Nb, Ta).

Attualmente si usa questa generazione, la 3ª è ancora in fase di studio.

Ti 48-2-2 (Al-Cr-Nb) è la più importante.

Nb, Ta, Mo sono reattori che aumentano la res. all'ossidazione, si aumenta così la temperatura di possibile applicazione.

3ª GENERAZIONE

Incremento degli alliganti:

- δ -TiNb - Al + Nb

- δ -TiNb - Al + Nb + Mo no Cr

Questi materiali sono in continua fase di studio e si cerca sempre di migliorarli.

Con la 2ª generazione abbiamo una perdita di prestazioni meccaniche oltre i 700°C.

Con la 3ª generazione arriviamo a livelli di resistenza di 800 MPa.

MICROSTRUTTURA

La fase δ è tetragonale a focce centrate: la dimensione c è maggiore di quella a.

Come scegliere la microstruttura? con dei Trattamenti Termici.

Le temperature più importanti sono $T_{transus}$ e $T_{eutettoidica}$.

• Portando le materiale a $T_1 > T_0$ e lo si mantiene in isoterma, tutto le materiale si trasformano in α . Se poi si abbassa velocemente la T , il materiale a T_{omb} si trasforma in $\alpha_2 + \gamma$ perché α non è stabile a T_{omb} in struttura fully lamellar.

• con $T_0 < T_2 < T_e$ le materiale si trasformano in $\alpha + \gamma$. A T_{omb} α si trasforma in $\alpha_2 + \gamma$ in struttura lamellare e γ rimane invariata. Ottepo quindi una Struttura duplex in cui la percentuale di lamellare si sceglie giocando con la temperatura a cui porta le sistema: più lo T_e alta, più aumentano i picchi lamellari perché ho meno α .

Con T minori, ottepo più γ e strutture più equiassiche.

4e' caso sta sempre nel raffreddare velocemente.

Gli allunganti cambiano le linee del diagramma di stato e quindi è più difficile scegliere la temperatura di riscaldamento.

Non esistono diagrammi di stato per gli allunganti, per cui si fanno analisi DSC e TMA (thermal mechanical analysis).

DTA e DSC permettono di studiare i fenomeni endotermici o esotermici salendo in temperatura. Le transizioni di fase del TMA sono esotermiche e creano dei picchi nel grafico.

Con questo grafico posso ottimizzare la temperatura di trattamento.

La TMA studia l'allungamento del materiale per effetto del CE. Quando avviene una trasformazione di fase cambiano tutti i parametri del grafico e quindi osserviamo un gradino. Ottepo la stessa curva per entrambe le misure ma varia l'ordinata: - calore emesso per DSC e TMA
- derivato dell'A% per TMA

ADDITIVE MANUFACTURING

- tecnologia con sorgente laser
- tecnologia con sorgente fascio di elettroni → Electron Beam Melting EBM (tecnologia brevettata da svedesi)

↓
Si vuole ottenere le componenti e non la lega.

* L'Additive Manufacturing è un'alternativa al casting per produrre palette in tita per le turbine di bassa pressione.

ELECTRON BEAM MELTING

La polvere della lega di interesse (più allungata e atomizzata) viene depositata con un rullo su un piano di lavoro e poi il fascio di elettroni la fonde e la polvere secondo le disegni del componente. Appena il fascio di elettroni si allontana abbiamo la risolidificazione del materiale ottenendo un componente massiccio.

Poi si abbassa il piano di lavoro e si deposita un nuovo strato di polvere che andrà a fondere in modo localizzato. In questo modo il pezzo cresce in altezza.

Solitamente utilizzo due toppe di particelle per avere più una buona densità al verde.

Si utilizzano temperature elevate e alti gradi di vuoto.

Gli spessori interessati sono: 0,05 - 0,2 mm

Si riscalda neppure anche un po' lo strato sottostante in modo da garantire l'adesione degli strati ma non troppo perché se no avrei crescita dei grani.

La massa della polvere dopo esser stata setacciata può essere rimessa in macchina perché lavorando in vuoto non viene contaminata.

versatilità di creare anche componenti di forma diversa

LASER SINTERING

Il calore è fornito da un fascio laser (a terre rare) lavora in modo uguale all'EBM.

- hatching distance: distanza tra un passaggio e l'altro: più è vicina, più ho fusione, più crescono i grani e impiego più tempo. Più è lontana, maggiore è la velocità, minore è la fusione.
- con che filosofia si muove per disegnare le componenti

Solitamente un'EBM viene seguita da un hot isostatic pressing (HIP) per essere sicuri che non ci sia porosità. Tuttavia non è molto importante perché non ottengo un'elevata porosità residua con l'EBM.

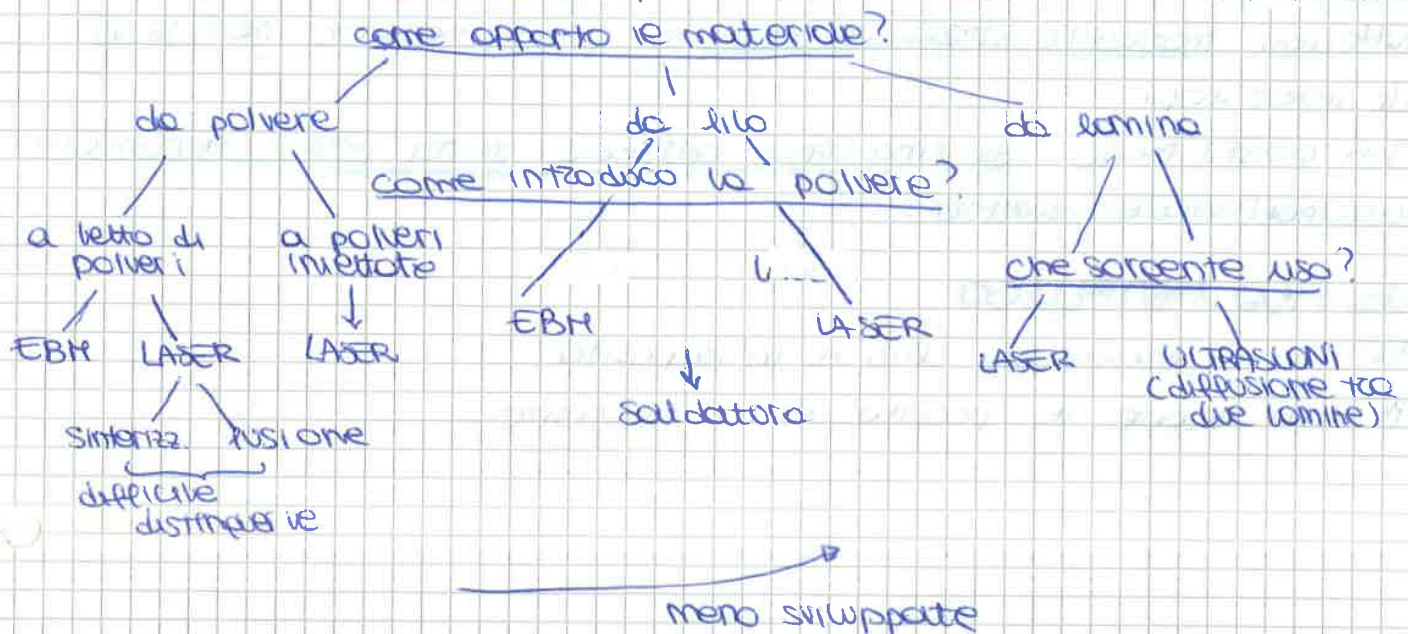
otteniamo una microstruttura squassata su cui faremo i trattamenti termici ottenere microstruttura lamellare.

Possiamo da elevata durezza e res a trazione a T amb, o elevata tenacità, resistenza al creep e mantenimento delle proprietà meccaniche ad alta T (con la folly lamellar).

La tecnica EBM viene utilizzata molto nel biomedicale: in questo modo non abbiamo bisogno di stampi ad hoc ma solo le disegni con proprietà ad personam.

Non si possono creare cavità chiuse perché in questo caso non si può togliere la polvere da dentro.

VARIE TECNOLOGIE per la realizzazione di mat. metallici



SILICIURI

servono per incrementare ulteriormente le temperature

di MOLIBDENO

Nel diagramma di stato MO-Si troviamo 3 diversi intermetallurghi:

- MoSi_2
 - Mo_5Si_3
 - Mo_3Si
- } più interessanti

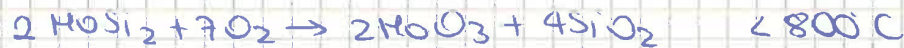
Le molibdeno aumento molto la densità.

di Niobio

- Nb_5Si_3
- NbSi_2

Temperature di fusione molto alte

PROBLEMA → ossidazione attiva alle basse temperature (600-800°C)
e passiva alle alte per entalpi.



Nell'ossidazione attiva si forma un ossido poco stabile che si disgrega portando a un degrado del componente.

Nell'ossidazione passiva si forma uno strato ben aderente nel caso del silicio (le Mo non è capace).

Inserendo del nitrogeno di silicio si crea uno strato passivante fatto di silice → livello di ricerca.

Essendo intermetallurghi i siliciuri garantiscono buone proprietà di resistenza ma comunque sono materie rare.

GLI ACCIAI

Dove? - asse centrale del motore

- ingranaggi e cuscinetti del motore
- sistema di antirullo

} $T < 200^\circ\text{C}$

→ circa il 10% del peso di un aereo è acciaio.

Caratteristiche! - grande resistenza meccanica

- grande resistenza all'usura

- alta resistenza

- lunga vita

- alta affidabilità

Sollecitazioni a cui sono soggetti: (diverse famiglie di carico)

- statiche: trazione, compressione, flessione, torsione
- dinamiche: impatti

→ massimizzare la resistenza

→ aprire sulla composizione chimica e sul trattamento termico

- fatica

→ precipitazione alle latiche

→ aprire sulla composizione chimica, trattamento di bonifica, trattamenti termochimici di indurimento superficiale, trattamenti meccanici superficiali

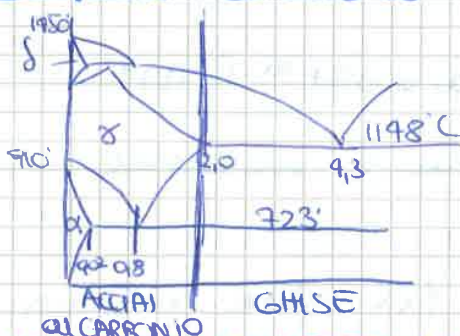
- superficiali: usura

→ aprire sulla composizione chimica, sul TT di bonifica, sul trattamento termochimico (non meccanico) superficiale

ossidazione e corrosione

→ aprire sulla composizione chimica (+Cr e Ni) o applicare rivestimenti superficiali (cromatura)

CLASSIFICAZIONE



- acciai al carbonio!

- $0,8 < \%C < 2,0$ acciai ipereutetoidici

- $\%C < 0,8$ acciai ipoeutetoidici

- basso/medio (0,3-0,6)/alto tenore di carbonio

- basso/alto legati

- inox

numero che rappresenta la struttura cristallina del reticolo.

Esistono poi sigle non unificate

A può essere un prefisso che indica la tecnologia produttiva dell'acciaio.

A può essere una lettera inserita tra il secondo e il terzo numero e indica variazioni nella composizione chimica.

A può essere una lettera come suffisso che specifica il requisito fondamentale di quell'acciaio.

ACCIAI INOSSIDABILI

In presenza di ossigeno sviluppano un sottile, duro ed aderente film di ossido di cromo, se il cromo presente in lega è superiore al 13%. Otteniamo quindi un'ossidazione passiva.

Questi acciai sono a basso tenore di C perché questo forma carburi sottraendo il Cr per la passivazione e quindi causando fenomeni di sensibilizzazione.

Fe_2O_3 non è un ossido protettivo

Cr_2O_3 è un ossido stabile e protettivo

SENSIBILIZZAZIONE

Se si formano carburi di cromo CrC, la percentuale di Cr nel carburo è molto elevata mentre nelle zone limitate la percentuale di Cr scende di molto dai livelli considerati protettivi quindi in questo spazio può partire l'ossidazione attiva.

Per evitare questo problema dello eutettore la localizzazione dei carburi stasid sotto i $370^\circ C$, oppure ridurre il carbonio e eutettore quindi la trasformazione martensitica, oppure aggiungere altri elementi (Ti, Nb, Ta) che formano carburi al posto del Cr.

ACCIAI INOSSIDABILI AUSTENITICI (serie 300)

L'austenite è una struttura ^{CC} di alta temperatura, servono alliganti che la stabilizzino a bassa temperatura (Ni e Cr)

C < 0,15%, Cr > 16%, 7% Ni

RAFFORZAMENTO per SOLUZIONE SOLIDA

La soluzione solida può essere:

- sostituzionale: se l'elemento introdotto ha raggio atomico maggiore o uguale a quello dell'atomo che forma il reticolo
- interstiziale: se l'elemento ha raggio minore.

Entrambe le soluzioni creano delle deformazioni nel reticolo cristallino che ostacolano le dislocazioni: l'ostacolo opposto al movimento delle dislocazioni comporta una maggiore difficoltà alla deformazione plastica cioè all'aumento della resistenza alla deformazione.

Alcuni elementi, che sono particolarmente efficaci da questo punto di vista (C, N, P, Si) purtroppo peggiorano radicalmente la tenacità a frattura e incrementano la temperatura di transizione duttile-fragile.

Gli alliganti modificano le diagramme di stato allargando o diminuendo le campi di esistenza della fase austenitica. Per questo gli elementi si dividono in:

- elementi che allargano le campi di esistenza della fase δ
Ni - Mn - Co - W - Zn - C - N
- elementi che restringono le campi δ
Cr - V - Mo - W - Al - Ti - Si - P - B - S - Zr

RAFFORZAMENTO per PRECIPITAZIONE

Se due o più elementi presenti nella lega presentano affinità chimica sufficiente possono combinarsi dando origine a precipitati che si interpongono tra i grani cristallini della lega. In questo modo raffortano le movimento delle dislocazioni.

Questi precipitati sono costituiti da parti legami chimici e quindi presentano durezza elevata e accrecano la resistenza a trazione e allo snervamento del materiale.

Le dislocazioni possono attraversarli solo in seguito ad un aumento del carico applicato o tenere deviare formando anelli di dislocazioni attorno ai precipitati.

Dopo la formazione di unipetti o simili abbiamo una lottatura (in macchina o gesto) o una rottatura.

Gli atomi di soluto, i precipitati, i BG e le dislocazioni interagiscono con le dislocazioni in movimento responsabili della def. plastica e le rallentano.

Il rafforzamento più efficace si ha con la soluzione solida + precipitazione, e in seguito la sola precipitazione

TRATTAMENTI TERMICI MASSIVI

Per rafforzare le componenti.

La storia termica di un materiale determina le sue caratteristiche meccaniche e la microstruttura.

I trattamenti termici possibili sono:

- Ricottura
 - Normalizzazione
 - Bonifica (tempa + Rinvenimento)
- lento raffreddamento → strutture previste dal diagramma di stato
- struttura metastabile dura e resistente ma di bassa tenacità
- raffreddamento veloce

RICOTTURA COMPLETA

Riscaldamento in campo austenitico + raffreddamento lento in forno spento.

Si ottengono microstrutture previste dal diagramma di stato
Evitare gli effetti delle lottazioni meccaniche e del TT.

NORMALIZZAZIONE

Riscaldamento in campo austenitico + raffreddamento in aria calma.

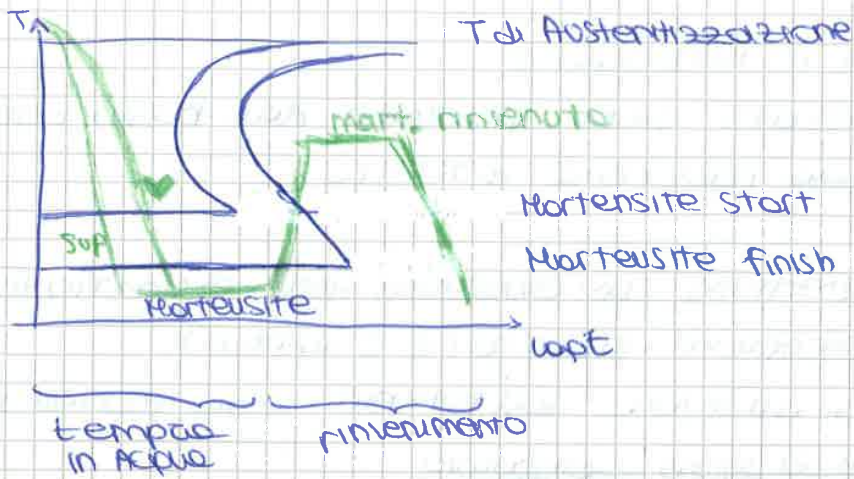
Gli acciai autotempranti danno luogo alla trasformazione martensitica.

Ottengo microstrutture previste dal diagramma di stato ma più fini.

RICOTTURA di DIMENSIONE

Si riscalda al di sotto della temperatura di austenitizzazione.

Si riducono le tensioni interne dovute alla deformazione a freddo e si aumenta la lavorabilità.



Le componente reale ha una certa massa e quindi non è assicurata la trasformazione martensitica di tutto il materiale. Trovo diverse curve per le core e per la superficie! Le core si trasformano dopo e può comportare l'insorgere di cricche dovute dalla variazione di volume.

Quindi per pezzi componenti si fa una tempa differente.

TEMPRA DIFFERITA:

interrompo la tempa prima che inizi la trasformazione per far raffreddare la temperatura tra core e superficie con una tempa in olio caldo, e poi faccio avvenire la trasformazione martensitica con tempa in acqua.

Perciò non tutti gli acciai sono temprabili

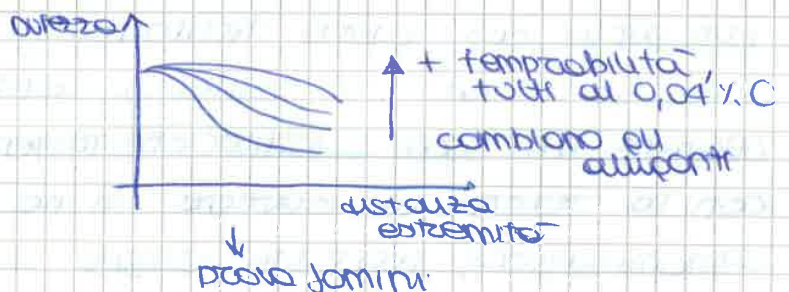
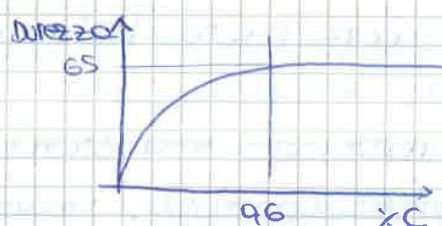
La TEMPRABILITÀ di un ACCIAIO riguarda!

- il massimo livello di indurimento raggiungibile in superficie
- la massima profondità di tempa.

Entrambi gli effetti sono influenzati dalla composizione chimica dell'acciaio.

Il primo effetto dipende dal tenore di Carbonio! esiste un limite massimo di durezza raggiungibile pari a 65 Rockwell C con circa lo 0,6% di C.

Il secondo effetto dipende dal tenore e dal tipo di elementi leganti.



è confinato agli strati superficiali; occorre però costruire spire che contornino efficacemente le pezzi.

La massima durezza possibile dipende dal tenore di carbonio. La trasformazione martensitica migliora le proprietà sull'uso e a fatica.

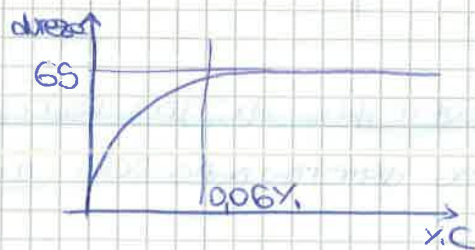
CEMENTAZIONE

Operiamo una diffusione superficiale di carbonio su un acciaio molto duttile.

Nel processo austentizziamo tutte le componenti quindi è inutile fare prima la tempra → la bonifica è fatta dopo la cementazione.

La cementazione può essere: - porosa: atmosfera di CO o CH₄
- solida: in cassetta, si utilizza carbon coke

Le durezze superficiali massime ottenibili sono di 65 HRC e le profondità di circa 1-2 mm



NITRURAZIONE

Si utilizza un'atmosfera di azoto: l'azoto entra in posizione interstiziale, ad un certo punto si innesca una reazione chimica che dà origine a un nitrato di ferro δ' . Aggiungendo azoto questo strato diventa un film continuo. Se ne aggiunge ancora si forma un diverso nitrato è più fragile e indesiderato per cui bisogna interrompere la nitrurazione per limitare la presenza di ϵ

Il nitrato δ' è un nitrato ad elevata durezza e presenta un basso coefficiente di attrito in scalfimento sull'acciaio.

Utilizzo una temperatura inferiore alla cementazione ma sono richiesti tempi più lunghi (70 h)

Microstruttura:

Nitrato ϵ in superficie
Nitrato δ'
Nitrato δ' + Acciaio
Acciaio ricco di N
cuore

la durezza diminuisce

500°C per cui non austentizzo
la tempra lo acciaio prima

residuo di compressione in superficie, benefico per la fatica.

Gli acciai alto resistenti ad alta tenacità a frattura hanno alti livelli di allunganti.

Gli acciai Maraging (a invecchiamento martensitico) sono leghe di ferro con pochissimo C: si ottiene una martensite diversa per deformazione da parte degli allunganti (come le Ni). Poi si esegue invecchiamento per far avvenire la precipitazione di intermetalluri (come nelle superleghe). Queste sono le leghe ^{di Fe} a più elevata resistenza, duttilità, tenacità e resistenza alla corrosione, però sono costose.

Non ottengo difetti

CRONATURA

Applico rivestimenti superficiali per la resistenza all'ossidazione e alla corrosione.

Si aggiunge uno strato di Cr che poi si trasformerà in ossido contribuendo anche all'elevata durezza superficiale.

→ res a usura + res a ossidazione/corrosione

Si effettua tramite processo galvanico solo che è inquinante per questo si preferisce la tecnica CVD.

LEGHE di TITANIO in sostituzione all'Al.

- Impiego fino a 700°C \rightarrow Temperature maggiori
- Utilizzate nei compressori: sia di bassa sia di alta pressione
- allegerimento: $\rho \sim 4,5 \text{ gr/cm}^3$ \rightarrow risparmio di massa
- Ti più alto resistenziale \rightarrow riduzione della sezione resistente \rightarrow risparmio di spazio
- res a corrosione maggiore delle leghe di Al ma non dell'Al puro.

Il Titanio è un elemento abbondante ma dall'estrazione complessa e costosa.

Caratteristiche: - elevata T_{fus} (1670°C)

- elevata reattività, si contamina facilmente dando origine a soluzioni solide molto stabili dure e tenaci
- elevato E e basso ρ , basso CTE , e bassa conducibilità
- res a ossidazione e corrosione

Le leghe di Titanio si dividono in:

- leghe α \rightarrow stabile a T_{amb} EC
- leghe β \rightarrow a $T > 850^{\circ}\text{C}$ si passa a CCC
- leghe $\alpha + \beta$ (es. lega Ti-6-4 (Al-V))

La struttura cristallina che si riesce a stabilizzare dà le proprietà specifiche alla lega: la fase β è facilmente delocalizzabile grazie alla buona duttilità del reticolo CCC, mentre la fase α è meno delocalizzabile e presenta forte anisotropia nel comportamento (per questo sono destinate agli usi ad alta T).

Per ottenere la fase β a bassa T devo aggiungere elementi allunganti che ne ampliano il campo come le Mo, V, etc.

Le leghe β come impiego vedono le basse temperature perché sono facilmente delocalizzabili al creep.

Siamo sull'asse estremo del diagramma di stato, verso il 100% di Ti, cioè siamo in una situazione diversa rispetto a quella degli intermetallici Ti-Al.

LEGHE α o NEAR- α → atto T

Al è lo stabilizzante principale e in quantità superiori al 4%. In peso forma un precipitato rafforzante α_2 (Ti_3Al) coerente con la matrice α del Ti

Sono leghe a buona saldabilità, difficilmente lavorabili perché EC e per questo mantengono bene le proprietà meccaniche anche a caldo (motore), resistendo al creep.

Queste leghe non possono essere rafforzate per trattamento termico.

Pensate per costruire gli acciai, quando vogliamo allegerire un componente, o l'alluminio, quando vogliamo estendere il campo di temperatura a cui può operare il materiale.

Caratteristiche: - Resistenza: minore degli acciai ad alta res, ma simile a quella degli inox, minore delle leghe $\alpha+\beta$ e β a T amb

La più importante* è Ti-3-2,5 (Al, V) utilizzata anche in campo criogenico perché non va incontro alla transizione duttile-fragile

Le leghe NEAR α contengono anche poco Fe e β .

Per rafforzare queste leghe possiamo:

- generare sol solido
- controllare la taglia del grano e quindi la V di raffreddamento ($+V = +$ grani fini)

Le strutture a grani grossolani hanno miglior tenacità a frattura, con grani piccoli però migliorano tutte le resistenze meccaniche.

- invecchiare il materiale tramite lavorazione a freddo

LEGHE β → alte resistenze

Non sono saldabili, ma sono le leghe a più alta resistenza meccanica (più utilizzate per campi strutturali).

Hanno una formabilità migliore dovuta al reticolo CCC.

Si può rafforzare per RT ed è proprio per questo che hanno elevata resistenza.

questo elemento è facilmente soggetto alla contaminazione perché presenta elevata affinità con O, N, H. → tutti i processi devono avvenire in vuoto.

Per ottenere queste complesse composizioni chimiche si utilizzano VIM + Remelting di tipo VAR.

In alcuni casi si richiede di limitare la contaminazione con l'ossigeno per mantenere la durezza più alta possibile e anche la tenacità a frattura → composizioni EU: l'ossigeno non deve superare le 0,13%.

Lo strato di ossido può rendere difficili le lavorazioni e viene detto q-come.

TECNICHE di LAVORAZIONE

- colata o coating → miglior res meccanica
 - forme complesse
 - il Ti è un liquido molto viscoso e riempire gli stampi con difficoltà → si utilizzano forni centrifughi
- deformazione plastica → miglior res a fatica e tenacità a rottura delle minori dimensioni dei pezzi
- metallurgia delle polveri
- additive manufacturing

Le strutture a pezzi fini presentano res meccaniche più elevate e più alti limiti a fatica. Le strutture a pezzi grossolani una più elevata tenacità a frattura.

FUSIONE a GERA PERSA

Anche in questo caso, il ceramico del fusco esterno non deve contaminare il metallo fuso quindi si usa zirconia e si lavora in vuoto.

Dato l'elevata viscosità del Ti si usa la colata centrifuga in cui il fuso è circolare, il fuso ceramico è in rotazione e per forza centrifuga il metallo fuso viene iniettato all'interno dello stampo.

Per effetto dell'alta pressione, la lamina si deforma e aderisce su uno stampo femmina.

È necessario una microstruttura equiaxiale a grani fini ($< 10 \mu m$), T elevato ($\sim 900^\circ C$ per le Ti).

Per applicare questa pressione si possono anche usare conduttori meccanici però l'aumento della deformazione è sempre dovuto al μp , cambiando eventualmente la sua direzione di Arrivo.

La T operativa è ovviamente variabile da lega a lega metallica ma deve consentire scorrimento viscoso.

A quella T tutti i grani cristallizzano quindi non rimane una microstruttura con grani direzionati \rightarrow non è necessario nessun trattamento di ricottura. Non si ha un effetto di rafforzamento per invecchiamento.

SUPERPLASTIC FORMING + DIFFUSION BONDING DB

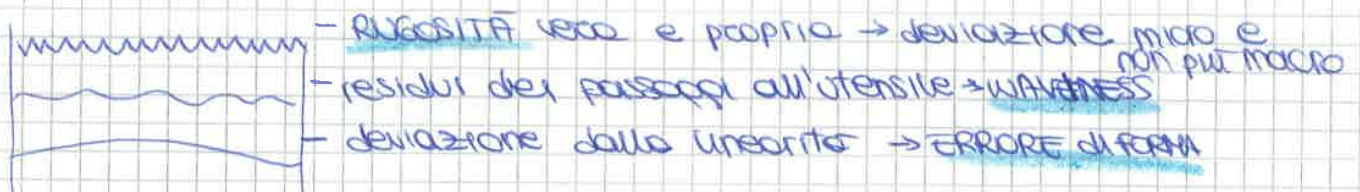
Per le forme complesse creo due semiparti con la tecnica del SPF e uso a volte aderire, faccio avvenire la giunzione con la tecnica del diffusion bonding.

Questo è una saldatura per diffusione allo stato solido, senza materiale d'apporto basale. Gli atomi dei due reticoli cristallini sono in movimento ad alta temperatura e danno origine a uno scambio di atomi tra le due parti perdendo l'interfaccia.

A causa della rugosità esisteranno pochi punti di contatto che daranno origine alla diffusione allo stato solido. Con tempi crescenti si arriverà ad eliminare tutta la porosità.

È necessario una rugosità minima per aver maggior efficacia del processo. Più la rugosità è alta, più è possibile che rimangano dei vuoti.

Diverse tecnologie per la superficie del componente



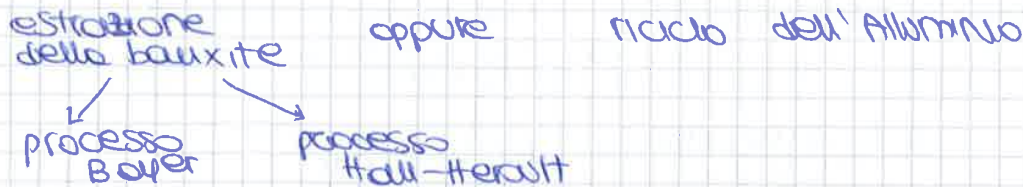
LEGHE di ALLUMINIO

Grande uso nelle strutture aeronautiche e aerospaziali per la loro leggerezza.

Proprietà:

- bassa densità dell'Al puro : $2,7 \text{ g/cm}^3$ → leggerezza
- buona resistenza alla corrosione e all'ossidazione (può diminuire a seconda degli elementi in lega)
- resistenza meccanica $\sim 700 \text{ MPa}$
- Modulo elastico $\sim 70 \text{ GPa}$
- non tossico, basso costo, buone proprietà elettriche, buon conduttore

CICLO PRODUTTIVO



Il minerale è composto dall'ossido di Al che viene portato in soluzione di idrossido di sodio NaOH ottenendo ossido di Al + fanghi rossi (da scaldare). questa fase viene chiamata digestione: si scioglie il materiale.

L'idrossido viene calcinato a 1100°C e si ottiene allumina pura.

Il processo elettrolitico consente di ottenere Al da Al_2O_3 in una cella elettrolitica in cui si porta in soluzione di criolite Na_3AlF_6 e Al_2O_3 a 950°C

Si utilizzano anodi di grafite e i cationi positivi di Al tenderanno a migrare verso il catodo e a depositarsi sul fondo della vasca. Il processo avviene ad alta T. e quindi si ottiene uno strato di Al puro.

Le reazioni che intervengono sono:



L'ossigeno monoatomico è estremamente reattivo e reagisce con l'anodo consumandolo e producendo CO

Si recupera l'alluminio fuso e lo si cola.

Sono possibili diversi tipi di colate:

Con la laminazione a caldo possiamo ottenere ricristallizzazione migliorando le caratteristiche del materiale e la duttilità perché si riducono le imperfezioni.

La ricristallizzazione può essere:

- dinamica: avviene insieme alla def. plastica
- statica: tramite successivo trattamento termico.

Con l'estrusione forziamo una billetta solida a passare attraverso una apertura. Può essere diretta o inversa a seconda di come agisce la forza spingente

Si ottengono componenti continui anche di sezione complessa ma sempre costante

Si scalda ma si mantiene il materiale solido; come per la laminazione posso avere ricottura.

Può lavorare a caldo, può essere facile la deformazione, minor tempo richiesto

LEGHE per Getti

Esistono due possibilità di colata:

- 1) forme a perdere con modello permanente (foratura manuale, in vuoto meccanica, etc)
- 2) forme a perdere con modello a perdere (colata a cera persa)
- 3) forme permanenti senza modello. (in conchiglia, pressocolata, etc)

FUSIONE IN SABBIE METALLURGICHE (1)

Si utilizza un modello permanente, un anima, che serve per dare forma alla sabbia. L'anima deve già presentare i canali di colata. Una volta creato la cavità tolgo l'anima e metto la lega fusa

COLATA A CERA PERSA (2)

COLATA IN CONGHIGLIA IN GRAVITÀ (3)

- stampi metallici che possono essere riscaldati.
- si può usare un repellente sulle superfici e distaccanti che facilitano l'estrazione
- rapida solidificazione → struttura fine
- ottime tolleranze e uniformità dimensionale grazie al fatto che il ritiro avviene nella materia
- condizionamento termico

Più aumento lo spazio interdendritico, più scende la resistenza (meno strutture fini).

Al variare delle condizioni locali di solidificazione si ottengono strutture con diverso grado di allineamento e conseguenti variazioni delle proprietà meccaniche.

La microstruttura ovviamente cambierà a seconda della geometria del componente per via delle diverse sezioni che raffreddano diversamente.

CLASSIFICAZIONE COMMERCIALE

Solo alcune composizioni possono essere trattate termicamente. Soltanto si fanno più di un alligante e otteniamo diverse serie di leghe.

Le leghe Al-Si sono leghe da casting non trattabili termicamente, quelle Al-Mn e Al-Mg sono solo da inacidimento; tutte le altre possono essere sottoposte a trattamento termico.

Per la nomenclatura si utilizza un codice a cifre ma la presenza di un punto indica le leghe da getti. Il primo numero identifica la serie della lega e la seconda dell'elemento alligante principale.

L'Aluminio puro non può essere trattato termicamente perché non avviene precipitazione.

Nella nomenclatura si possono introdurre anche lettere che indicano la lavorazione: - F: getto di fabbricazione - prezzo

- H: inacidimento

- W: soluzione solida

- T: trattamento termico

seguite da numeri che ne identificano l'entità e le specifiche.

MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO

- inacidimento per def. plastica → Al puro + leghe da def. plastica
- rafforzamento per soluzione solida → tutte le leghe
- rafforzamento per precipitazione → leghe da TT

Si possono raggiungere i 600MPa a trazione

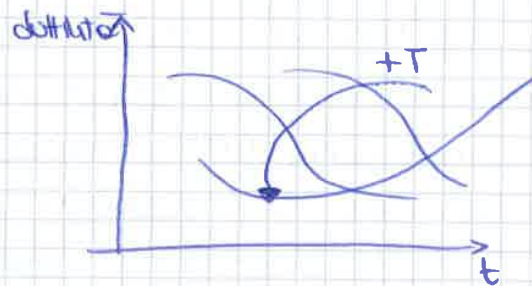
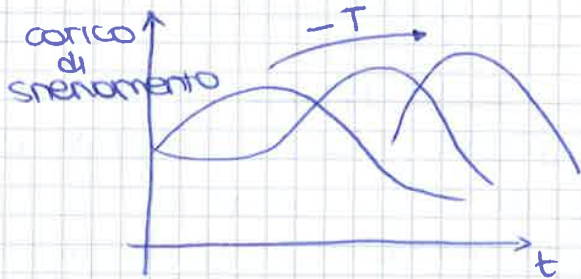
però si perde in duttilità e in allungamento percentuale.

con una struttura cristallina come precipitati coerenti (stesso reticolo della matrice \rightarrow no BG) o incoerenti (\neq struttura cristallina della matrice).

Questi precipitati poi coalescono e si accrescono in dimensione.

I parametri in gioco sono la temperatura ed il tempo per la solubilizzazione devo utilizzare una temperatura tale da entrare in campo α .

Per l'innescamento scelgo la T e il tempo guardando delle curve che mi garantiscono di non ottenere il superinnescamento. Trattando a T minori l'innescamento è più efficiente però servono tempi molto lunghi. Bisogna quindi cercare un compromesso.



Ogni volta che aumenta la resistenza, diminuisce la duttilità.

INCRODINAMENTO

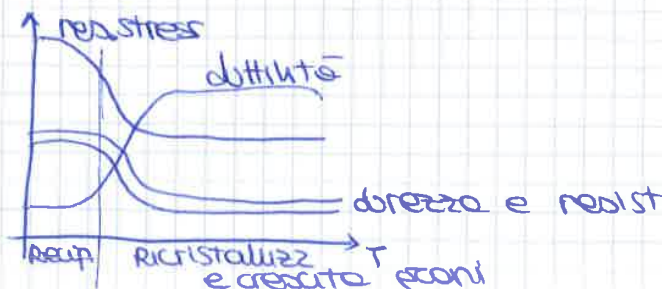
Questo rafforzamento determina la perdita di duttilità.

Con il trattamento di ricottura recupero un po' di duttilità.

La Ricottura è composta da due fasi:

- Recupero: le dislocazioni si riducono in numero
- Ricristallizzazione: i grani allungati ricristallizzano in grani equiaxiali

Gli stress residui diminuiscono fino ad annullarsi; la resistenza e la duttilità diminuiscono, ma si recupera duttilità.



Dopo la ricottura si può effettuare nuovamente del. plastica

LEGHE di MAGNESIO - leghe leggere

Densità basso $\approx 1,7 \text{ g/cm}^3$

Modulo elastico basso 45 GPa

Res. a rottura più elevata dell'Al $\approx 190 \text{ MPa}$

Non si utilizza Mg puro ma leghe in cui oltre al Mg si introducono allucanti.

Me Mg rende difficile la lavorazione all'utensile perché ha un' inflammabilità elevata.

Me valore del diametro atomico del Mg rende possibile la formazione di estese soluzioni solide con diversi elementi.

DESIGNAZIONE

Si utilizza un codice di 4 cifre: 2 lettere + 2 numeri

indicono i
principali
allucanti

placifica di
allucanti
introdotti

Eventualmente può esserci un'ulteriore lettera a suffisso che va a specificare la composizione chimica o la purezza della lega.

TIPi di LEGHE

- le leghe da fonderia sono le più utilizzate
- le leghe da def. plastica sono poche perché questo tipo di lavorazione è complicata.

Me magnesio ha reticolo EC, quindi con pochi proprietà di scorrimento e la def. plastica è molto difficile.

Si può avere def. plastica a caldo perché a $T > 250^\circ\text{C}$ si attivano alti sistemi di scorrimento su piani prismatici.

Raggiunta la T di fusione il Mg ha fluidità elevata e rende facile il riempimento degli stampi favorendo la colata.

La colata è quindi favorita dal basso punto di fusione, dal basso calore specifico che consente raffreddamenti più rapidi, bassa densità, elevata fluidità.

l'85-90% sono leghe da fonderia.

MATERIALI COMPOSITI

Rinforzo un materiale di base con un materiale con migliori prestazioni.

Esistono compositi naturali.

Le matrici da rinforzare saranno di:

- Polimeri: per aumentare la T di applicazione, la durezza, aumentare la rigidità e la res. meccanica, sfruttare le lami che sono molto tenaci e la leggerezza
- Metalli: alta T e resistenza, tenacità, duttilità, conducibilità ma con elevato peso.
- Ceramiche: altissima T di utilizzo, rigidi ma fragili e poco tenaci

Nei materiali polimerici si rinforzano con fibres polimeriche o ceramiche o particelle ceramiche facendo attenzione a non penalizzare la buona leggerezza.

Nei materiali metallici si rinforzano con fibres o particelle ceramiche ma si perde un po' di duttilità

Nei materiali ceramici si rinforzano con particelle o fibres ceramiche e si aumenta la tenacità a frattura senza penalizzare la stabilità in temperatura.

VANTAGGI dei materiali compositi: consentono un miglioramento delle proprietà meccaniche, un allungamento delle strutture e una proprietà su misura

DIFETTI dei materiali compositi: elevato costo per le complicate tecnologie produttive, difficoltà di preparazione, degradazione dei materiali a causa dei differenti coefficienti di espansione termica, difficile riciclo.

In Aerospaziale sono soprattutto usati i compositi a matrice polimerica. quelli a matrice metallica vengono utilizzati nelle applicazioni strutturali e quelli ceramici nel settore della protezione termica.

Ne boro però è molto reattivo con la matrice e allora è necessario realizzare dei coating protettivi in BN, SiC, B₄C in modo da limitare la reattività del boro nei confronti dell'Al, del Mg e del Ti.

Ora sono sostituite con le fibre di carbonio perché garantiscono le stesse proprietà.

- fibre di vetro: forte utilizzo nelle matrici polimeriche

Esistono diverse tipologie di fibre di vetro:

- cambia la composizione chimica
- E = fibre comuni
 - S = massimizza la res. a trazione (4,6 GPa)
 - M = elevato modulo elastico (110 GPa)
 - AR = resistere alla corrosione in ambiente alcalino
 - E-CR = miglior res. alla corrosione in ambiente acido

Le fibre vengono filate da fuso e raffreddate e raccolte su un rocchetto.

Anche in questo caso si può depositare un coating.

- fibre di Allumina: per matrici metalliche e ceramiche (l'Allumina fonde a $T > 2000^{\circ}\text{C}$)

I Range di utilizzo sono da 900 a 1600^oC in base all'apertura di sinterizzazione usata. Le fibre vengono prodotte realizzando una sospensione di particelle ceramiche tenute insieme da leganti polimerici, questa pasta ceramica viene filata e poi sottoposta a riscaldamento; si eliminano i leganti e le particelle ceramiche sinterizzano le une sulle altre.

L'allumina attraversa diverse trasformazioni di fase ($\eta, \gamma, \delta, \alpha$). Le dimensioni dei grani aumentano, come la cristallinità e la densità (la porosità residua diminuisce). Oltre la fase δ la resistenza a trazione cala e il modulo elastico continua a crescere. In presenza di questo cambiamento ho anche un brusco aumento della dimensione dei grani. Il modulo elastico invece cresce all'aumentare della densità.

Si possono creare tessuti di fibre diverse: carbonio + kevlar o PE + vetro.

È anche possibile utilizzare fil metallici (elevato diametro ~ mm) in acciaio, Mo, W.

NANOTUBI di CARBONIO

$E \sim 1000 \text{ GPa}$

$\sigma \sim 50 \text{ GPa}$

Si fusi con delle esponali: uno strato di grafene tubolare single wall o multi wall.

È però difficile la dispersione dei nanotubi: si aggregano spesso agglomerati e le prestazioni calano

Ma GRAFENE invece è un singolo foglio di grafite. Anche questo ha elevate proprietà meccaniche. Anche in questo caso deve evitare l'agglomerazione.

① COMPOSITI a MATRICE METALLICA: MMC

Si è provato su!

- Al
 - Mg
 - Ti
 - Cu
- } veramente utilizzate

- superleghe Ni → es. superleghe ODS.

- intermetallici Ni-Ni e Al-Ti → no per le

problemi della
proprietà

rinforzanti ceramici: (SiC, Al₂O₃, B₄C, C, TiC, TiB₂, B)

- discontinui: 15-30% di rif.
- continui → maggior % di rinforzante (40-50%)

I vantaggi devono essere comparati con le proprietà della matrice o con quelle dei compositi a matrice polimerica

Rispetto alla lega base:

- + res, + E, + res a usura
- + propz meccaniche in T
- + res al creep
- espansione termica

Rispetto ai PMC

- + Tuso, + res a UV
- + res al fuoco, σ , E, ν tras.
- no assorbimento umidità
- + conduttività elettrica e term.

Svantaggi:

- deformabilità / duttilità
- + costo

+ peso

le tutto. Il rinforzante è solido, la dispersione viene poi colata in stampi. Si possono quindi solo utilizzare rinforzanti discontinui e matrici a bassa T_g (AR e resine)

Esistono diverse varianti:

- Melt Casting
- Stir Casting
- Rheocasting
- Compo casting
- Thixocasting

a seconda della T e della viscosità

Tutto avviene in vuoto per non contaminare la matrice. La buona dispersione deve essere mantenuta anche durante la solidificazione nello stampo: non si vogliono separazioni del rinforzante.

Bisogna anche studiare la bagnabilità matrice-rinforzante attraverso le test della goccia: $\theta < 90^\circ$ per avere buona bagnabilità. Si deve fare attenzione anche all'agglomerazione del rinforzante; non vogliamo avere aggregati.



In questo modo tutta la matrice è rinforzata. Poi conta anche molto la velocità di raffreddamento.

INFILTRAZIONE DA UNA PREFORMA

La matrice è allo stato fuso ma il rinforzante assume la forma dell'oggetto che vogliamo ottenere. Per gravità la matrice liquida infiltre la preforma riempiendone i vuoti. Si preferisce usare l'ausilio della pressione per favorire il riempimento totale dei vuoti; in questo caso si parla di SQUEEZECASTING.

Si può prevedere di eseguire il processo in vuoto o in atmosfera inerte.

Vantaggi dello SQUEEZECASTING rispetto al LAMINATE (senza pressione):

- riduzione t → elevata produttività
- forme complesse
- minor porosità e corti di residuo
- minor reazioni parassite (di cambio di interfaccia) perché mantenuto per meno tempo la matrice fusa a contatto con le rinforzanti

INFILTRAZIONE SOTTOVUOTO

Si utilizza il vuoto nella preforma da infiltrare.

questo processo è chiamato DIMOX: direct metal oxidation.

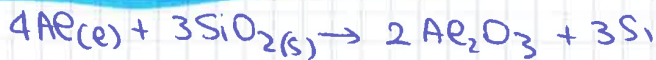
si ottiene un composto $AE + AE_2O_3$

Un composto analogo ottenibile è $AE + TiC$!



↓
lega di AE con Ti

PROCESSO LIQUIDO - SOLIDO



↓
più stabile

Si realizza una preforma in silice e la si immerge in un bagno di AE fuso, si crea uno strato di AE_2O_3 (reazione con riduzione di volume). Si creano cricche e l'AE riesce a penetrare nella preforma: otteniamo AE che riempie i vuoti di AE_2O_3 (otteniamo un 50% di AE_2O_3 → composto co-continuo). Se si finisce in lega.

Questi processi vengono chiamati Reactive Metal

PER DEPOSIZIONE

DEPOSIZIONE VIA SPRAY di METALLO FUSO: spruzzo le metallo fuso sulle fibre e dispongo le fibre in monostrati, posso poi sfruttare le diffusion bonding impilando più strati uno sull'altro. Si può scegliere come alternare le fibre strato per strato.

PVD: deposizione mediante evaporazione da un target ed infiltrazione della preforma.

CVI: reazione di precursori gassosi su una preforma.

In questi due si passa dalla deposizione all'infiltrazione. La facilità di infiltrazione di vapore permette di ottenere contenuti di rinforzo superiori ma bisogna controllare l'infiltrazione per limitare la porosità residua. Sono richiesti tempi lunghi. Si può poi utilizzare una pressatura a caldo per eliminare i vuoti residui.

Possiamo ottenere semilavorati o prodotti finiti.

ELETTRODEPOSIZIONE

Deposito uno strato su una preforma / infiltrazione in cella galvanica.

Noi considereremo le carbonresine, le vetroresine e i polimeri rinforzate con fibre polimeriche.

- Resistenza a trazione migliore degli acciai
- densità minore
- minor modulo elastico
- miglior resistenza specifica (per via della leggerezza)
- la resistenza all'impatto è peggiorata dall'utilizzo di fibre di C, tutte le altre fibre hanno sostanzialmente lo stesso effetto
- costi: costano di più quelli con C e meno quelli con vetro.

TECNOLOGIE DI PROCESSO

- formare le componenti con metodi manuali o preimpresati
- consolidamento della matrice ed eventuale reticolazione (per i termoindurenti) e poi raffreddamento
- Rimozione dallo stampo
- eventuali operazioni di finitura

METODI MANUALI O SEMI-MANUALI

HAND LAY-UP:

Sullo stampo si fanno aderire le fibre su cui si va poi a versare la matrice in fase liquida, se la matrice è termoindurente si utilizza una matrice termoplastica - si versa il prepolimero allo stato liquido più un agente reticolante.

Serve un distaccante sullo stampo.

Si deve pressare la resina con rulli per eliminare i vuoti.

Si fanno passaggi successivi

SPRAY LAY-UP:

Si producono solo compositi con fibre corte perché si utilizza una pistola che taglia e spruzza una miscela di fibre e resina.

Sono sistemi semi-manuali con grossi problemi di salute.

RESIN TRANSFER MOLDING

Si posiziona il rinforzante secco nello stampo che viene chiuso e poi si inietta la resina lavorando in pressione o in vuoto. Per far avvenire la reticolazione si deve

al fuoco di fibre. Una volta messi in forma i fasci di fibre impregnati passano in forno dove, se il polimero è termoisolante, avviene la reticolazione. Se il polimero è termoplastico il forno non è necessario, serve solo un metodo di raffreddamento. Per un termoisolante il bagno di polimero in cui passano le fibre è stato ottenuto mediante un innalzamento della temperatura; per un termoisolante si utilizza una soluzione di un polimero in un solvente che evaporerà poi in forno.

Si possono anche usare rotoli pre-impregnati e dove la focatura e la reticolazione.

Si producono profilati continui con sezione costante, anche di sezioni complesse.

FIAMENT WINDING

Identico alla pottrusione nella prima fase: si impregna la fibra secca nella resina e poi^{la} si avvolge su un mandrino. Anche in questo caso si può partire da un pre-impregnato.

Questo mandrino viene preso e messo in forno per far avvenire la reticolazione, se il materiale è termoisolante.

Si possono ottenere solo forme cave.

Si possono utilizzare mandrini gonfiabili (per sezioni particolari), mandrini metallici modulari o mandrini colla sabbia.

Le fibre possono essere arrotolate secondo diverse orientazioni:

- metodo cilindrico
- avvolgimento ad elica
- avvolgimento polare.

MATRICI

- Termoisolanti: più rigidi e meno tenaci
- Termoplastiche: possono essere riformati

Si abbinano con fibre di vetro, fibre polimeriche e fibre di C.

Le termoisolanti sono più rigide; la resistenza a trazione è simile; la tenacità a frattura è maggiore per i termoplastici perché le catene polimeriche sono più libere e deformabili.

Le termoisolanti hanno temperature di applicazione più elevate dei termoplastici.

Le resine poliestere hanno un ritiro abbastanza elevato: 4-8%.

→ Non si usano in settore aerospaziale
Presentano un' elevato assorbimento di umidità, si degradano facilmente e non resistono agli agenti aggressivi (alcalini).

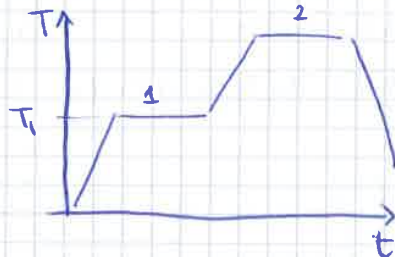
• Resine termindurenti Epossidiche

→ Più utilizzate in campo aerospaziale.

Si parte da: epichloridrina + difenilpropano + epichloridrina e si esige una reazione di policondensazione (+ HCl)

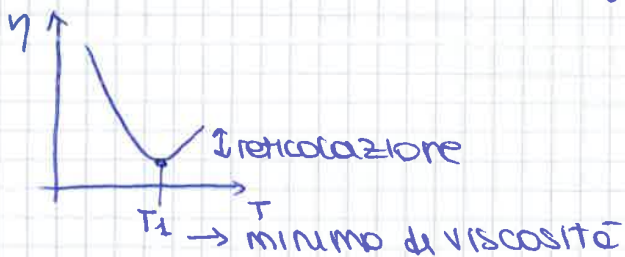
Per la reticolazione si utilizza una diammina: una diammina capace a contenere, non solo due.

Per un laminato in matrice composito si utilizza un riscaldamento in due isoterme:



1 - MINIMO della viscosità per avere una buona impregnazione

2 - velocizzare la reticolazione



Le resine epossidiche presentano ottime capacità adesive nei confronti di diversi materiali e costituiscono la base di molti adesivi strutturali di alta prestazione.

Queste resine, rispetto alle poliestere, hanno migliori caratteristiche meccaniche, una Tg più elevata (160-260°C), maggior inerzia chimica e rendono più facile la formazione di compositi grazie alla bassa viscosità e al ritiro di solidificazione più contenuto.

Si utilizzano per sostituire l'alluminio, se combinate con fibre di carbonio.

Le resine epossidiche sono più costose e meno fluide a parità di temperatura di quelle poliestere e la reticolazione richiede T maggiori (180°C).

Il prepolimeri, solitamente solido, viene impiegato in soluzione per la produzione di laminati e la resina risultante presenta diverse difficoltà di processo legate alla facile formazione di vuoti o porosità e all'alta pressione richiesta in fase di indurimento.

Uno tra i maggiori vantaggi delle resine fenoliche risiede nella resistenza all'ossidazione e alla degradazione termica che avviene con una lenta reazione endotermica e con formazione di residui carboniosi incombusti (char) dovuti alla elevata presenza di C.

Queste resine vengono accoppiate con fibre di vetro o di grafite.

- Resine termoplastiche: Policarbonato PC

Rinforzato con fibre.

Presenta elevata resistenza all'urto, buona stabilità dimensionale e agli UV e buona lavorabilità.

$T_g = 150^\circ\text{C}$

- Resine termoplastiche: Poli-etero etere-chetone PEK

Elevata tenacità a frattura: $K_{Ic} = 6 \text{ MPa m}^{1/2}$

$T_g = 143^\circ\text{C}$ ma parzialmente cristallino $T_m = 373^\circ\text{C}$

Buona conservazione delle caratteristiche meccaniche fino a 200°C .

Prestazioni meccaniche eccezionali in condizioni estreme di pressione e temperatura; alta resistenza chimica e alla corrosione e all'abrasione; alta stabilità termica e dimensionale; eccellenti proprietà elastiche e dielettriche; comportamento auto-lubrificante.

- Resine termoplastiche: Polifenilensolfuro PPS

Per la resistenza al creep, cioè il componente è potenzialmente interessante per le alte temperature.

Presenta modulo elastico elevato e buona inerzia chimica.

Con i termoplastici sono possibili tecniche di giunzione per fusione e saldatura, oltre che per giunzione meccanica e incollaggio.



I composti a matrice ceramica sono deformabili in campo plastico e non si frantumano in campo elastico.

Tra le buone caratteristiche troviamo anche una densità piuttosto bassa, inferiore a quella delle leghe metalliche e superiore a quella dei polimeri.

TECNOLOGIE di PRODUZIONE

Si utilizza la tecnica di sinterizzazione delle polveri a secco o a umido.

Si miscelano gli elementi richiesti: dispersione in un liquido delle polveri di rinforzante e matrice. Si effettua una omogeneizzazione con un mescolamento e poi si passa all'essiccazione per far evaporare il liquido.

Dopo questa operazione esistono 3 vie:

- pressatura a caldo
- pressatura a freddo + sinterizzazione
- slip cast

questa è la tecnica per composti con rinforzante discontinui: particelle o whiskers.

se si vuole produrre un manufatto con libre lunghe si fanno passare le fibre in un bagno di impregnazione contenente la matrice dispersa in un solvente, e poi le si arrotolano su un mandrino. Il composto così ottenuto viene estratto dal mandrino e tagliato in fogli. I fogli vengono sovrapposti, essiccati e pressati a caldo.

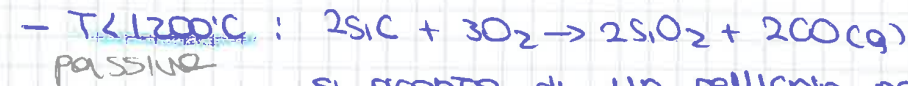
Infiltrazione della matrice in una preforma

questo metodo non è molto usato perché bisogna portare la matrice allo stato fuso e quindi ad altissime temperature (data l'elevata T_{fus} del ceramica).

A questa T , la matrice facilmente reagisce con le rinforzante mentre infilla la preforma.

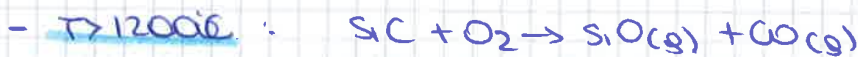
In autoclave la matrice brucia lasciando un composto ricco in C che circonda le fibre. Si esegue poi un'infiltrazione per far avvenire la reazione del C con le Si per ottenere la matrice ceramica.

Il carburo di silicio presenta un interessante comportamento all'ossidazione: presenta due meccanismi ossidativi diversi:



passiva

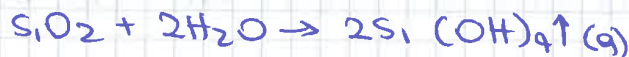
si ricopre di una pellicola passivante di silice che protegge il materiale sottostante



attiva

si volatilizza del SiO rovinando e degradando il materiale. questo può anche distruggere un eventuale film passivante. È quindi importante controllare la pressione parziale dell'ossigeno per evitare questa degradazione.

È anche importante la presenza di vapor d'acqua:

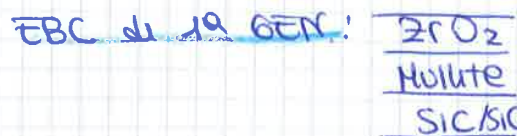


la resistenza all'ossidazione peggiora molto e si accelera l'ossidazione.

Per evitare tutto questo è necessario usare dei rivestimenti EBC (Environmental Barrier Coating).

↓
proteggere dall'ambiente.

Le EBC sono fatte a strati.

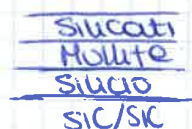


coefficiente di espansione termica molto diverso

↓
la mullite limita l'effetto

Sono comunque in disuso perché con i cicli termici si crackano per le diverse coefficiente di espansione termica

EBC di 29 GEN: per la protezione al vapor d'acqua.



Silicati di Calcio, di Ittrio, di bario e stronzio

Tra silicati e mullite si può anche inserire uno strato misto