



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2062A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Cagnazzo Emanuele

MATERIA: Materiali per l'industria meccanica - Prof. Doglione

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.**

DOMANDE ESAME MATERIALI

TECNOLOGIA DEI GETTI

1) VANTAGGI DELL'USO DEI GETTI RISPETTO ALLE ALTRE LAVORAZIONI (ASPORTAZIONE DI TRUCIOLA E DEFORMAZIONE PLASTICA)

La Tecnologia dei getti presenta i seguenti vantaggi:

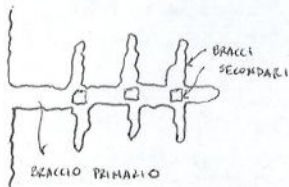
- costo minore per pezzi di forma complessa;
- proprietà isotrope e caratteristiche meccaniche tensili isotrope (R_{02}, R), non dipendenti quindi dalla direzione;
- progettazione per funzionalità senza tener conto di problematiche di assemblaggio;
- esalta la velocità di prototipazione rapida;

La produzione di pezzi mediante fusione offre al progettista vantaggi sui costi rispetto alle altre tecnologie di produzione quando le geometrie sono molto complesse:

- risparmio di massa, sia sul pezzo finito che sul materiale utilizzato per la realizzazione del pezzo finito;
- eliminazione delle lavorazioni per deformazione plastica e asportazione di truciolo;
- tempi di montaggio più brevi;
- uso di un minor numero di pezzi, non si ha assemblaggio di molteplici parti e quindi si ha una riduzione dei costi.

2) MICROSTRUTTURA DEL MATERIALE OTTENUTO PER COLATA (DENDRITI, FASI SECONDARIE...)

Le leghe industriali ^{e gli acciai da getto} a differenza dei metalli puri, hanno un meccanismo di solidificazione di tipo dendritico. Più dendriti formano un cristallo ed esse sono strutturate secondo bracci primari e secondari. La grandezza del braccio secondario delle dendriti da influenzazioni sulle caratteristiche meccaniche del materiale (resistenza, duttilità).



Se si effettua una colata molto calda, il contenuto è molto più ricco del liquido e si ha un gradiente alto, allora si avrà sviluppo di dendriti colonnari, per cui il fronte del solidus è vicino alle punte delle dendriti. Al contrario, per grandi dimensioni del getto si ha molto liquido e poco contenuto, si ha quindi un gradiente basso con ritardo nella crescita di dendriti colonnari e sviluppo di dendriti centoli equiaxiali.

In base al MODELLO MICROSTRUTTURALE DELLA DUTTILITÀ è possibile individuare alcuni parametri

3) TECNOLOGIA DI GETTO ALLO STATO SEMISOLIDO E SUOI VANTAGGI

Si tratta di una colata solidificata con tecnologie innovative per la solidificazione di componenti in lega d'Alluminio di geometria complessa e tollerabili termicamente. Essa ha elevati costi, basso Know-how tecnologico e si hanno un numero limitato di leghe ottenibili in condizioni semisolide. Tale tecnologia combina colata e forgiatura e porta a una microstruttura non dendritica.

Essa si basa sul principio che quando si fonde il solido e raggiunge circa il 20%, il liquido interdendritico trova una grande difficoltà ad avanzare tra i rami. Mediante agitazione meccanica o elettromagnetica si genera una turbolenza che spezza le dendrite e impedisce la formazione di una vasta foresta di bracci dendritici che ostacolerebbero il movimento del liquido, generando così una buona fluidità fino al 60% di solido. Tra il Liquidus e il Solidus il fluido è pastoso, viene definito "slurry" o fango ed ha caratteristiche non newtoniane, spesso tixotropiche, tali cioè da reagire con maggiore fluidità alle sollecitazioni di taglio. Infine i bracci dendritici sotto vengono dispersi nel liquido, costituendo pesanti di nucleazione di dendrite con crescita non monodirezionale, ma equiasica. Si ottiene in definitiva una struttura non dendritica e più fine.

Si parla di:

-**Rheocasting** è una tecnica basata sul concetto di nucleazione omogenea forzata di grani alfa che continuano a crescere in maniera globulare grazie al raffreddamento controllato. All'inizio del processo di fusione della forma l'impasto semisolido dovrebbe diventare fluido con bassa viscosità per poter raggiungere un flusso eccellente e elevate capacità di riempimento dello stampo. Affinchè questo avvenga si richiede che le particelle alfa devono avere una forma più arrotondata possibile ed essere connesse con ponti alfa che allo stato solido aumenteranno la capacità di resistere ad un allungamento del materiale.

-**thixocasting**: nel thixocasting ad esempio delle leghe di alluminio il primo passo del processo di preparazione del precursore viene effettuato in colata a raffreddamento diretto con mescolamento elettromagnetico per preparare una struttura non dendritica delle risultanti billette. Queste billette vengono poi portate nella regione semisolido generalmente con un riscaldamento per induzione e viene data loro la forma in macchina per la pressocolata.

I vantaggi di una colata semisolido sono:

- un'elaborazione del bagno estremamente minimizzata con meno materozze o bocconi o pezzi difettosi;
- il fluido metallico è più pulito, poiché essendo freddo, è meno sottoposto a delle contaminazioni chimiche ed è comunque meno ossidabile;
- un costo energetico decisamente più basso dal momento che le temperature alle quali si opera sono comunque inferiori a quella del liquidus.
- bassa possibilità di porosità per gas intrappolati poiché la percentuale di liquido che fluisce è inferiore al 100% (è pari a circa il 50%);
- essendo la porzione di solido che deve ancora solidificarsi nella forma molto ridotta, si osservano meno difetti tipo ritiri e stoppi a caldo
- caratteristiche meccaniche più elevate
- si possono formare composti più facilmente rispetto al solo liquido, in quanto è più semplice disperdere nel fluido non newtoniano una testa fase fatta da particelle ceramiche.

5) PECULIARITÀ DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI GETTI (DIPENDENZA DAI PARAMETRI DI FABBRICAZIONE E MICROSTRUTTURA CHE NE DERIVA)

Le caratteristiche meccaniche di un pezzo dipendono dalla sua microstruttura, ma nel caso dei getti ciò non vale in maniera assoluta in quanto i pezzi hanno velocità di raffreddamento variabili da zona a zona, esse si avrà una diversa resistenza in base al punto considerato.

Si parte dalla conoscenza dei carichi esterni applicati, per poter determinare gli stress, si dovranno poi anche conoscere gli ingombri che sono un dato di progetto:

CARICHI APPLICATI $\begin{cases} \rightarrow \text{STRESS} \\ \rightarrow \text{INGOMBRI} \end{cases}$

Bisognerà evitare le concentrazioni di sforzo e determinare la forma per il getto.

Dopo di ciò si passa alla scelta della lega. È bene sottolineare che le caratteristiche meccaniche di leghe per fusione non dipendono solo dal materiale, ma da una molteplicità di fattori:

- TIPO DI LEGA
- MICROSTRUTTURA (metodo di solidificazione delle fasi e loro distribuzione)
- TRATTAMENTO TERMICO
- TENSIONI AMMISSIBILI

In prima approssimazione i dati reali sulle caratteristiche meccaniche variano da quelli tabellati, i quali sono valori medi. Nei pezzi ottenuti per colata, non avendo lavorazioni successive che migliorano le caratteristiche meccaniche, esse variano a seconda del punto considerato. I valori riportati nelle tabelle sono ottenuti mediante provette, non singoli componenti.

Le proprietà di un componente dipendono da:

- MODALITÀ DI FABBRICAZIONE (TECNOLOGIA) \rightarrow IN SABBIA, IN CONCHIGLIA, PRESSOCOLATA
- MICROSTRUTTURA
- PROPRIETÀ DEL METALLO

Quando tali grandezze non sono disponibili, si ha che la microstruttura è determinata dalla velocità di raffreddamento secondo la LEGGE DI CHVRINOV:

$$\bar{T} \propto \left(\frac{A}{V}\right)^2 \quad \text{con } A = \text{area della superficie del getto}$$

$V = \text{volume del getto}$

Quindi facendo riferimento a una situazione idealizzata di geometria semplice, si ha che la velocità di raffreddamento dipende da:

- 1 Modalità di raffreddamento della colata (tecnologia)
- 2 Massa della sezione
- 3 Superficie disperdente
- 4 Geometria (sezioni concave e angoli sventolanti danno velocità più basse, pareti convesse disperdono più velocemente)
- 5 Temperatura di colata
- 6 Sistema e geometria di alimentazione

w è l'esponente di Weibull, se è basso indica una grande dispersione nei valori di resistenza, se è alto una bassa dispersione

La probabilità cumulativa di rottura sarà:

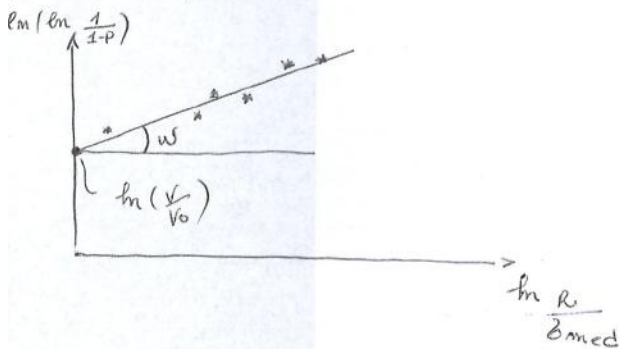
$$P = 1 - e^{-\frac{V}{V_0} \left[\frac{R - \sigma_0}{\sigma_{med}(V_0) - \sigma_0} \right]^w}$$

La probabilità di sopravvivenza sarà $1 - P = e^{-\frac{V}{V_0} [\dots]^w}$

$\sigma_{med}(V_0)$ ed w sono incogniti, ma si ricavano da dati sperimentali; introducendo le coppie di dati sperimentali (R, P) , facendo la regressione si ha:

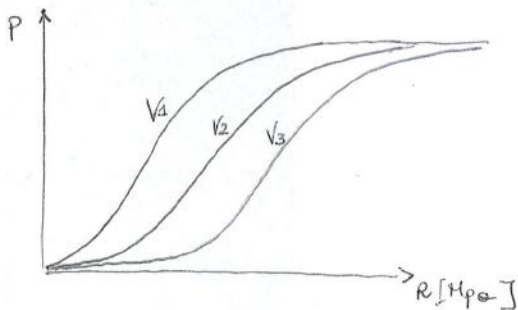
$$\ln \left(\ln \frac{1}{1-P} \right) = \left[\ln \frac{V}{V_0} - w \ln \sigma_{med}(V_0) \right] + w \ln R$$

Mediante l'equazione di Weibull in doppio logaritmo si ricava una retta la cui pendenza è il modulo di Weibull w e dall'intercetta si ricava $\sigma_{med}(V_0)$:



Si possono trarre le importanti conclusioni per cui se si aumenta il volume V nell'equazione in doppio logaritmo, si diminuisce la probabilità di sopravvivenza $1 - P$ e si aumenta la probabilità di rottura P . La probabilità di rottura P ha quindi un effetto di scala, in quanto dipende dal volume del pezzo, come rende ancor più chiaro il seguente grafico:

PROBABILITÀ ROTTURA CONCHIGLIA



$$V_1 > V_2 > V_3$$

Si nota chiaramente che aumentando V , diminuisce la probabilità di sopravvivenza del pezzo. Per una colata in sabbia, le condizioni sarebbero ancor più peggiorative.

4) Inclusioni:

- endogene:
 1. fasi non metalliche: sono per lo più solfuri, nitrati e ossidi che derivano dalla reazione del metallo fuso con l'ambiente locale; sono microscopiche e sono distribuite in tutto il solido
 2. fasi metalliche
 - a) intermetallici con Fe nell'Al
 - b) eccessive quantità di affinante del grano come boruri di Ti, V nell'Al
- esogene: si tratta di particelle di scoria o ceramiche provenienti dalle forme in sabbia o dai refrattari di forni e crogioli; tendono a sedimentare o a precipitare per ascensum, finendo nella scoria liquida protettiva superficiale, a seconda della densità rispetto al bagno metallico; spesso hanno dimensioni così grandi che si possono vedere ad occhio nudo nelle sezioni o sottopelle.

Diminuiscono le proprietà meccaniche, soprattutto l'allungamento a rottura, la resistenza a fatica e la tenacità a frattura, soprattutto nelle leghe dove le caratteristiche meccaniche sono elevate e quindi il livello di stress applicati è pure elevato.

E' opportuno rimuovere i solidi estranei, anche gli ossidi:

- eseguendo flussaggio con Cl, F, cloruri o fluoruri decomponibili, il gas trascina nella scoria superficiale le particelle estranee per flottazione
- molto efficienti sono i filtri in ceramica, di solito fatti da schiume ceramiche a cella aperta, che sono usate nelle fasi di attesa, o di trasferimento, o di colata del liquido

5) Film di ossido

L'Al e il Mg reagiscono facilmente con l'O sia allo stato solido, sia allo stato liquido, dove la formazione superficiale dello strato:

1. protegge dall'umidità dell'aria
2. occorre evitare turbolenza e disturbi superficiali anche perchè s'intrappolano nel liquido pellicole di ossido che non si possono rimuovere per gravità perchè non sedimentano, avendo una densità vicina a quella dell'Al liquido; questo vale anche per il Mg, ma di meno, vista la più bassa densità del metallo
3. si forma ossido anche per reazione con l'umidità dell'aria
4. le leghe di Al contenenti Mg si ossidano molto più rapidamente
5. è opportuno rallentare l'ossidazione proteggendo il liquido con delle scorie protettive, di solito miscele di sali e ceramiche che danno luogo a solidi bassofondenti che, fondendo, ricoprono la superficie del metallo liquido.

6) Strappi a caldo "hot tears"

Il grosso della contrazione avviene durante la solidificazione. Gli strappi a caldo (hot tears) avvengono in questa fase, quando vi è la concomitanza dei più grandi ritiri volumetrici e non si è ancora raggiunta la resistenza necessaria per resistere alle tensioni imposte dai vincoli geometrici della forma. Le fratture sono sempre intergranulari. La tendenza o meno alle cricche dipende molto dal tipo di lega.

Metodi per minimizzare il rischio di strappi a caldo:

1. curare il disegno della forma evitando bruschi cambi di dimensioni della sezione del pezzo, con particolare riguardo ad angoli, spigoli e rientranze, al fine di contrastare i vincoli al ritiro volumetrico; l'uso di raffreddatori o isolanti termici nel posto giusto è benefico
2. è bene affinare il grano il più possibile per disperdere l'ultimo liquido che solidifica, che non deve quindi essere concentrato in pochi bordi di grano

Confronto fra tecnologie di colata

fattore	sabbia	conchiglia	pressocolata	squeeze casting	semisolido
costo attrezzatura e processo	basso	medio	alto	alto	alto
produttività	bassa	>10 kg/h	>70 kg/h	>20 kg/h	>40 kg/h
dimensione del getto	la più grande	limitata dalle dimensioni della macchina	medio-piccolo	limitata dalle dimensioni della macchina	limitata dalle dimensioni della macchina
forma	la migliore per forme intricate e con inserti	complessa, ma in difficoltà con inserti	non intricata,	complessa, ma in difficoltà con inserti	complessa, ma in difficoltà con inserti
inserti	in sabbia, anche forme intricate	in acciaio	in acciaio, semplici e dritti per essere estratti per spinta	in acciaio, semplici e dritti per essere estratti per spinta	in acciaio, semplici e dritti per essere estratti per spinta
minimo spessore	4 mm <small>(VALORE ALTO)</small>	3 mm <small>(VALORE INTERMEDI)</small>	1 mm <small>(VALORE BASSO)</small>	1 mm <small>(VALORE BASSO)</small>	2 mm <small>(VALORE BASSO)</small>
tolleranza	30 mm/m <small>(VALORE ALTO)</small>	10 mm/m <small>(VALORE MEDIO)</small>	4 mm/m <small>(VALORE BASSO)</small>	2 mm/m <small>(VALORE BASSO)</small>	2 mm/m <small>(VALORE BASSO)</small>
finitura superficiale	10 µm <small>(VALORE ALTO)</small>	6 µm <small>(VALORE MEDIO)</small>	1 µm <small>(VALORE BASSO)</small>	1 µm <small>(VALORE BASSO)</small>	2 µm <small>(VALORE BASSO)</small>
porosità da gas/ritiro	molto bassal/sensibile	entrambe basse con solidificazione ben controllata	da bassa ad alta* secondo il processo/bassa	nulla <small>(VALORE ALTO)</small>	quasi nulla/bassa grazie alla ALTA PRESSIONE
velocità di raffreddamento	0,2 °C/s <small>(VALORE BASSO)</small>	5 C°/s	100 C°/s	40 °C/s	10 °C/s
microstruttura	grossolana	fine	finissima in superficie	finissima in superficie	molto fine
DAS [µm]	200	50	10	20**	non dendritica***
resistenza	mediocre	ottima	eccellente	eccezionale	eccezionale
duttilità	discreta	media	bassa	ottima	eccellente
resistenza a fatica	buona	buona	eccellente	eccezionale	eccezionale
qualità complessiva	dipende dal controllo colata	ottima	tolleranza e ripetibilità eccellenti	eccezionale	eccezionale
note	produzione di pochi pezzi molto complicati	produzione media di pezzi complicati	grande produttività su pezzi non troppo complicati	produzione media di pezzi con eccezionali caratteristiche meccaniche	produzione copiosa di pezzi con elevate caratteristiche meccaniche

* RESISTENZA DA GAS ENDOGENO
 ** Il DAS nello squeeze casting è basso in quanto la pressione alta fa sì che si abbia un ritiro perfetto tra liquido e pezzi
 *** Nel semisolido invece esiste da la solidificazione non dendritica => il DAS è basso

2) **Composizione, microstrutture e proprietà delle leghe Al-Si-Mg**

Sono le leghe di alluminio con le migliori prestazioni: ricordiamo A356 e A357 (dove la A indica che le impurezze contenute nella lega sono altamente controllate e per questo vengono utilizzate in impieghi strutturali).

La presenza del Mg permette di effettuare il trattamento T6, grazie al quale si sviluppa lo snervamento rispetto a leghe binarie con più Si. Tali leghe vengono indurite e rafforzate per dispersione e precipitazione.

Le particelle di Si che si rafforzano per dispersione hanno dimensioni comprese tra 1 e 10 μm, mentre le particelle pi che si rafforzano per precipitazione hanno dimensioni comprese tra 10 e 400 nm.

Sono leghe colate con getti premium quality e in genere viene aggiunto del Mn per favorire il passaggio da strutture sottili e sferulose (β -AlFeSi) a strutture aventi la forma a "scrittura cinese" (α -AlFeSi). Viene inoltre aggiunto del Ti sotto forma di TiB_2 come effluente del processo.

Sono leghe in cui il contenuto di impurezza è abbastanza basso (Il Fe può essere considerato un'impurezza a differenza del Mn (Manganese)).

Tra le principali caratteristiche troviamo un elevato allungamento a rottura e resistenza a trazione (A% e R); ottima per fonderia essendo molto fluida e quindi facilmente colabile, poco porosa, bassa tendenza al ritiro e assenza di strappi (al ritiro) grazie all'assenza del Cu; buona resistenza alla corrosione e inoltre il Si rende la lega buona per la saldatura ma al tempo stesso deleteria per gli utensili per asportazione di truciolo.

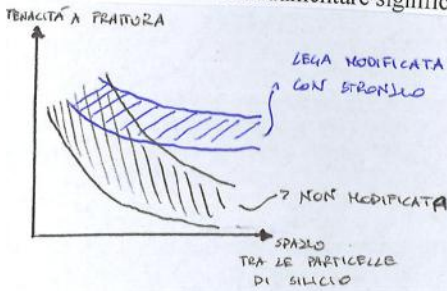
Si contrasta l'impagliamentamento dovuto al Fe mantenendo la $\% Fe \leq 0,2 \%$.

Le proprietà meccaniche della lega variano in funzione della dimensione della cella dendritica, quanto più essa è grande tanto peggiori saranno le proprietà meccaniche.

La resistenza allo snervamento resta pressoché costante grazie al raffreddamento per precipitazione della fase β' che è l'unica che si oppone al movimento delle dislocazioni.

La tenacità a frattura è invece strettamente legata distanza interparticellare del Si: più le particelle di Si sono grosse e lontane tra di loro e più la tenacità a frattura diminuisce; infatti se le particelle di Si sono più grandi si rompono più facilmente, essendo una barriera più estesa nello spazio al moto delle dislocazioni.

Un modo efficace di aumentare significativamente la tenacità è l'introduzione dello Sr, come mostra il seguente grafico:

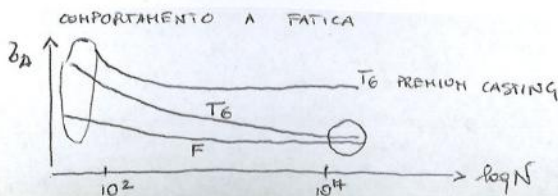


Per quanto concerne poi il comportamento a fatica si può affermare quanto segue:

La lega in fonderia può presentare porosità o difetti: che ciò avvenga in F o in T6 conta poco poiché il danno si basa sulla nucleazione della cricca e sulla sua propagazione. L'innesco della cricca deriva dalla porosità della lega.

Quando lo stress è elevato, la ciclicità gioca un ruolo marginale (è più importante considerare la sollecitazione statica); ad un alto numero di cicli le cricche si sviluppano molto lentamente nel tempo (essendo la tensione alternata bassa) ed è quindi più plausibile che la cricchi derivi più da un difetto di colata che dalla sollecitazione vera e propria.

La presenza di difetti rientra dunque in un range statistico indipendentemente che si abbia un F o un T6: si è però osservato sperimentalmente che nel T6 i difetti sono scarsamente presenti e che quindi le cricche si formano più difficilmente.



- indurimento per ~~soluzione~~ solido
- " " dispersione di particelle θ (Al_2Cu)
- aumento di resistenza mediante l'applicazione di trattamenti termici:

Se si esegue il T6 si riscalda il tutto a $540^\circ C$, la porosità tende a muoversi e ad affiorare verso la superficie con la comparsa di distorsione e blistering, altamente negativi dal momento che la porosità superficiale crea una facile comparsa di cricche e quindi una veloce rottura per fatica. Per evitare questo grosso problema si esegue il T6 con lo stampo messo in depressione poiché in questo modo il liquido fuso tende a non intrappolare al suo interno aria.

Non esistono controindicazioni per il T5 (raffreddamento normale e invecchiamento artificiale) con la formazione della fase θ' e in presenza del Mg della fase β' .

- miglioramento lavorabilità all'utensile
- peggioramento lavorabilità, in quanto aumenta la tendenza al ritiro
- peggioramento duttilità
- " " resistenza alla corrosione
- favorisce la cricche a caldo (hot tearing)

Queste negatività vengono compensate con l'aggiunta di Fe con tenori compresi tra l'1% e il 2%. Infatti, se un pezzo a L della lega è tutto abbastanza solidificato ci sarà lo spigolo interno che generalmente solidifica più tardi e ciò si manifesta con una contrazione impedita: ciò porta irrimediabilmente a delle zone poste in tensione di trazione e quindi zone che sollecitate sono facilmente esposte alla formazione di cricche.

Se c'è del Fe, l'eutettico si muove verso il basso (si abbassa la T eutettica) e si formano degli eutettici basso fondenti con T minori dell'eutettico originario Al-Si-Cu: i liquidi tendono a infiltrarsi nelle cricche e a cicatrizzarle.

Il Fe di per sé, è un elemento che se aggiunto rende il materiale fragile ma che comunque in questo caso viene inserito ugualmente per evitare le più pericolose cricche a caldo.

4) CONFRONTO DELLA COMPOSIZIONE E MICROSTRUTTURA DELLE LEGHE Al-Si e Al-Si-Cu

Per tale domanda fare riferimento alla domanda 3 evidenziando gli effetti dell'aggiunta del Cu alla lega binaria Al-Si. (da seguire sottolievato in basso in poi...)

6) SOLIDIFICAZIONE DENDRITICA DELL'ALLUMINIO

In metallurgia, una dendrite è una struttura ad albero caratteristica di cristalli formati nella solidificazione di metalli e leghe metalliche.

Tale forma è legata alla rapida crescita del cristallo lungo direzioni cristallografiche energeticamente favorevoli e va ad influire fortemente sulle proprietà del materiale. Solitamente questo tipo di struttura si ha in presenza di leghe metalliche multifase che devono essere raffreddate a temperature molto al di sotto del punto di solidificazione.

Infatti, con raffreddamenti rapidi la solidificazione può essere talmente rapida che la composizione della lega che solidifica può essere diversa dalla concentrazione complessiva del fluido di partenza. Differenti concentrazioni implicano differenti punti di fusione.

L'aumento di concentrazione del metallo con punto di fusione più basso fa sì che il punto di solidificazione della soluzione ancora liquida diminuisca rendendo più difficile l'ulteriore solidificazione. In questo modo la solidificazione prosegue lungo le zone più sporgenti del fronte dove ho un migliore smaltimento del calore causando la struttura dendritica.

Il raffreddamento rapido produce una maggior nucleazione di nuovi cristalli, in questo modo le dendriti risultano essere di dimensioni ridotte perché la loro crescita è ostacolata dall'accrescersi di quelle limitrofe. Mentre un raffreddamento più lento porta a dendriti di dimensioni maggiori. Dendriti di piccole dimensioni sono caratteristiche di materiali duttili.

La crescita delle dendriti e le conseguenti proprietà del materiale che ne derivano sono facilmente visibili nel processo di saldatura. Anche nei pezzi ottenuti di fusione possono vedere le dendriti tramite sezionamento e lucidatura della sezione.

Andando a effettuare una colata a temperatura molto elevata, il coefficiente sarà molto più freddo del liquido e si avrà un gradiente alto per cui si avranno delle dendriti colonnari che partono dalle pareti, e il fronte del solidus sarà vicino alle punte di tali dendriti.

Se il getto è di grandi dimensioni si ha molto liquido e un coefficiente piccolo in proporzione, di conseguenza si avrà un basso gradiente con ritardo nella crescita delle dendriti colonnari e lo sviluppo di dendriti centrali equiassiche. Anche la pratica dell'inoculazione di germi di nucleazione, così come le pratiche di vibrazione meccanica e agitazione elettromagnetica sfavoriscono la crescita colonnare favorendo quella equiassica.

od Alluminio e ferro in quanto consente riduzioni dei consumi di carburante (5%) e riduzione della massa di motore (10%), che portano a una riduzione della resistenza dell'aria, al sollevamento e all'accelerazione.

3) PROPRIETÀ INGEGNERISTICHE FONDAMENTALI (leggerezza, capacità di smorzamento, lavorabilità) DELLE LEGHE DI Mg

Nel dettaglio caratteristiche meccaniche peculiari delle leghe di magnesio sono le seguenti:

-Elevata capacità di smorzamento definita come il rapporto tra l'energia dissipata per ciclo e l'energia elastica totale del ciclo stesso durante le vibrazioni meccaniche. Dipende dall'ampiezza di sollecitazione e diminuisce con l'allungamento e l'incremento della resistenza.

L'energia elastica può essere espressa con la seguente formula in cui non compare $\frac{1}{2}$ poiché viene presa in considerazione sia l'energia in fase di carico sia quella in fase di scarico:

Energia elastica per unità di volume:

$$U_{el} = 2 \int_0^{\sigma_d} \sigma \cdot d\epsilon$$

Energia dissipata al ciclo per unità di volume:

$$U_{diss} = \oint \sigma \cdot d\epsilon$$

Capacità specifica di smorzamento:

$$D = \frac{U_{diss}}{U_{el}}$$

ol' utensile

-lavorabilità ovvero la capacità di una facile asportazione di truciolo e la conseguente minore usura dell'utensile utilizzato (utensile dura dalle 5 alle 10 volte di più): le leghe di Mg sono le migliori leghe metalliche sotto questo aspetto. Questa proprietà deriva dalla struttura a cella esagonale, diversa dal CCC, che quindi non ha clivaggio. I piani di scorrimento risultano duttili ma non più di tanto visto che non sono eccessivamente numerosi. Il materiale risulta quindi un po' duttile ma anche un po' fragile e l'asportazione diventa quindi semplice.

La finitura superficiale è eccellente con superficie che diventano lisce anche con una finitura in tornitura non necessitando quindi di rettifica.

L'accorgimento da prendere è l'utilizzo di un fluido lubrorefrigerante con velocità di taglio elevate per evitare i rischi di incendio derivante dalla polveri prodotte, che se sono molto fini risultano pericolose.

-eccellente alleggerimento strutturale nel passaggio da leghe di fonderia a quelle da deformazione plastica ci possono essere delle variazioni su densità e modulo elastico. Ma ciò può avvenire anche sulle stesse leghe da fonderia poiché tali parametri dipendono essenzialmente dalla composizione chimica.

-resistenza a creep (scorrimento viscoso)

-resistenza a corrosione

-elevata resistenza sotto carico e a fatica.

A) 1) MODULO ELASTICO SPECIFICO

1) CARATTERISTICHE E CAMPI APPLICATIVI DELLE LEGHE DI Mg CHE CONTENGONO TERRE RARE E METALLI ALCALINI

Per aumentare la resistenza delle leghe di Mg alle alte temperature e contrastare il fenomeno del creep sono state introdotte nuove tipologie di sollecitazione, tra cui:

- TERRE RARE (RE)
- METALLI ALCALINI

Le terre rare sono molto solubili nel Mg. Tra le più comuni troviamo: Ce, La, Nd, Pr e Gd. La mescolanza con queste terre porta alla creazione di precipitati metastabili indurenti che permettono il rafforzamento per precipitazione laddove non vi sia porosità e pericolo di blistering.

Si hanno liquidi eutettici molto fluidi che contrastano efficacemente la porosità e strappi a caldo.

L'introduzione delle RE nelle leghe Mg-Al ad esempio ^{occorre volte} ~~leghe~~ adatte alla prescolata perché la forte velocità di raffreddamento produce dei fini precipitati all'interno dei grani ($Al_{11}RE_3$) che permettono il risparmio del trattamento T6 (Solubilizzazione, tempra e invecchiamento artificiale); in contemporanea sia a T amb che a T superiori vanno a formarsi sui bordi di grano dei composti $Mg_{12}RE$ che aumentano il contrasto allo scorrimento (resistenza al fenomeno del creep).

Le RE sono efficienti aumentando sensibilmente la resistenza alla corrosione ma anche molto costose per cui si preferisce inserirle nella lega come Misch Metal (un assortimento naturale di terre rare) che nonostante abbassi un po' i costi rimane comunque molto caro.

In definitiva conferiscono molte fluidità dovuta a grande solubilità dei leganti negli eutettici, che risultano anche convenientemente bassi e conferiscono alla lega le migliori caratteristiche fisiche e tecnologiche per la produzione di pezzi ottenuti per fusione.

Per ovviare al problema dei costi elevati delle terre rare è possibile inserire altresì dei metalli alcalini come elementi di lega. Nel dettaglio si inseriscono:

- Ca (lega AX52) e Sr (lega AJ62) che hanno buona solubilità e formano i composti Al_2Ca e Al_4Sr sui bordi di grano, contrastando il fenomeno del creep. Tali elementi diminuiscono la fluidità e aumentano la suscettibilità agli stoppi a caldo. Infine se utilizzati insieme e terre rare si ha fine precipitazione e si rafforza la matrice. Le leghe AJ sono generalmente preferite alle leghe AX, in quanto anche se lo Sr è più caro, la resistenza a caldo che si ottiene è migliore.

È bene sottolineare che si tratta di leghe ancora in fase di sviluppo, non ancora commerciali, anche se la BMW ha realizzato dei blocchi motore fatti di tali leghe. Il motivo principale del loro potenziale utilizzo risiede nel fatto che esse abbiano resistenza e creep competitive con la lega di Al di riferimento A380 a $175^{\circ}C$.

4) CORROSIONE NELLE LEGHE DI Mg

Il magnesio è un metallo altamente anodico con potenziale elettrico più piccolo tra tutti i metalli esistenti.

Se accoppiato con altri metalli in leghe si corrode galvanicamente in maniera più o meno veloce. Per corrosione si intende quella reazione di ossidoriduzione in un cui il metallo si ossida perdendo elettroni.

In presenza di acqua (H₂O) o aria umida si passiva con formazione di Mg(OH)₂ che protegge il metallo come una coperta dall'esterno ed è più resistente alla corrosione atmosferica dell'acciaio dolce. Tuttavia la membrana di passivazione che si crea è più porosa e meno stabile di quella che si crea nell'Al e Ti.

È particolarmente resistente alla corrosione in ambiente rurale (velocità di corrosione 0,25mm/anno) mentre vicino al mare si corrode facilmente a causa della presenza di Cl⁻ il quale distrugge lo stato di passivazione e dà vita al fenomeno corrosivo chiamato pitting. Il Mg non resiste molto a corrosione in ambiente acido.

Generalmente però il Mg non è usato nella sua purezza di metallo ma viene legato ad altri metalli che ne migliorano le caratteristiche: si formano quindi soluzioni solide o nuove fasi. L'aggiunta di Mn (0,2%) ad esempio nelle leghe Mg-Al o Mg-Al-Zn permette di neutralizzare le impurezze di Cu, Fe e Ni creando composti intermetallici poco dannosi che a volte passano nella scoria o che sono poco catodici rispetto alla matrice. Si hanno precisi limiti di tolleranza al di sopra dei quali la

velocità di corrosione aumenta esponenzialmente. Alternativamente si può abbassare Cu, Fe, Ni.

Si può inoltre proteggere dalla corrosione con ricoprimenti sia di natura organica che inorganica.

5) EFFETTO DELLO ZN NELLE LEGHE DI Mg

Durante il trattamento del liquido si effettuano pratiche di affinamento per migliorare le caratteristiche meccaniche. Per la maggior parte delle leghe si aggiunge Zn, la cui fase α ha cristallo esagonale (come il Mg) con un diametro molto vicino a quello del Mg stesso. Osservando il diagramma Mg-Zn si nota come ad alte temperature si abbia $\sqrt{\text{Zn}}$ in soluzione nel liquido finché la % di Zn < 0,6. Superato tale valore si hanno pesanti nucleazioni (αZn) in fase liquida. Lo Zn fonde da centro dei cristalli di Mg offrendo il grano, infatti una microanalisi rivela zone ricche di Zn al centro dei cristalli di Mg. Si individua quindi un limite di massima solubilità di Zn in Mg pari allo 0,6%, al che posto od offese che con leghe solo binarie non si ottengono resistenze sufficienti. Nel caso di leghe più che binarie, l'effetto nucleante verso da composti contenenti Zn. Tuttavia lo Zn costa e quindi se utilizzato con parsimonia presentando anche le seguenti problematiche:

- esso reagisce con l'idrogeno generando l'idruro ZnH₂, il quale è un composto solido che espone lo Zn annullando l'effetto di nucleazione, ragion per cui in tal caso è preferibile effettuare flussaggio;
 - lo Zn reagisce con i ossigoli che sono in acciaio e in ghisa e a contatto con il liquido si formano composti intermetallici Fe-Zn e lo Zn viene nuovamente ossidato
 - infine lo Zn non funziona in leghe contenenti Al e Mn perché forma composti stabili già nel liquido dando luogo a inclusioni primarie che crescendo non hanno potere nucleante di cristalli di Mg => non si nuclea Zn in leghe contenenti Al e Mn
- Non interferiscono invece con l'affinamento del grano Zn, RE, Ag, Y, Gd, che conferiscono stabilità, resistenza meccanica e a creep. In definitiva lo Zn si mette sottoposizione di polverino, Zn si mescola e si cola in un tempo piuttosto breve.

4) MECCANISMI DI INDORIMENTO (LORO DIPENDENZA DA ELEMENTI LEGANTI, MICROSTRUTTURA ED EVENTUALE TRATTAMENTO TERMICO) E CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLE LEGHE DI Mg

Le leghe a base di Mg sono induribili per precipitazione, dispersione e soluzione solida. La seguente tabella fornisce una completa ed esauriente esposizione dei vari meccanismi di indurimento in funzione degli elementi leganti e con le relative proprietà meccaniche:

Elemento	colabilità	tendenza a dare difetti	effetto sulla metallurgia fisica	proprietà meccaniche	resistenza a corrosione
Ag	-	-	-	resistenza a T elevate e creep con RE	sfavorevole
Al	migliorativo	microporosità	indurimento sol. solida e precipitazione a T < 120°C	-	-
Ca	-	-	affinamento grano	resistenza a creep	sfavorevole
Cu	migliorativo	-	-	-	molto sfavorevole
Fe	-	-	-	-	molto sfavorevole
Li	evaporazione e incendio, necessari forni protetti	-	1) indurimento soluzione solida 2) bassa densità	aumenta duttilità	fortemente sfavorevole necessario coating*
Mn	precipitazione composti Fe-Mn	-	affina precipitati	resistenza creep	favorevole abbassa Fe
terre rare (Nd, Pr, Ce, La, Gd)	migliorativo	riduce microporosità	rafforza per soluzione solida e precipitazione	resistenza a elevata T e creep	favorevole
Si	sfavorevole	-	affina un poco il grano	resistenza creep	sfavorevole
Y	-	-	affina grano	R a elevata T e creep	favorevole
Zn	migliorativo	microporosità STRAPPI A CALDO	indurisce per precipitazione	fragilità e strappi a caldo senza Zr	-
Zr	-	-	affina grano	resistenza a T ambiente	-

* stato scopente contro l'umidità

La solubilità di elementi leganti decresce con la temperatura e quindi ci sono possibilità di indurimento per precipitazione, anche se nei sistemi in cui è possibile, l'effetto è molto minore che nell'Alluminio. Inoltre il processo di precipitazione è molto complicato.

Si può avere solubilità d'idrogeno nel fuso proveniente da vapore o da scarti riciclati umidi, si ottengono i seguenti rimedi:

- le leghe Mg-Al o Mg-Al-Zn sono più inclini a porosità e allora vanno degasate con cura.
- con lo Zr in lega si hanno meno problemi in quanto esso reagisce con l'H formando idruri solidi, il gas non è quindi più presente in soluzione nel liquido e quindi non sviluppa più porosità con bolle.

del solvente. Nella fase iniziale si ha coesistenza con piani che si muovono tutti. Si passa poi a una condizione di semicoesistenza con alcuni piani che si muovono e altri no ed infine si ha incoesistenza con i piani che si muovono liberamente ognuno indipendentemente dall'altro, parendo un cristallo che ha un'orientazione differente. Nella situazione ultima ^{si giunge} a una effettiva differente organizzazione degli atomi oltre che dei piani. Le fasi coesistenti deformano il reticolo cristallino al pari degli atomi in soluzione solida e oppongono una resistenza maggiore del reticolo della matrice in cui si sono formati, per cui le dislocazioni sopportano la presenza dei cluster. Per le fasi incoesistenti queste formano dei BPG che non si lasciano attraversare dalle dislocazioni. Nelle zone incoesistenti esse passeranno con estrema difficoltà, non attraversando il precipitato incoerente, ma aggirandolo e lasciandosi dietro dei precipitati nel loro passaggio.

Nel dettaglio si parla di MECCANISMO DI FRIEDEL e MECCANISMO DI CROWAN. Per precipitati molto grossi prevale il Meccanismo di Crowan con una τ critica per l'aggiramento dei precipitati, dato che sono richiesti spostamenti più bassi. Per precipitati più piccoli prevale il meccanismo di Friedel, ossia si ha una τ critica per il taglio dei precipitati. Le dislocazioni scelgono il meccanismo col minore dispendio energetico.

● **AFFINAMENTO DEL GRANO:** in tale tipologia di rafforzamento i bordi di grano agiscono come ostacoli al movimento delle dislocazioni, impedendone l'ulteriore propagazione. Poiché la struttura reticolare dei grani adiacenti differisce nell'orientazione, è richiesta più energia od una dislocazione per muoversi nel grano adiacente, poiché deve anche cambiare direzione. Così, modificando le dimensioni del grano si può influenzare maggiormente il movimento delle dislocazioni e la tensione di snervamento. Infatti l'ostacolo al movimento delle dislocazioni si traduce il sopraggiungere delle deformazioni plastiche e incrementa la tensione di snervamento del materiale. In definitiva la riduzione del diametro del grano aumenta il ^{di tensione} valore necessario a muovere una dislocazione attraverso il bordo di grano. Esiste dunque una proporzionalità inversa tra le dimensioni dei grani e la tensione di snervamento, descritta dalla LEGGE DI HALL-PETCH:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{D}}$$

con σ_y = tensione di snervamento
 K = coeff. di resistenza del bordo di grano (se è alto ostacolo molto il moto delle dislocazioni)
 D = diametro medio del grano.

● **INCUDIMENTO:** Consiste nel rafforzamento della lega in seguito a una deformazione plastica a freddo, che comporta una moltiplicazione delle dislocazioni quando il materiale viene lavorato a freddo, che interferiscono tra loro bloccandosi o vicenda, incrementando i difetti puntiformi e di conseguenza la resistenza meccanica. È bene effettuare i difetti incrementando per addolcire il materiale tramite ricristallizzazione in maniera tale da ottimizzare le caratteristiche meccaniche.

prodotti di grande spessore, per cui bisogna scegliere leghe con alti valori di tenacità e duttilità.

Inclusioni di Pb e Bi, che sono elementi bassofondenti, formano particelle fusibili all'interno della matrice di Al durante il riscaldamento che si genera nelle lavorazioni per esposizione al fuoco e portano alla frammentazione dello stesso, quindi migliorano la lavorabilità all'utensile. (lega 2041 T6 utilizzata per elementi filettati)

Per quanto riguarda la saldabilità bisogna sottolineare che il riscaldamento e la fusione nelle zone adiacenti al cordone di saldatura cancellano o smorzano gli effetti dei trattamenti T6 e T8, sicché il cordone (FUSION ZONE) e le zone adiacenti (HEAT AFFECTED ZONE) risultano poco resistenti. Tra le leghe saldabili si ha la 2219, resistente a trazione (STC) comunemente alle maggiori parti delle leghe Al-Cu, nello stato T8 resistente e molto tenace. Grazie al fatto che è ricca di Cu, post saldatura si recupera resistenza con meccanismi di rafforzamento per soluzione solida e invecchiamento naturale, due cause precipitazione delle fasi di GP. aumentando la resistenza. Di recente è stata introdotta la lega saldabile D135, allo stato T8 con altissima resistenza e tenacità a rottura grazie alla presenza di Li e Ag. L'Ag favorisce la nucleazione di precipitati rafforzanti ed anche la saldatura. Durante il raffreddamento e il successivo invecchiamento naturale avviene la precipitazione delle fasi rafforzanti δ' e poi prolungandosi il tempo precipitano anche θ' e T_1' su clusters di atomi di soluto indotti dalla presenza di Ag.

In fine per quanto concerne le applicazioni di tali leghe, esse vengono esponevolmente utilizzate per strutture aeronautiche e ad alta T e resistenza.

(O = cotto) che garantisce modesti incrementi di resistenza, ma elevato allungamento e duttilità. Per ottenere resistenze più elevate è necessario incrudire (H) tramite lavorazioni a freddo. Per materiali incruditi con contenuto di Alq superiore al 3% si ha che le dislocazioni sono riccoltate di precipitati e tali metalli sono caratterizzati dalla presenza di numerosissime dislocazioni, per cui sono pieni di precipitati (Al_2Mg_3) che nucleano ai bordi di grano. Di conseguenza si evita il verificarsi di corrosione intergranulare e transgranulare con peggioramento delle caratteristiche meccaniche. Si utilizzano allora Cr e Mn come inibitori della ricristallizzazione, evitando quindi la precipitazione ai bordi di grano grazie alla formazione del composto intermetallico $Al_2Mg_{12}Cr$.

Se tali leghe sono allo stato cotto (O) sono ben lavorabili a freddo, mentre se sono allo stato incrudito (H) risultano meno lavorabili. Per quanto riguarda le lavorazioni per esposizione di truciolo esse sono leggermente migliori allo stato incrudito. Inoltre per non incorrere nei problemi sopracitati di precipitazione sui bordi di grano ed evitare il fenomeno di AGE SOFTENING, ossia un addolcimento spontaneo nel tempo con perdita di caratteristiche meccaniche si pratica il trattamento H3: si incrudisce la lega fino a un tenore superiore a quello desiderato, poi si effettua una scaturza di distensione che porta all'annichimento delle dislocazioni (si ha attrazione tra i corpi delle dislocazioni che porta a un piano completo e la dislocazione sparisce), raggiungendo il livello di resistenza desiderato, che resta stabile in esercizio. Infine perché l'Al non ha transizione duttile-fragile, si possono usare elementi freddi per cui si possono avere applicazioni criogeniche.

5) COMPOSIZIONE, TRATTAMENTI, CARATTERISTICHE MECCANICHE E APPLICAZIONI INDUSTRIALI DELLE LEGHE DI AL DELLA SERIE 7XXX

Si tratta di leghe induribili per precipitazione, note anche come "Superduraluminio", in quanto hanno caratteristiche meccaniche più elevate di tutte le altre leghe di Al. Tali leghe possono essere suddivise in 2 famiglie:

LEGHE con Zn e Mg:

Hanno ottime capacità di sofferamento per invecchiamento con proprietà di resistenza medio-alta con precipitati η' Mg_2Zn e ottima saldabilità. Nel dettaglio le leghe 7005 T6 e 7033 T6, che non contemporaneamente sono molto saldabili, in quanto hanno una buona tendenza all'invecchiamento naturale e per velocità di sofferamento moderate mantengono dopo saldatura la soluzione metastabile sovrasaturata; ciò porta a una maggiore resistenza del cordone di saldatura. Per tali leghe si hanno applicazioni in tempo aerospaziale, in componenti molto sollecitati, sebbene in pressione e ciclegnici.

Esse sono leghe leggere, rafforzabili con precipitati η' Mg_2Zn , θ' Al_2Cu , ζ' Al_2CuMg , che permettono di raggiungere caratteristiche meccaniche migliori delle precedenti effettuando un trattamento termico T6. Al contempo esse risultano meno saldabili delle leghe tenaci, in quanto al riscaldamento della saldatura eliminano i precipitati rafforzanti.

Una problematica piuttosto accentuata in tali leghe è la resistenza alla corrosione non elevatissima, specie corrosione per esplosione e SCC. Ciò si poteva prevedere in quanto si tratta di leghe ad altissima resistenza e fortemente sollecitate, essendo ben noto che la resistenza meccanica è sempre inversamente proporzionale alla resistenza alla corrosione. Per ovviare a tale problematica si ricorre a una sorta di superinvecchiamento, o trattamento T7. Ad esempio la lega 7445, avendo un buon controllo delle impurezze offre una buona resistenza a SCC e a corrosione per esplosione.

Sono infine state sviluppate delle varianti di leghe, a base tenace di impurezze come Fe e Si e ciò ha permesso un sostanziale incremento nei valori della tenacità e rottura (lega 7445) sia nella direzione del traverso lungo che del traverso corto.

Di conseguenza tali leghe vengono impiegate nella realizzazione di componenti strutturali molto sollecitati dove è richiesta elevata resistenza e tenacità a rottura.

2) LEGHE Mg-Ag, Mg-Y o Mg-Y-Gd (composizione, microstruttura e proprietà)

LEGHE Mg-Ag

Si è visto che aggiungendo Ag nelle leghe Mg-Re-Zn aumentano le proprietà tensili, ottime sino a 250°, segue in cui sono superiori a quelle di ogni altra lega di Mg e sono comparabili con quelle delle leghe di Al da getto e ad alta resistenza. L'Ag, durante l'incrudimento, evita la nucleazione delle fasi metastabili e di conseguenza aumenta il numero di precipitati rafforzanti. Al contempo esso riduce la solubilità delle RE nella matrice di Mg in maniera tale da non far rimanere residui in soluzione solida. Le RE sono gli elementi che danno i precipitati rafforzanti. L'aggiunta di Ag fornisce molte le resistenza a creep sino a 200°. Di contro però, essendo un materiale molto pregiato, le sue leghe sono molto costose, ragion per cui se ne fa utilizzo specialmente in campo aerospaziale.

LEGHE Mg-Y

Grande all'incrudimento in lega dell'Ittazio (Y) si riesce a migliorare notevolmente resistenza meccanica e a creep della lega. L'Y è molto solubile nel Mg e dà rafforzamento per soluzione solida ed inoltre, svolgendo un trattamento termico T6 dà anche rafforzamento per precipitazione e dispersione. Sono state sviluppate le leghe Mg-Y-Nd (RE o Misch metal) - Zn che presentano:

- elevata resistenza a creep fino a 300°C;
- elevata resistenza meccanica a T_{amb};
- effettuando un T6 si ha una migliore resistenza a corrosione tra tutte le leghe di Mg, comparabile alle leghe di Al.

I problemi relativi alla realizzazione di leghe di Ittazio sono:

- alta temperatura di fusione, prossima a 1500°C;
- elevato costo dell'Y;
- grande affinità con l'ossigeno con conseguente rischio di perdita per ossidazione.

È possibile ovviare al problema utilizzando Mischmetal ricco di Y.

Le leghe con composizione bilanciata come la WE43 hanno elevate resistenza meccanica con basso decadimento per lunghi tempi di esercizio ed un'elevatissima resistenza a creep comparabile con quella della lega di Al A380.

Si può notare citare la lega EV31, in cui è presente il Gd (presente nel mischmetal) che stimola la precipitazione di fasi stabili come l'Ag. Tale lega ha eccellente resistenza alla corrosione tipica delle leghe con RE, ha elevate proprietà meccaniche sino a 250°C con lieve decadimento fino a 300°C ed eccellente resistenza a creep fino a 200°C. Il Gd migliora la fluidità in quanto il liquido si ossida meno rispetto a quello contenente Y, dunque la EV31 risulta più colabile della WE43 con vantaggi di produttività. Si tratta comunque di una lega costosa con applicazioni in campo aerospaziale e delle cose.

4) CORROSIONE NELLE LEGHE DI Mg

Il Mg è un metallo altamente anodico con potenziale elettrico più piccolo tra tutti i metalli esistenti. Se accoppiato con altri metalli in leghe si corrode galvanicamente in maniera più o meno veloce. Per corrosione si intende quella reazione di ossidazione in cui il metallo si ossida perdendo elettroni. In presenza di acqua (H_2O) o aria umida si passiva con formazione di $Mg(OH)_2$ che funge da strato protettivo del metallo dall'esterno ed inoltre è più resistente alla corrosione atmosferica dell'acciaio dolce. Tuttavia la membrana di passivazione che si crea è più porosa e meno stabile di quella che si crea nell'Al e nel Ti.

Il Mg è molto particolarmente resistente alla corrosione in ambiente secco con una velocità di corrosione pari a 0,25 mm/anno, mentre in prossimità di zone marine si corrode facilmente a causa della presenza di Cl^- , il quale distrugge lo strato di passivazione e dà vita al fenomeno corrosivo del pitting (corrosione localizzata). Il Mg non resiste molto a corrosione in ambiente acido.

Generalmente però esso non è utilizzato nella sua purezza di metallo, ma viene legato ad altri metalli che ne migliorano le caratteristiche formando soluzioni solide o nuove fasi.

L'aggiunta di Mn (0,2%) ad esempio nelle leghe Mg-Al o Mg-Al-Zn permette di neutralizzare le impurezze di Cu, Fe, Ni creando composti intermetallici poco dannosi che a volte passano nella scoria o che sono poco catodici rispetto alla matrice. Si hanno precisi limiti di tolleranza al di sopra dei quali la velocità di corrosione aumenta sensibilmente.

Alternativamente si può procedere abbassando le percentuali di Fe, Cu, Ni. Si può infine proteggere il metallo o la lega dalla corrosione ricorrendo a ricoprimenti sia di natura organica che inorganica.

6) LEGHE Mg-Al-Zn e Mg-Al-Mn (COMPOSIZIONE, MICROSTRUTTURA e PROPRIETÀ)

LEGHE Mg-Al-Zn (AZ)

L'introduzione di Zn nelle leghe Mg-Al permette di limitare o eliminare del tutto la quantità in volume della fase β : si ha quindi un conseguente miglioramento della resistenza a creep e ancor di più un importante rafforzamento per precipitazione. Durante l'invecchiamento infatti la presenza di Zn porta alla formazione del composto $MgZn_2$, semicoesente e rafforzante. Bisogna però non esagerare con l'introduzione dello Zn che generalmente non supera il 1-3% per non incorrere in indesiderati strappi a caldo. Va inoltre sottolineato che Zn ed Al devono avere livelli con bilanciamento inverso, cioè se si aumenta lo Zn si diminuisce l'Al e viceversa. Un esempio è la lega AZ91, la più usata tra le leghe di Mg, applicata in tutti gli usi generali. La lega AZ91B è suscettibile alla corrosione atmosferica in quanto presenta percentuali di Cu, Fe e Ni non bassissime, potrà quindi essere utilizzata laddove non sia richiesta resistenza a corrosione, come parti non verniciate in ambienti non corrosivi. La AZ91D invece possiede resistenza a corrosione atmosferica eccellente.

LEGHE Mg-Al-Mn (AM)

L'introduzione di Mn nelle leghe Mg-Al contrasta le impurezze che generano corrosione. Conferisce alla lega una migliore tenacità e duttilità grazie alla riduzione della percentuale della fase β $Mg_{17}Al_{12}$ presente a bordo di grano. Si producono leghe ad alta purezza con meno Al ed avere elevate resistenza a corrosione (ad es AM60, AM50). Tali leghe vengono colate a pressione a T elevate e grazie alla duttilità e resistenza meccanica vengono impiegate nel ramo automotive per la realizzazione di sedili, ruote e rotoli.

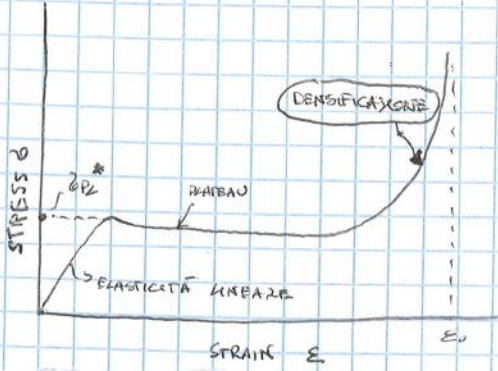
Si ha che la solubilità degli elementi leganti decresce con la temperatura, e quindi si hanno possibilità di indurimento per precipitazione con effetto comunque molto minore che nell'alluminio.

Si può inoltre avere solubilità di idrogeno nel fuso, proveniente da vapori o da scarti riciclati umidi. Per evitare ciò si adottano i seguenti rimedi:

- le leghe Mg-Al o Mg-Al-Zn sono più inclini a porosità e spesso subiscono degradati con cloro
- con lo Zn in lega si hanno meno problemi in quanto esso reagisce con l'idrogeno formando idruri solidi; il gas non è quindi più presente in soluzione nel liquido e non sviluppa più porosità con bolle.

Le caratteristiche meccaniche delle leghe di Mg sono:

- leggerezza (è il più leggero tra tutti i metalli) e più leggero rispetto all'Al (30%) e molto più leggero rispetto all'acciaio (45%);
- ottima lavorabilità (per opposizione di truciolo) con utensili che durano mediamente di più;
- capacità di sovraccamento elevata
- grande resistenza
- discreta duttilità, in quanto avendo struttura esagonale compatta non ha molti piani di scivellamento;
- ottima finitura superficiale che non richiede setolifica post-trattata
- discreta durezza



3) PROCESSI DI PRODUZIONE DELLE SCHIUME METALLICHE

(46)

CELLA CHIUSA

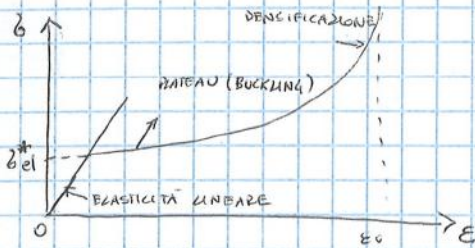
- 1) È possibile la creazione di una schiuma tramite il soffoggio di bolle all'interno di un fluido e condizione che questo sia abbastanza pastoso e viscoso da permettere alle bolle di rimanere tali per il tempo che occorre per la solidificazione. Tale processo si utilizza per materiali ceramici, polimeri e metalli, con la particolare occorrenza nel caso di materiali metallici di aumentare la viscosità inserendo particelle ceramiche di Al_2O_3 , SiC o TiB_2 . Il soffoggio è effettuato con gas come O_2 , CO_2 , gas nerti, ottenendo schiume a celle chiuse a bassa densità relativa (0,03-0,1).
- 2) Alternativamente all'insufflazione di gas si può distribuire un agente schiumogeno che si dissocia, (ad esempio TiH_2 o di sodio di 465°) all'interno di un materiale fuso, pastoso o semisolido. Si effettua poi un'aggiunta di 1-2% di CaO per aumentare la viscosità realizzando celle chiuse di diametro 0,5-5 mm e densità relativa 0,07-0,2. Viene utilizzato solo Al in quanto si ha una temperatura abbastanza bassa tale da poter controllare la decomposizione di TiH_2 e di curare perché gli altri metalli soffiano da infortunamento da idrogeno.
- 3) Si può avere distribuzione di agente schiumogeno con dissociazione di TiH_2 durante sintesi, ma con una finissima polvere di metallo (Al, Cu, Ni, Zn, Mg, leghe ferrose, resine metalliche, intermetallici) viene miscelata con una finissima polvere di agente schiumogeno (idruro di Zn, Ti, Mg con temperature di decomposizione tra 300 e $600^\circ C$). Viene poi compattata la polvere in una pressina avendo il "verde" e sintetizzando successivamente a una temperatura fra $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ ottenendo un metallo poroso a celle chiuse. Il pezzo avrà dimensioni e forma finale del contenitore e si può lavorare per operazioni di truciolo e deformazione plastica sino a ottenere la forma solida. Le celle chiuse che si ottengono hanno un diametro fra 4 e 5 mm e densità relative maggiori o uguali a 0,1.
- 4) Si ha produzione di schiume anche tramite espansione di gas intrappolati. Tale metodo consiste nella compressione di polveri con gas nerti come argon ad alta pressione, successivo riscaldamento con espansione del gas e scostamento viscoso del metallo ottenendo celle chiuse con densità relativa fino a 0,5 e dimensione delle celle da 10 a 300 μm .

CELLA APERTA

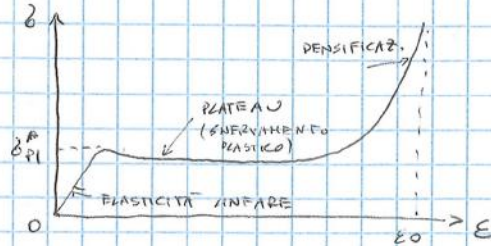
I processi di fabbricazione di schiume a celle aperte utilizzano l'infiltrazione e alla fine la distribuzione dello scheletto. Si può effettuare l'infiltrazione di slurry ceramici e scopriare schiume polimeriche a celle aperte e successiva reticolazione e risalita del polimero, colaggio del metallo fuso e rimozione meccanica dello scheletto in ceramica. Si ottengono celle aperte con diametro 1-5 mm e densità relative dell'ordine di 0,05-0,2. Si ha molta incostanza con PVD (deposizione di rospi contenenti il metallo in questione) di schiume polimeriche a celle aperte seguita da risalita, per l'eliminazione dello scheletto polimerico infine un ulteriore processo che permetta di ottenere un metallo poroso a celle aperte è l'infiltrazione del metallo liquido su una compattazione di polveri di sali inorganici ($NaCl$...). Il manufatto ottenuto è lavabile, dopo il consolidamento, per operazioni di truciolo e successivamente viene sciolto lo scheletto tramite dissoluzione immergendo il tutto in un apposito solvente. Densità relativa e dimensione delle celle dipendono dal grado di compattazione delle particelle della pressina e variano tra 0,04 a 0,30 e da 10 μm a 100 μm .

Risulta infine possibile individuare comportamenti differenti della deformazione a seconda del materiale:

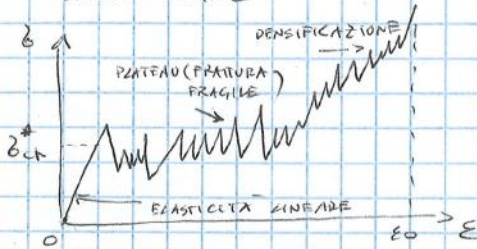
ELASTOMERO
COMPRESSIONE



ELASTO PLASTICO
COMPRESSIONE



ELASTO - FRAGILE



Nelle schiume elastomeriche, come si nota nel diagramma, la deformazione degli struts non è a flessione, ma è possibile che essi diano luogo a fenomeni di buckling, cioè instabilità elastica.
Nelle schiume di materiale ceramico gli struts si rompono invece in modo fragile dando perciò origine all'andamento in figura.

$$\text{Si ha: } E_0^* \propto \frac{P}{AE^*} \propto \frac{\delta_{CELL}}{E_{CELL}} = K_1 \frac{F}{e^2} \cdot \frac{E_s \cdot e^4}{F e^2} = K_2 E_s \left(\frac{e^2}{e^2} \right)^2$$

$$\text{per cui } \frac{E_0^*}{E_s} = K_{E,0} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2$$

Tale formula risulta valida per schiume a celle aperte con

E_0^* = modulo elastico della schiuma

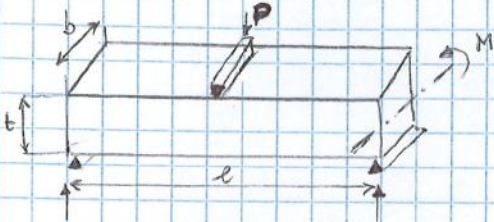
E_s = modulo elastico del materiale monolitico

$K_{E,0}$ = costante relativa al caso elastico per celle aperte ($K_{E,0} \in [0,4-4]$)
 variabile a seconda della struttura della schiuma nel range
 indicato

$\frac{\rho^*}{\rho_s}$ = densità relativa precedentemente definita

7) VANTAGGI DELL'UTILIZZO DI PANNELLI IN SCHIUMA METALLICA CHE LAVORANO A FLESSIONE A PARI RIGIDEZZA

La flessione semplice a 3 punti di un pannello in schiuma metallica è un caso di studio che permette di mettere in evidenza le proprietà di resistenza, leggerezza e rigidità della schiuma metallica. Il risultato notevole che si ottiene consiste nel fatto che aumentando i valori di massa a parità di resistenza e rigidità, la sua struttura può essere collegata notevolmente con l'utilizzo di pannelli in schiuma. Si consideri il seguente pannello:



GEOMETRIA DEL PANNELLO:

- lunghezza l
- larghezza b
- spessore t
- momento d'inerzia $J = \frac{bt^3}{12}$
- y distanza dall'asse neutro dello strato più debole, pari a $t/2$ nel caso elastico

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE:

- modulo elastico E
- ρ = densità del materiale scelto
- massa $m = \rho b t l$
- B_1 costante di flessione elastica dipendente dalla distribuzione del carico; essa è pari a 48 per la flessione a 3 punti
- B_2 costante per la flessione con sovraccarico dipendente dalla distribuzione del carico, $B_2 = 4$ per flessione a 3 punti
- P = forza applicata al pannello
- M = momento flettente applicato al pannello
- δ = massima inflessione del pannello

PER QUANTITÀ ALLE CONDIZIONI

$$\delta = \frac{P l^3}{B_1 E J}$$

La rigidità flessionale S sarà pari a:

$$S = \frac{P}{\delta} = \frac{B_1 E J}{l^3}$$

Tale valore di rigidità flessionale dovrà risultare maggiore di un certo valore di rigidità flessionale minimo S_{min} per soddisfare i requisiti di progetto:

$$S \geq S_{min} \Rightarrow S_{min} = \frac{B_1 E b t^3}{12 l^3}$$

In base a tale tipo di progettazione alle condizioni limite (S_{min}) si ricava lo spessore minimo e la massa finale del pannello:

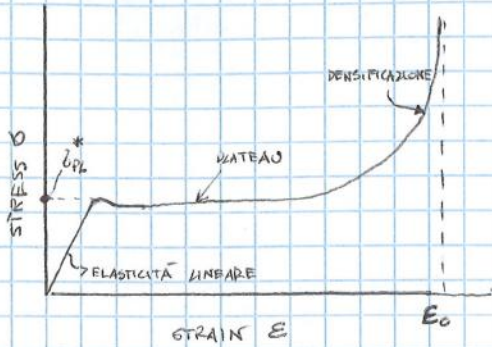
$$t = l \cdot \left(\frac{12 S_{min}}{B_1 E b} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$m = \rho b t l = \rho b l^2 \left[\frac{12 S_{min}}{B_1 E b} \right]^{\frac{1}{3}} = \left[\frac{42 S_{min} \cdot b^2}{B_1} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot l^2 \cdot \left(\frac{\rho}{\sqrt[3]{E}} \right)$$

8) COMPORTAMENTO NON LINEARE CON SVERNAMENTO O PLATEAU IN COMPRESIONE DI SCHIUME

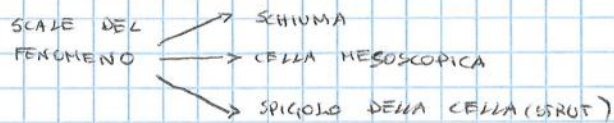
Oltre al regime elastico, nei materiali elastoplastici, si verifica il collasso plastico con un lungo plateau piatto o leggermente crescente come si nota nel grafico seguente:

SCHIUMA ELASTO-PLASTICHE
COMPRESIONE



La tensione alla quale cambia il comportamento della schiuma viene definita tensione di collasso plastico σ_{PL}^* e si può mettere in relazione alla densità relativa utilizzando il modello della deformazione a compressione secondo il quale lo schiacciamento induce una flessione nelle travi; si applicano le forze nei nodi e si considerano gli strut come delle travi quantificando con σ la loro deformazione.

Il modello può essere rappresentato secondo 3 scale:



SCHIUMA A CELLA APERTA

● SCHIUMA

- P = forza esterna applicata sulla schiuma
- σ_{PL}^* = tensione di compressione che porta al collasso plastico della schiuma macroscopica

● CELLA

- F = forza di compressione applicata sulla cella
- $M_{opp} = F \cdot l$ momento applicato ai nodi della cella che li rende come delle cerniere plastiche quando si verifica il collasso plastico
- $\sigma_{PL,CELLA}$ = tensione di compressione che causa il collasso plastico della cella a causa del momento applicato sui nodi (M_{opp})

● STRUT

- M_{PL} = momento di collasso plastico dello strut
- σ_{ys} = tensione di svernamento del materiale dello strut

$$M_{PL} \approx \frac{\sigma_{ys} \cdot J}{t} \propto \sigma_{ys} \cdot t^3$$

Per la teoria della trave si osserva che la plasticizzazione degli struts quando la tensione dovuta al momento flettente M_{pl} sarà pari alla tensione di svernamento del materiale σ_{ys} .

Si effettua un primo cambiamento di scala (schiuma \rightarrow cella) assumendo che non appena inizia il collasso plastico della cella segue subito quello della schiuma:

$F \propto P$ (il carico P al quale è sottoposta la schiuma è proporzionale a F per l'equilibrio delle forze)

$$\sigma_{PL,CELLA} = \sigma_{PL}^*$$

$$M_{opp} \propto F \cdot l \propto \sigma_{PL,CELLA} \cdot l^3 \propto \sigma_{PL}^* l^3$$

Si effettua poi un secondo cambiamento di scala (cella \rightarrow strut) per cui:

$M_{opp} = M_{pl}$ (il momento applicato dalla forza sulla cella che provoca la deformazione delle cerniere nei nodi, provoca al contempo il collasso

9) DIPENDENZA DEL MODULO ELASTICO DALLA POROSITÀ IN SCHIUME METALLICHE

Le schiume metalliche hanno una struttura cellulare costituita da un metallo solido il cui volume è costituito prevalentemente da pori, o da spazi vuoti. Di conseguenza dimensione, struttura e distribuzione dei pori risultano parametri fondamentali nella determinazione delle proprietà meccaniche. Per quanto concerne il modulo elastico si considereranno due situazioni equivalenti al modulo E^* per le schiume a cella aperta e E_c^* per quelle a cella chiusa. Si effettuano due successivi cambi di scala (dalla strut alla cella, dalla cella al pezzo).

• CELLA APERTA

SCHIUMA

P = forza applicata sul pezzo

A = sezione resistente

E^* = deformazione schiuma

CELLA

F_c = forza applicata sulla cella

δ_{cell} = deformazione della cella

$\sigma_{cell} = F_c / l^2$ (tensione di compressione)

l = dimensione caratteristica della cella

V = volume della cella $\propto l^3$

STRUT

t = spessore

l = dimensione caratteristica della

J_{strut} = momento d'inerzia $\propto t^4$

E_s = modulo elastico materiale metallico

δ = deflessione della strut $\approx F l^3 / E_s J_{strut}$

ϵ_s = deformazione flessionale della strut $\approx \frac{\delta}{l} \approx \frac{F \cdot l^2}{E_s \cdot t^4}$

Si effettua un primo cambiamento di scala: schiuma \rightarrow cella

Dall'equilibrio della forza il carico P della schiuma è proporzionale al carico F che agisce sulla cella. Inoltre si assume che anche la deformazione del pezzo macroscopico e della cella sia proporzionale ($E^* \propto E_{cell}$) se si resta in campo elastico. Per cui si ha:

$$E^* \propto \frac{P}{A E^*} \propto \frac{F}{l^2 \cdot E_{cell}} \propto \frac{\delta_{cell}}{E_{cell}}$$

Si effettua poi un secondo cambiamento di scala: cella \rightarrow strut

Si collega appunto la cella allo strut, assumendo che in campo elastico si abbiano deformazioni proporzionali: $E_{cell} \propto E_s$

Si procede con un terzo cambiamento di scala, all'indietro: strut \rightarrow cella

Si effettua un confronto tra la cella contenente strut e vuoto e il solido, cioè il suo scheletro:

$$\rho_{cell} = \frac{m_{cell}}{V_{cell}} \quad ; \quad \rho_{scheletro} = \rho_{strut} = \rho_s = \frac{m_{scheletro}}{V_{scheletro}}$$

Essendo la massa della cella e dell'insieme degli strut che la costituiscono la medesima, il rapporto tra le densità sarà inversamente proporzionale a quello dei volumi: $\left(\frac{\rho_{cell}}{\rho_s} \right) = \frac{V_{scheletro}}{m_{scheletro}} \cdot \frac{m_{cell}}{V_{cell}} = \frac{V_{scheletro}}{V_{cell}}$