Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: 831 DATA: 18/02/2014

A P P U N T I

STUDENTE: Rivetti

MATERIA: Materiali per l'industira 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 STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 110

MATERIALI PER L'INDUSTRIA MECCANICA

A.A.: 2013/2014
Prof. DOGLIONE
Autore: Riccardo Rivetti

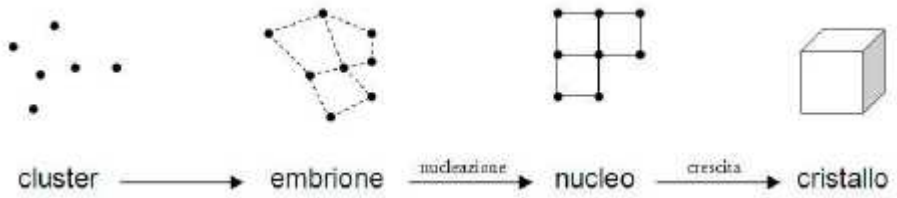
1. LA SOLIDIFICAZIONE

1.1 Fisica della solidificazione

La solidificazione è il passaggio dallo stato liquido allo stato solido. Questa trasformazione di fase avviene in due stadi: la nucleazione e la crescita. La prima consiste nella formazione di particelle molto piccole di solido all'interno di una fase liquida. A partire da queste particelle avviene la crescita; e le particelle nucleate possono aumentare le loro dimensioni fino alla scomparsa della fase liquida. Come in ogni trasformazione di fase, le caratteristiche del solido che si formerà dipenderanno dalla temperatura, dal tempo e dalle caratteristiche del diagramma delle fasi (nel caso di sistemi binari).

Nucleazione: ci sono due tipi di nucleazione: omogenea ed eterogenea. La distinzione viene fatta in base al sito in cui avviene la nucleazione:

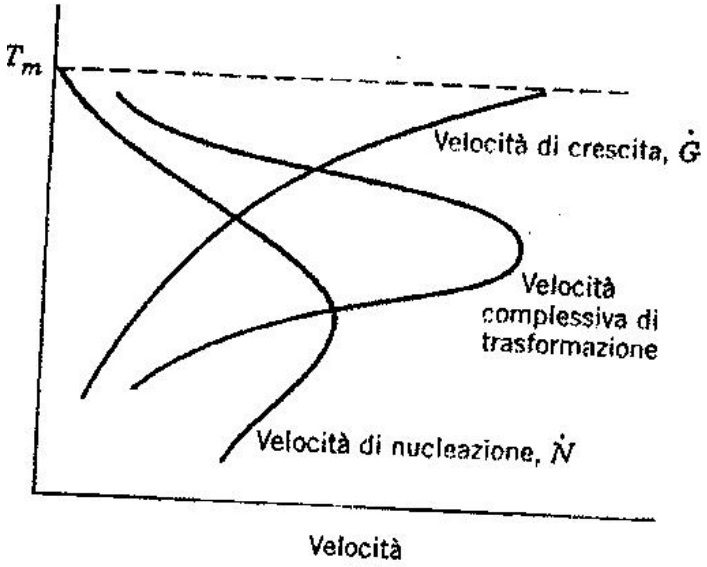
- *Nucleazione omogenea*: i nuclei si formano uniformemente all'interno del liquido. Arrivati alla temperatura di solidificazioni si formano nel liquido i primi raggruppamenti di atomi di fase solida (embrioni) che per diventare dei veri e propri nuclei stabili, per la termodinamica, devono raggiunge una dimensione critica (competizione tra energia di volume e tensione superficiale) superata la quale inizia l'accrescimento.



La spinta termodinamica aumenta all'aumentare del sottoraffreddamento (differenza tra temperatura di fusione e temperatura del sistema) perciò si formeranno più nuclei stabili nell'unità di tempo. Questa tendenza prosegue fino a raggiungere un massimo per poi diminuire perché la diffusione (proporzionale alla temperatura) diminuisce; infatti si possono raggiungere per velocità di raffreddamento elevate (10^5 °C/s) delle strutture amorfe anche nei metalli(non nucleano cristalli).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 110



Nucleazione e crescita hanno andamento opposto in funzione del sottoraffreddamento e opposti sono anche gli effetti che portano sulla microstruttura. Con basso sottoraffreddamento, nucleano pochi cristalli nel liquido che però si accresceranno velocemente dando origine a una struttura policristallina a grano relativamente grosso. Se il sottoraffreddamento è elevato nucleano tanti cristalli ma che cresceranno molto più lentamente portando a una struttura più fine. La dimensione dei grani influisce direttamente sulla resistenza a rottura dei metalli usati a temperature ordinarie per cui sarebbe meglio, da questo punto di vista, avere microstrutture fini.

Nella pratica, per effettuare un sottoraffreddamento elevato è necessario asportare molto velocemente il calore e questo si può fare solo con tecnologie di colata che usano stampi in acciaio (alta conduttività). Se l'asportazione di calore durante la solidificazione è minore (colata in sabbia) per avere una nucleazione maggiore a alta temperatura si deve inoculare la fase liquida con particelle solide insolubili che fungono da germi di nucleazione eterogenea e affinano la struttura. Le sostanze usate per nucleare le varie leghe sono:

- Ghisa: inoculazione con leghe ferro-silicio
- Leghe di rame: Fe, Co, Zr
- Leghe di magnesio: Zr, composti organici
- Leghe di Al: fosforo per leghe ipereutettiche (rende più fini i cristalli di silicio)

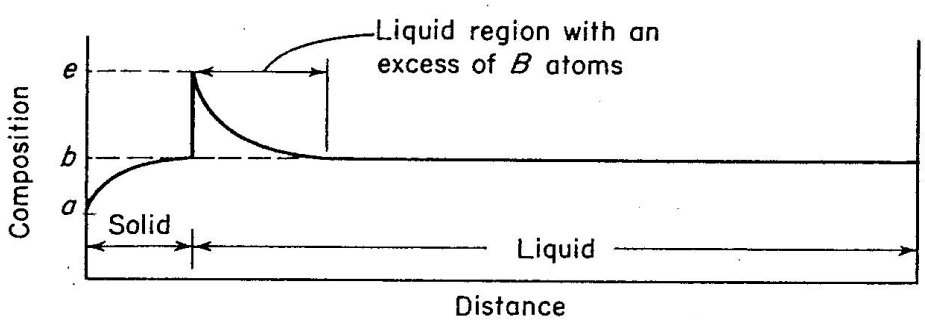
1.2 Solidificazione dei metalli puri e delle leghe

Durante la solidificazione di un metallo puro l'interfaccia solido/liquido è generalmente planare, a meno che non sia imposto grave sottoraffreddamento termico. Durante la solidificazione di una lega, l'interfaccia S / L e quindi la modalità di solidificazione può essere planare, cellulare, o dendritico seconda delle condizioni di raffreddamento e del sistema materiale coinvolto.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 110

un liquido anch'esso a T_3 ma con una concentrazione pari a *e* (vedere diagramma delle fasi) che è più elevata rispetto a quella del liquido puro (anch'essa pari a *b*). Per effetto di questo gradiente di concentrazione si avrà una diffusione e l'andamento della concentrazione nello spazio è descritta dalle leggi della diffusione.



Combinando quell'andamento spaziale di concentrazione con il diagramma delle fasi si può costruire punto per punto la curva che l'andamento della temperatura di fusione della lega (per effetto della variazione di concentrazione c'è un effetto di variazione della temperatura).

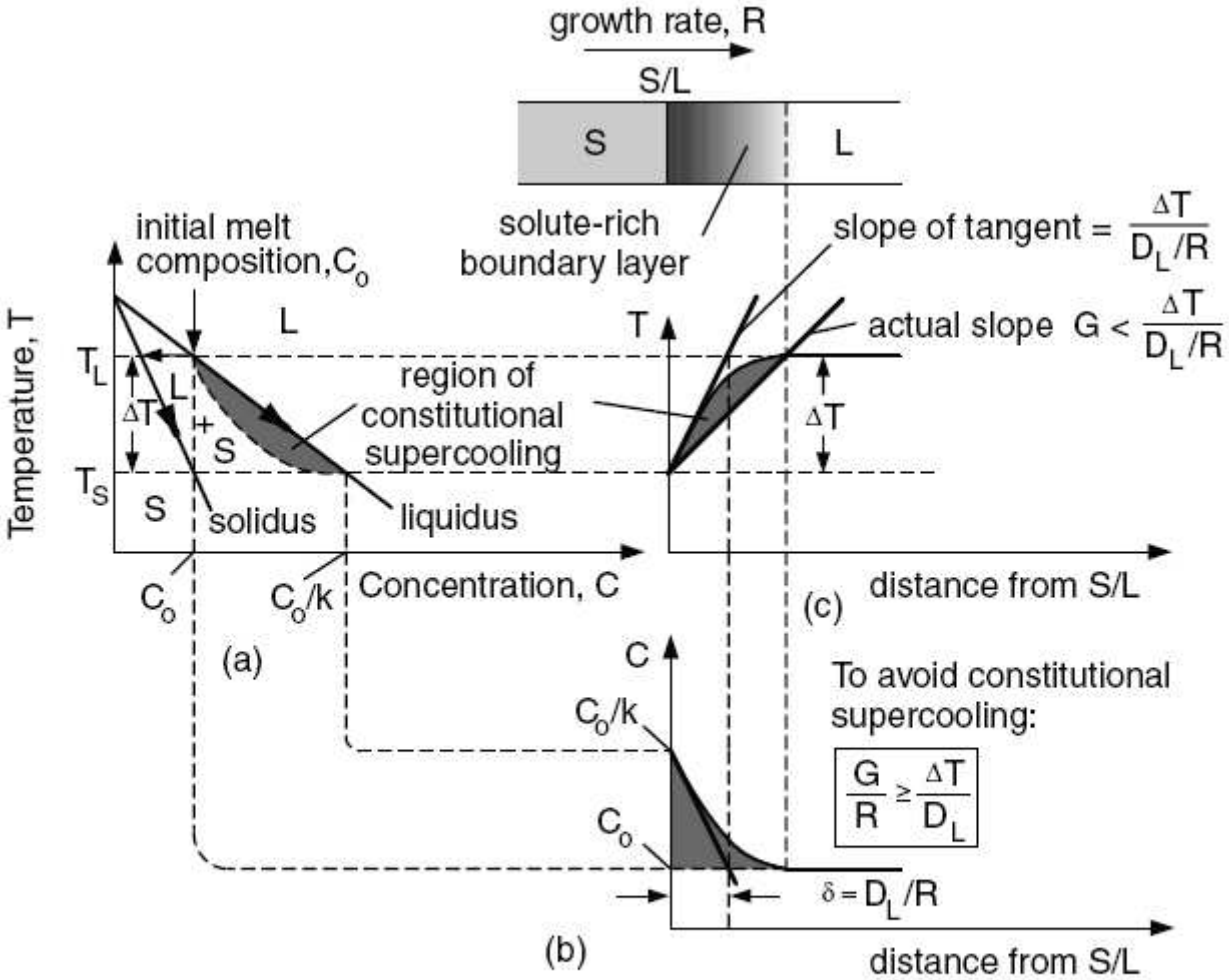
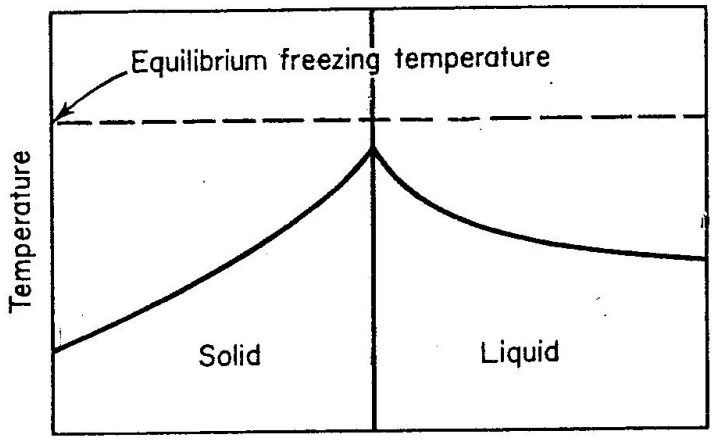


Figure 6.10 Constitutional supercooling: (*a*) phase diagram; (*b*) composition profile in liquid; (*c*) liquidus temperature profile in liquid.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 110

Per effetto della solidificazione all'interfaccia viene liberato il calore latente che provoca un locale innalzamento di temperatura che progressivamente, allontanandosi dal fronte diminuisce.



Le protuberanze poiché sono in contatto con un liquido più freddo dell'interfaccia crescono prima formando il braccio primario della dendrite. La situazione si ripete sul lato della dendrite dando origine a bracci secondari e così via. Le dendriti inoltre sono equispaziate perché le condizioni favorevoli si ripetono periodicamente in quanto un braccio che solidifica libera il calore latente che "avvelena" le zone circostanti.

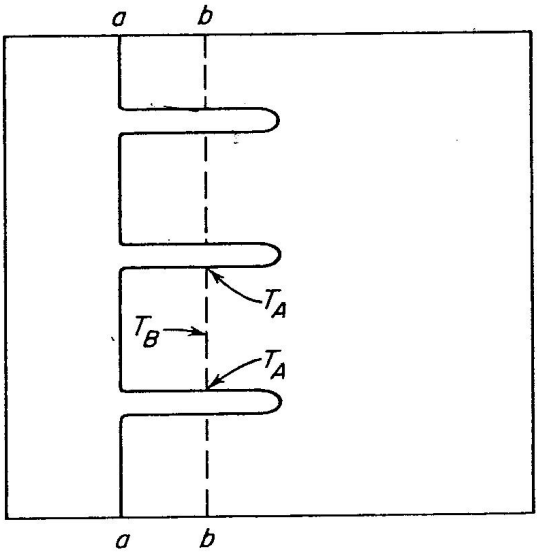


Fig. 15.13 Secondary dendrite arms form because there is a falling temperature gradient starting at a point close to a primary arm and moving to a point midway between the primary arms. Thus, $T_B < T_A$.

Riassumendo la crescita dendritica è favorita da:

- Intervallo di solidificazione lungo (alta differenza di temperatura tra liquidus e solidus)
- Da un basso coefficiente di diffusione.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 110

- *Dimensioni del getto*: le grandi dimensioni restringono il gradiente termico a percentuali piccole del volume complessivo e quindi favoriscono la cristallizzazione equiassica.

1.3 Resistenza meccanica della microstruttura ottenuta da fusione

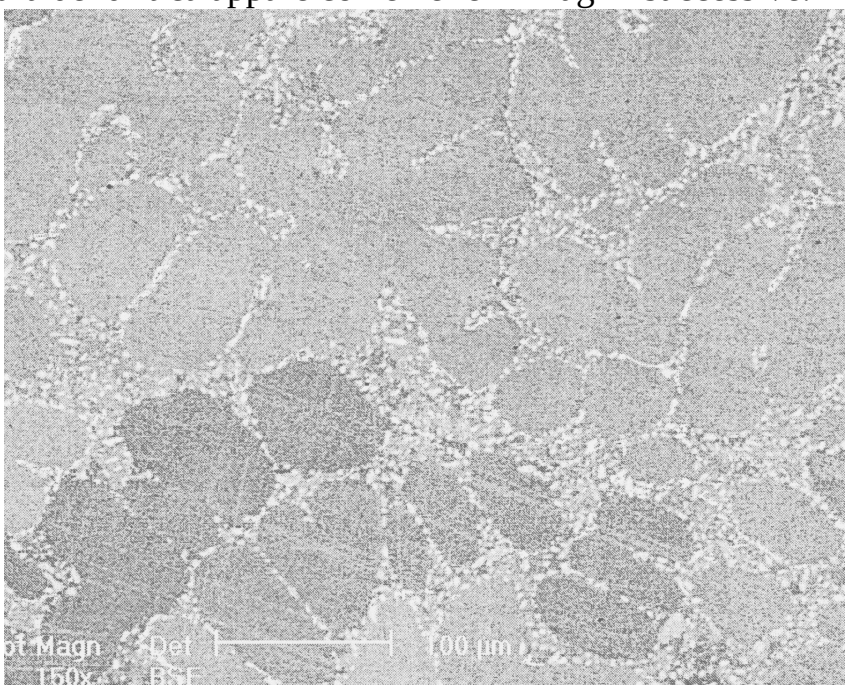
Si è visto che nella solidificazione si origina una struttura dendritica e che la grandezza di queste strutture varia a seconda del raffreddamento; questa quantità può essere stimata con la legge di Chvorinov

$$\dot{T} \propto \left(\frac{A}{V}\right)^2$$

Dove A è la superficie di scambio termico e V è il volume della parte interessato dallo scambio.
La velocità di raffreddamento dipende da:

- materiale dello stampo (sabbia: lento, conchiglia metallica: veloce, stampi da pressocolata: veloce)
- geometria: le parti sottili, gli spigoli, ecc… si raffreddano più in fretta.
- Temperatura di colata: una colata a temperatura più elevata aumenta la crescita dei grani.
- Geometria dell'alimentazione dei canali di colata
- Presenza di raffreddatori.

La microstruttura dendritica appare come nelle immagini successive.



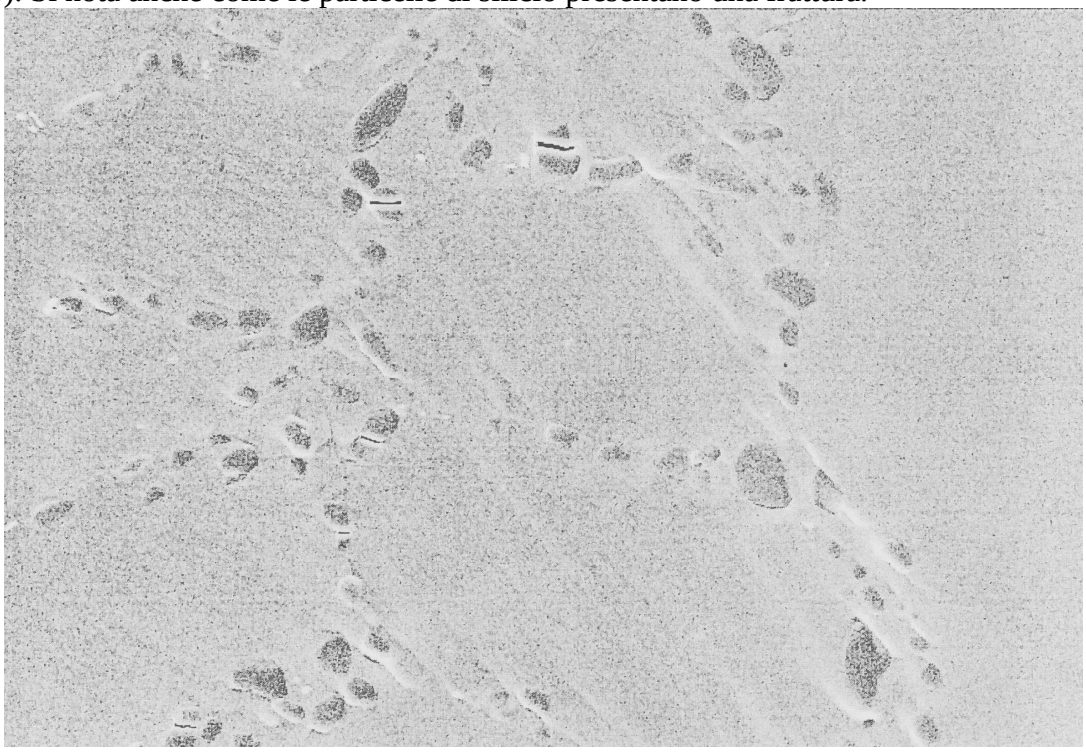
Microstruttura di una lega Al-Si ipoeutettica a 2 diversi ingrandimenti di una colata in sabbia

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 110

tensione al di sopra del limite elastico si saranno mosse un numero *n* di dislocazioni che dipende dalla grandezza della cella *L* (*n*=f(*L*) dove f è crescente: più grande è la cella più dislocazioni si muovono sotto un certo livello di tensione).

Nella figure le striature più chiare rappresentano le bande di dislocazione (dislocazioni uscite dal cristallo). Si nota anche come le particelle di silicio presentano una frattura.



Le dislocazioni, muovendosi, trasportano i propri campi di tensione elastica che, quando andranno a impattare sulle particelle di silicio, le solleciteranno. Dislocazione dopo dislocazione le tensioni dovute ai campi di tensione di queste ultime si sommano e aumenta la sollecitazione sulle particelle di silicio. Raggiunta una soglia critica avviene una decoesione delle particelle dalla matrice metallica oppure la fratture delle particelle stesse.

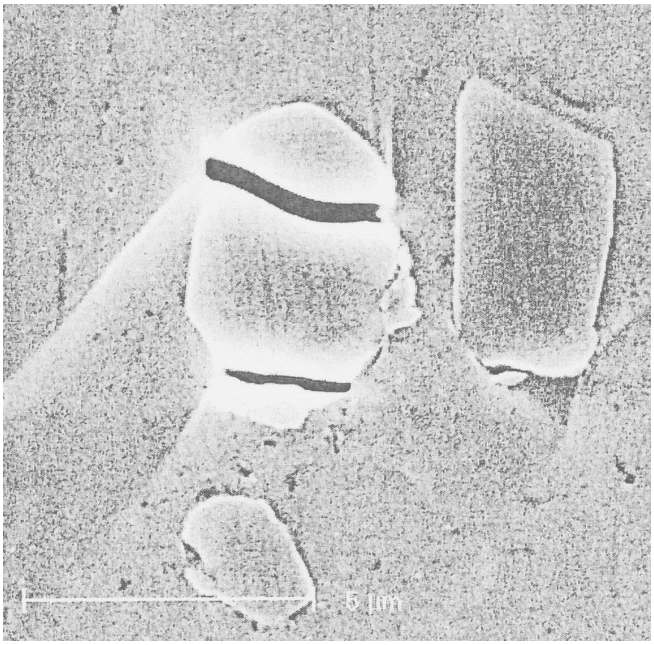
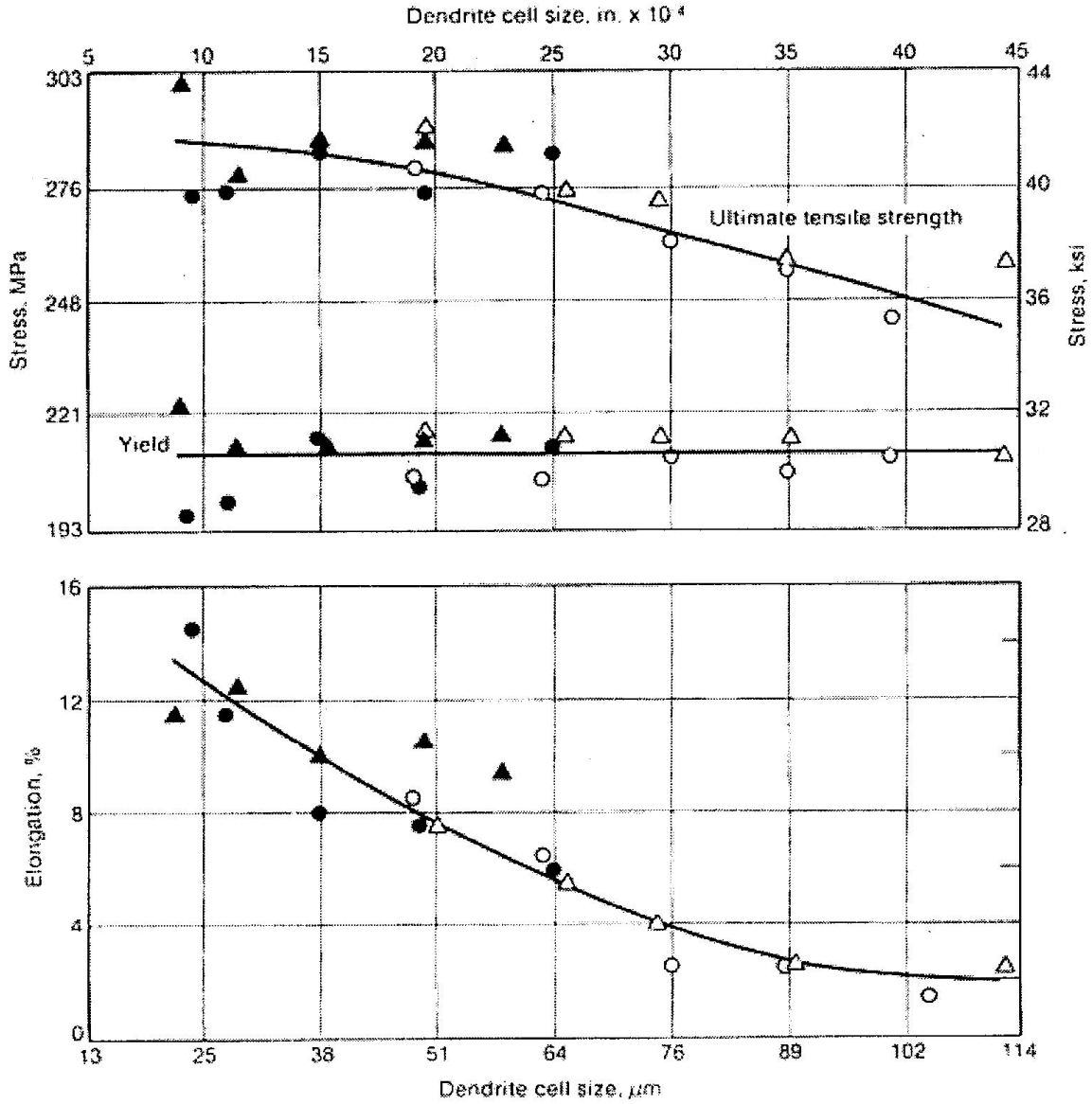


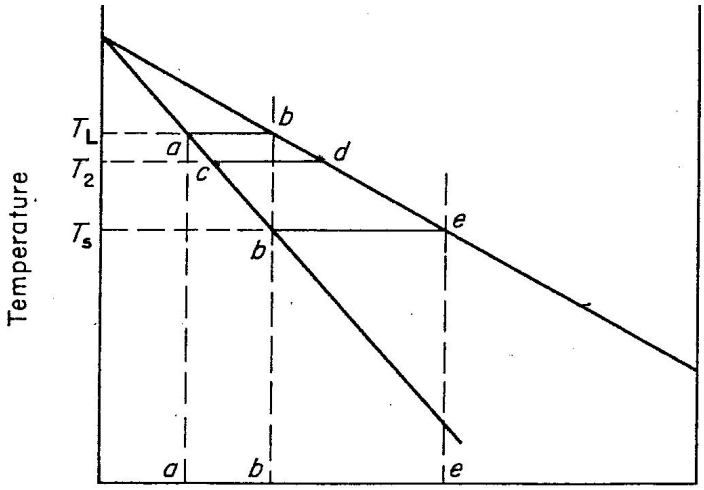
Immagine: Particella di Si fratturata.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 110



Ricordando che la dimensione della cella dendritica D_{eq} è legata alla lunghezza del cammino delle dislocazioni (stesso ordine di grandezza) e che il D_{eq} è legato alla velocità di raffreddamento si può correlare L (lunghezza cammino dislocazione) con le caratteristiche geometriche del getto.



Lunghezza della cella dendritica:

$$L = k_1 \cdot t_s^{\,q}$$

- t_s tempo di solidificazione
- $q \approx 2$

la velocità di raffreddamento:

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_L - T_S}{t_s}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 110

- Minori tempi di montaggio (per via del minor numero di componenti del sistema)

Per quanto riguarda la progettazione le caratteristiche più rilevanti sono:

- Proprietà isotrope del materiale (nelle lavorazioni per deformazione plastica si ha un orientamento preferenziale dei grani, il che implica anisotropia)
- Progettazione funzionale: si concepisce solo il pezzo finale in termini di stress, rigidezza e ingombro.

Però questo tipo di processo porta con sé problematiche di tipo impiantistico (forni, vasche di trattamento termico, impianti di movimentazione,…) e soprattutto di tipo tecnologico e metallurgico.

2.1 Incertezza dei valori di resistenza

Il problema più grande è la determinazione delle caratteristiche meccaniche del getto. Come è noto, le proprietà meccaniche dipendono molto dalle caratteristiche della microstruttura e da quanto detto in (1.3) dipendono a loro volta da come avviene la solidificazione. Quindi c'è una discrepanza tra le proprietà elencate nella normativa e quelle reali del getto soprattutto per quei componenti che presentano parti con diverse velocità di raffreddamento. In poche parole peggiora la riproducibilità delle proprietà meccaniche.
Questo significa che le proprietà saranno note solo con una certa incertezza che si può ricavare da un'analisi statistica.
Le distribuzioni statistiche che rappresentano la dispersione dei dati delle prove sono la nomale e la Weibull.
Nel caso di provette colate a parte o ottenute come appendice dal getto; la distribuzione di riferimento è la normale (o gaussiana) definita da una media *m* e uno scarto tipo *s* dei valori di carico di rottura *R*.

$$m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i \qquad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - m)}{n-1}}$$

la media e lo scarto tipo definiscono la funzione di distribuzione di probabilità, la cui espressione analitica è:

$$p(R_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R-m}{s}\right)^2\right]$$

e rappresenta il valore di probabilità associato a un certo valore di carico di rottura.
La probabilità invece di avere una carico di rottura al di sotto di un valore R* è data dalla funzione di probabilità cumulata ottenuta integrando da - ∞ a R* la funzione di distribuzione di probabilità:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 110

Tale distribuzione riesce a cogliere meglio l'effetto di scala. Aumentando le dimensioni del pezzo il raffreddamento è più lento e la struttura dendritica è più grossolana e inoltre aumenta la probabilità di trovare difetti.
Il fattore di forma, rappresentato dall'esponente m, mi dà una misura della dispersione dei dati e assume diversi valori a seconda del materiale, più basso è il valore di m più forte è la dispersione (la curva di distribuzione si appiattisce):

- m=30 per i ceramici
- m=50 per metalli forgiati
- m=80 per laminati metallici
- m=30 per getti
- m=50 per getti premium quality (getti con restrizioni maggiori)

i vari fattori sono ricavati a partire dai dati sperimentali approssimando i dati.
Nei getti premium quality si raggiunge migliore qualità e maggiore riproducibilità rispetto ai getti normali; si controllano:

a. la composizione chimica deve essere compresa in forcelle composizionali più ristrette
b. il tenore d'impurezze che deve essere più basso
c. la tecnologia di colata che deve essere molto curata per minimizzare i difetti
d. microstruttura fine di dendriti e grani
e. pochissimi difetti, soprattutto porosità; si controllano con radiografie
f. le caratteristiche meccaniche sono più alte e ripetibili
g. accuratezza dimensionale
h. finitura superficiale
i. esempio le leghe di allumino 242, A356, A357, le impurità, soprattutto Fe, devono essere sotto lo 0,1%, possibilmente sotto lo 0,05%

2.2 Difetti nei getti

Il processo di realizzazione dei getti può portare alla presenza nel bagno di colata sostanze estranee che danno origine a inclusioni e porosità dannose per le proprietà meccaniche. La presenza di difetti dipende da come viene effettuata la colata e dalla tecnologia utilizzata e può essere ridotta adottando un particolare disegno della forma, conoscendo gli effetti dei vari elementi nei riguardi ciascun tipo difetto e adottando la più opportuna tecnologia di colata.

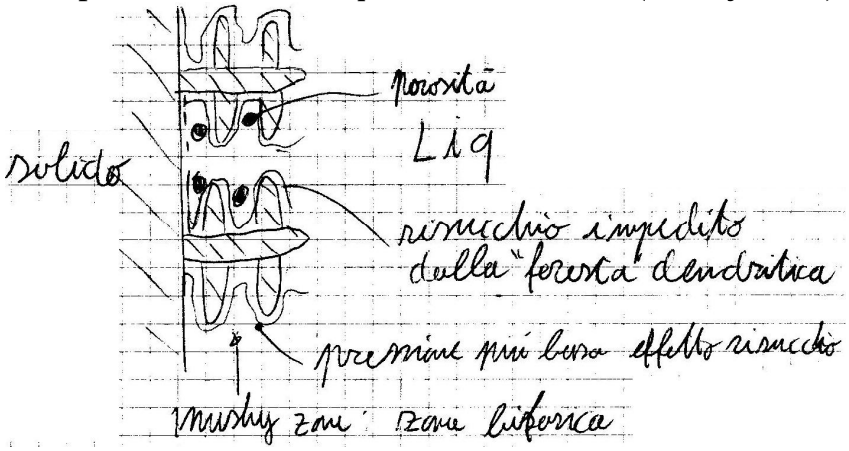
Porosità da ritiro.
Durante la solidificazione si ha una riduzione di volume dovuta a tre contributi.

- Ritiro liquido: contrazione termica dovuta alla sovratemperatura di colata rispetto alla T_{fus}.
- Ritiro solido: dovuto alla differenza di temperatura tra la solidificazione e la temperatura si sformatura.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 110

Nei metalli puri, se la solidificazione è unidirezionale; l'interfaccia solido/liquido è planare e avanza fino a quando è ancora presente del liquido; in questo modo tutti gli effetti dovuti al ritiro sono si concentrano in una determinata zona.
In una lega che presenta un intervallo di solidificazione si formano le dendriti e in quella zona si ha la presenza di fase liquida e fase solida (mushy zone).



Il liquido presente nella mushy zone raffreddandosi si contrae creando una pressione più bassa che tende a risucchiare altro metallo fuso dalla zona liquida più lontana dal fronte di solidificazione. Questo risucchio è però ostacolato dalla fitta rete di rami dendritici che danno luogo ad una importante perdita di carico che , a sua volta penalizza il risucchio e lasciando quindi dei micro vuoti (le porosità da ritiro) tra i bracci dendritici.
Questo fenomeno è importante tanto più la lega non è fluida e tanto più presenta un intervallo di solidificazione lungo.

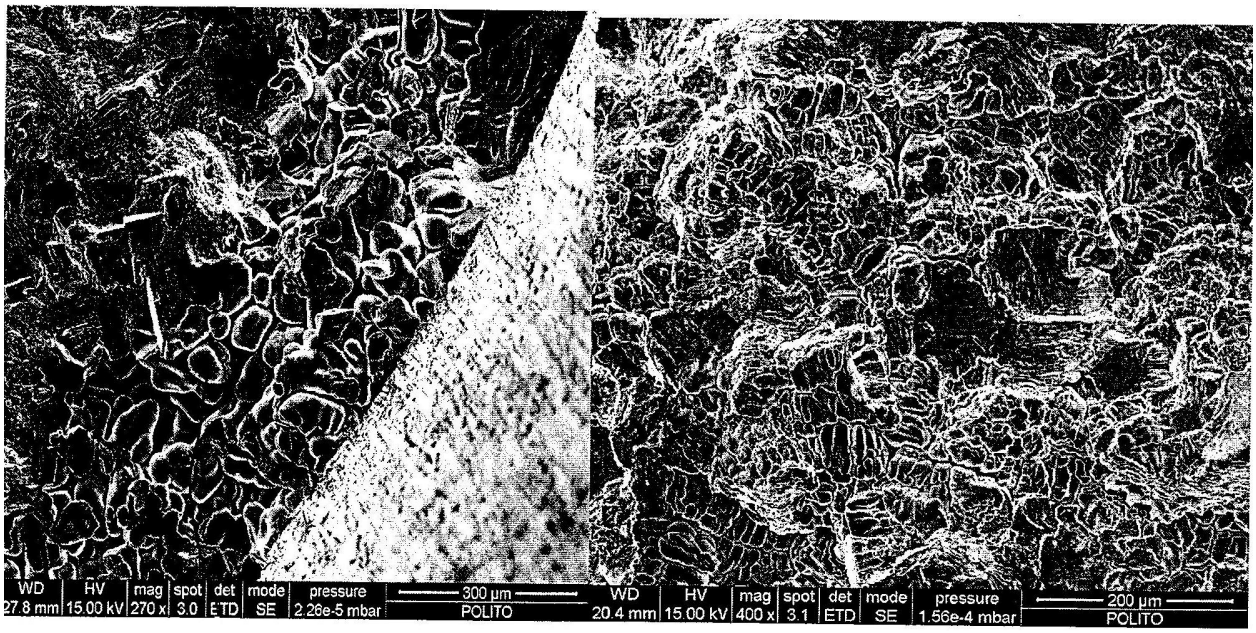


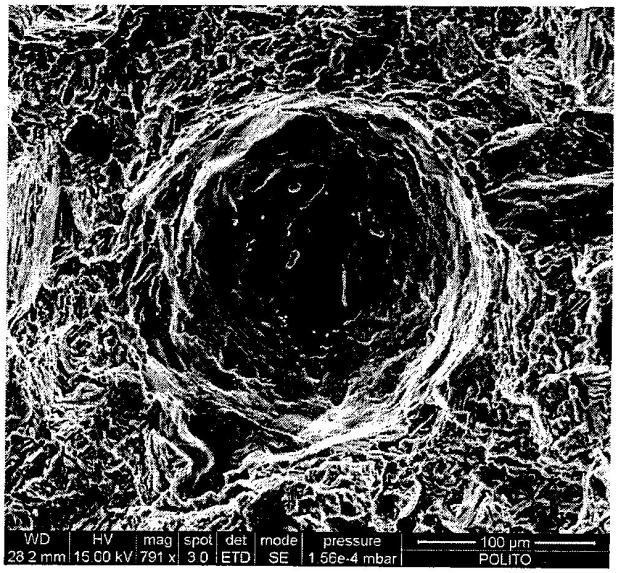
Immagine: porosità interdendritica

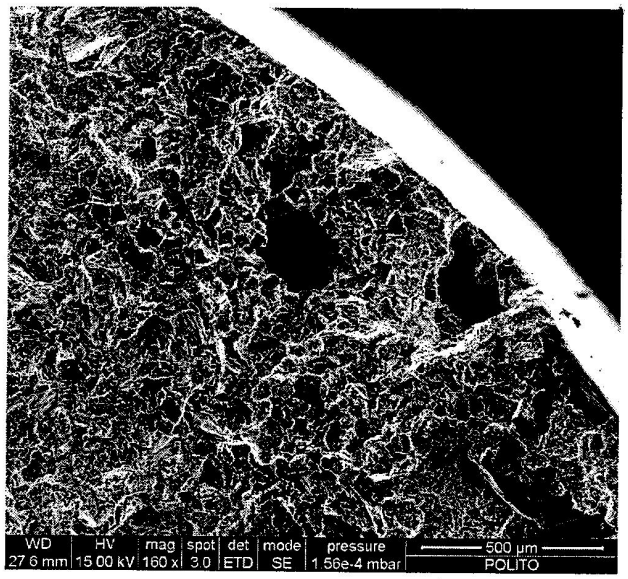
Per evitare le macro porosità si deve concentrare tutto il ritiro in una o più materozze.
Per portare il liquido in queste ultime si possono adottare alcuni accorgimenti tecnici:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 110

l'eventuale umidità. La solidificazione rapida inoltre contrasta la lo sviluppo di idrogeno poiché rimane in soluzione solida soprassatura.
Immagine: bolle sferiche di idrogeno





Blistering.

Nelle colate veloci (pressocolata) il flusso di metallo liquido è molto turbolento e questo porta al mescolamento con l'aria presente nelle stampo; l'aria intrappolata può essere assorbita come bolle compresse oppure si comprime tra pezzo e parete. Per limitare questo effetto si può modellare opportunamente lo stampo creando sfiati o zone morta in cui il liquido spinge via il gas dalla forma, effettuare la colata mettendo in depressione lo stampo, oppure lavare la forma con ossigeno puro in modo tale che esso sia l'unico gas presente nello stampo al momento della colata, il metallo reagisce formano un ossido ma senza creare porosità da gas.
Se comunque rimane dell'aria intrappolata si compromette seriamente la possibilità di effettuar altri trattamenti termici dopo colata (come ad esempio invecchiamento artificiale T6 per le leghe leggere) perché potrebbe insorgere il blistering. Poiché l'invecchiamento è effettuato a temperature di circa 150°C e a pressione ambiente c'è il rischio che le bolle si muovano e coalescano finendo appena sotto la superficie del pezzo. Questo crea evidenti distorsioni geometriche dei pezzi e compromette la resistenza a fatica. Per questo i trattamenti termici di componenti in lega colati a pressione non si fanno se non adottando particolari accorgimenti.

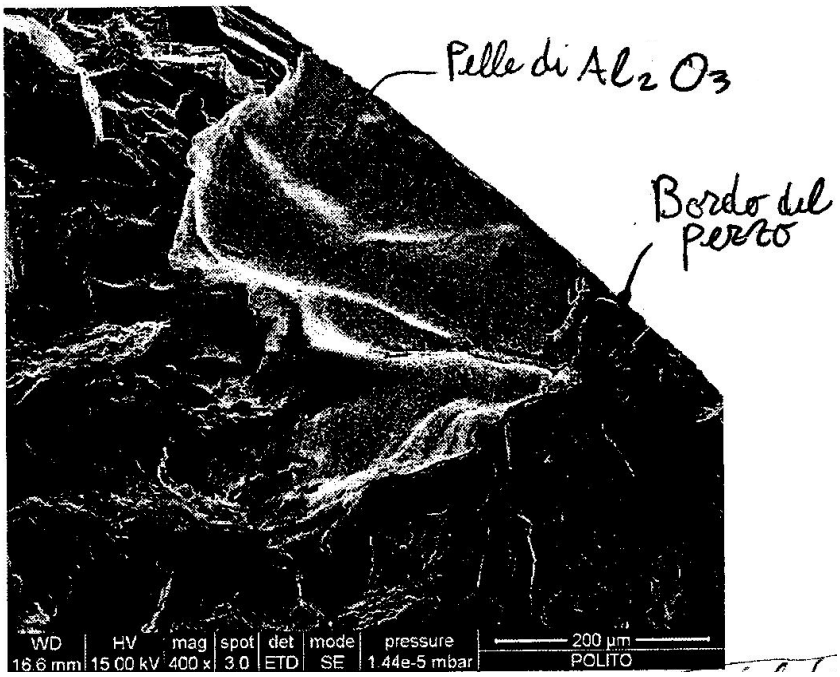
Inclusioni.

Le inclusioni sono costituite da fasi metalliche e non metalliche non desiderate nel pezzo. Si suddividono in:

- Esogene: si tratta di particelle di scoria o ceramiche provenienti dalla forme in sabbia o dai refrattari di forni e dei crogiuoli, tendono a sedimentare o a precipitare per galleggiamento, finendo nella scoria liquida protettiva

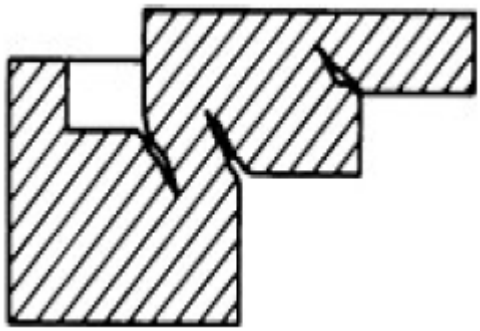
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 110



Strappi a caldo(hot tears)

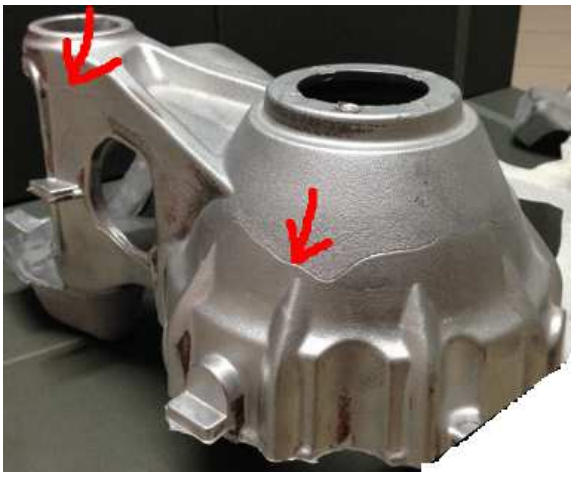
Lo strappo a caldo si verifica quando la contrazione del metallo in un punto è impedita dalle zone circostanti già solidificate.
Questi punti sono tipicamente quelli dove la cessione di calore è molto più bassa per cui solidificano dopo (rientranze, scalini e spigoli).



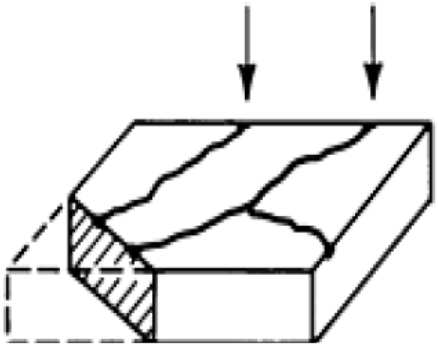
Man mano che l'intorno si solidifica non riesce ad alimentare per bene lo spigolo che con la solidificazione, si contrae e poiché le zone circostanti sono già solide agiscono da vincolo e si generano degli stress di trazione. Lo strappo è portato dal fatto che la struttura in quel momento nell'hot spot non ha ancora raggiunto una resistenza meccanica sufficiente perché è ancora presente del liquido intergranulare, che fa si che lo strappo si propaghi.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 110



Reticolo di bave.
Questo tipo di difetto deriva dall'usura dello stampo. Lo stampo è in acciaio legato ed è sottoposto a forti gradienti termici ogni volta che avviene l'iniezione di metallo liquido; questi gradienti causano dilatazioni e contrazioni che sottoponendo lo stampo a fatica termica. Quindi è possibile che si formino delle cricche superficiali che vengono replicate in negativo sulla superficie del pezzo causando un reticolo di bave.
Questo non costituisce un difetto micro strutturale ma si devono prevedere finiture superficiali aggiuntive e quindi costi.



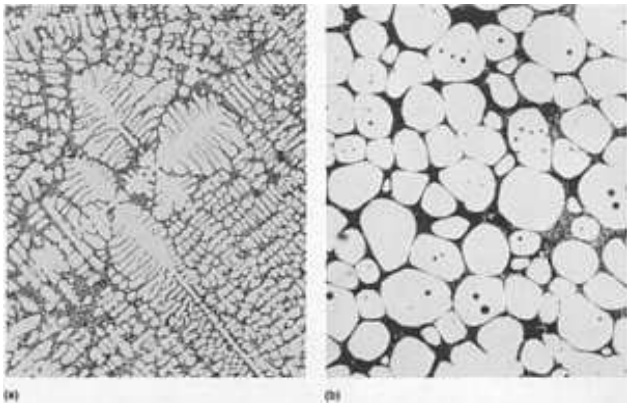
2.3 Tecnologie di colata

La tecnologia di colata, come già detto, influenza la microstruttura e le proprietà meccaniche del getto e permette di ottenere dei vantaggi nella formatura di componenti meccanici. Le tecnologie di colata si possono classificare in base alla forma che conterrà il getto. Si distinguono le forme provvisorie (colata in sabbia) e forme permanenti (colata in conchiglia).
Nella colata in sabbia si hanno forme composte da terra da fonderia compattata su modelli permanenti o a perdere e sono usate per pezzi di geometria particolarmente complicata e la colata avviene per gravità. La terra da fonderia presenta una bassa conducibilità termica e causerà un raffreddamento più lento della forma; ci si dovrà aspettare, perciò, una struttura più grossolana alla quale competono proprietà meccaniche minori.
La colata in forma permanente può essere sia a gravità e sia in pressione e permette di ottenere vantaggi economici quando la produttività è elevata e le forme dei pezzi

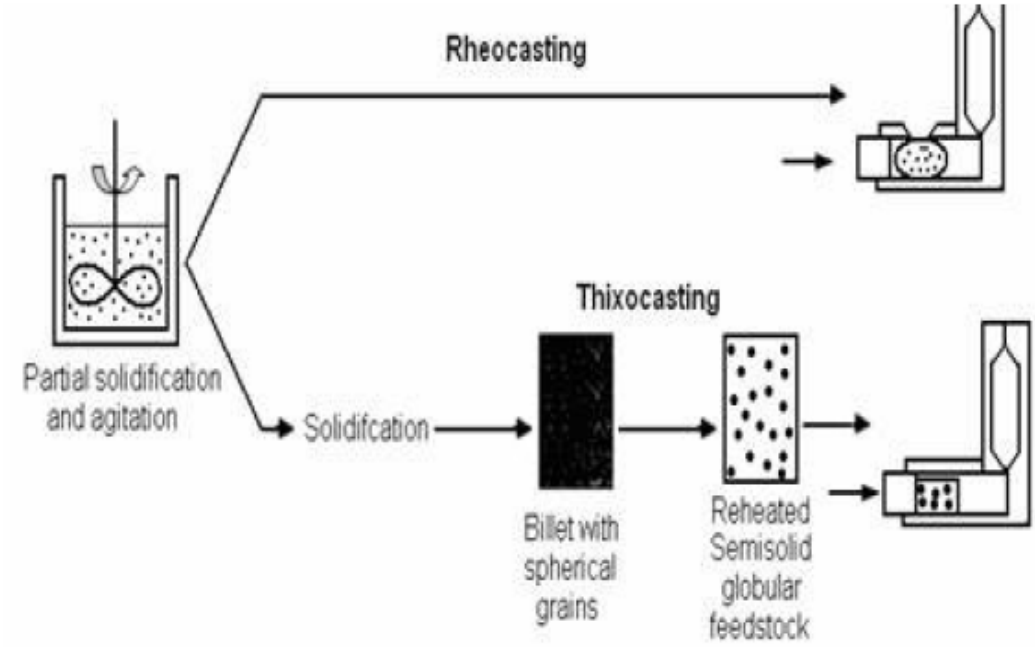
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 110

Altre tecnologie di colata più innovative sono la colata semisolida e lo squeeze casting.
La colata semisolida (rheocasting e tixocastig) sfruttano le proprietà tixotropiche di una microstruttura non dendritica ottenuta attraverso l'agitazione meccanica che spezza le dendriti e i frammenti che si formano fungono da germe di nucleazione per cristalli equiassici.



La viscosità di questo sistema diminuisce man mano che aumenta la velocità di scorrimento per cui è molto più fluido alle alte velocità e si possono avere alcuni vantaggi. Si può riscaldare a una temperatura inferiore a quella del liquidus con un risparmio energetico. Per via della più bassa temperatura la reattività chimica del metallo con l'ambiente è minore e si hanno meno contaminazioni; si hanno inoltra meno scarti perché mancano le materozze (ritiri di solidificazione minore) e le caratteristiche meccaniche sono più elevate.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 110

Le porosità da gas si riducono anch'esse poiché il gas resta in soluzione soprassatura, inoltre aumenta la velocità di raffreddamento che rende più fine la struttura.

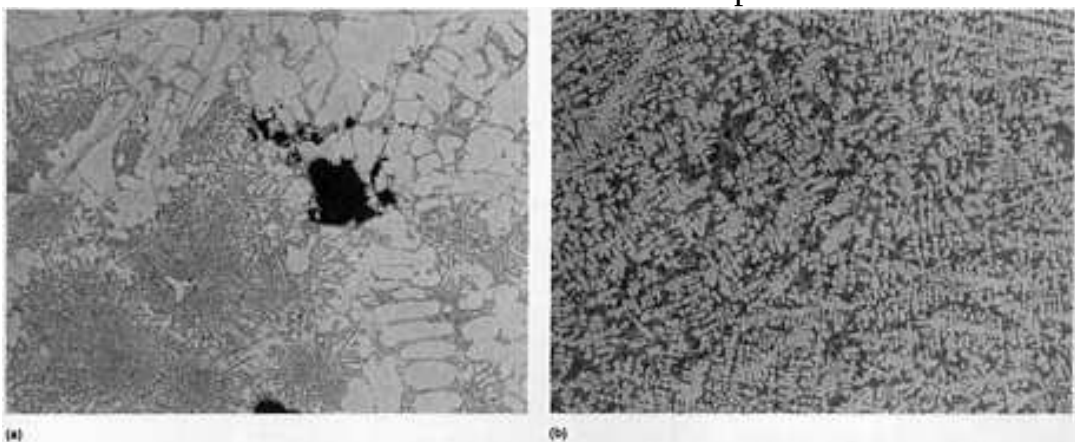


Immagine: incremento della finezza della struttura dendritica nello squeeze casting

Migliorano le caratteristiche meccaniche e si possono colare anche le leghe che normalmente darebbero un ritiro troppo elevato e problemi di strappo a caldo(per esempio le leghe Al-Cu; Al-Zn).

3. LEGHE DI ALLUMINIO

L'alluminio è un metallo il quale ha particolari caratteristiche che rendono adatto all'applicazione in diversi settori industriali.
L'alluminio cristallizza nel sistema CFC e ha una densità di 2.698 Kg/m^3. La temperatura di fusione dell'alluminio è 660° C il che può far intuire la notevole importanza come metallo da fonderia. (la ghisa, altro metallo da fonderia, fonde a circa il doppio)

3.1 Designazione delle leghe di alluminio e dei trattamenti termici

Le leghe di Al sono designate mediante una sigla numerica nxx.y:

- n: indica l'elemento principale di lega (n=1, alluminio puro)
- xx: indica la purezza commerciale nel caso di n=1; nel caso di n≠1 identifica la lega senza informazioni sulla composizione
- y: 0 per getti; 1 per lingotti (forcelle composizionali standard); 2 lingotti (forcelle composizionali ristrette)

n	Elemento
1	Al
2	Cu
3	Si+(Mg, Cu)
4	Si
5	Mg
7	Zn
8	Sn

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 110

T9: Solubilizzato, invecchiato artificialmente e deformato plasticamente. Si applica ai prodotti che sono deformati a freddo come operazione finale, per incrementare la resistenza.
T10: Invecchiato artificialmente e deformato a freddo**.** Si applica ai prodotti che sono invecchiati artificialmente dopo processi effettuati ad elevata temperatura, come getti o da estrusione, e deformati a freddo per incrementare la resistenza.

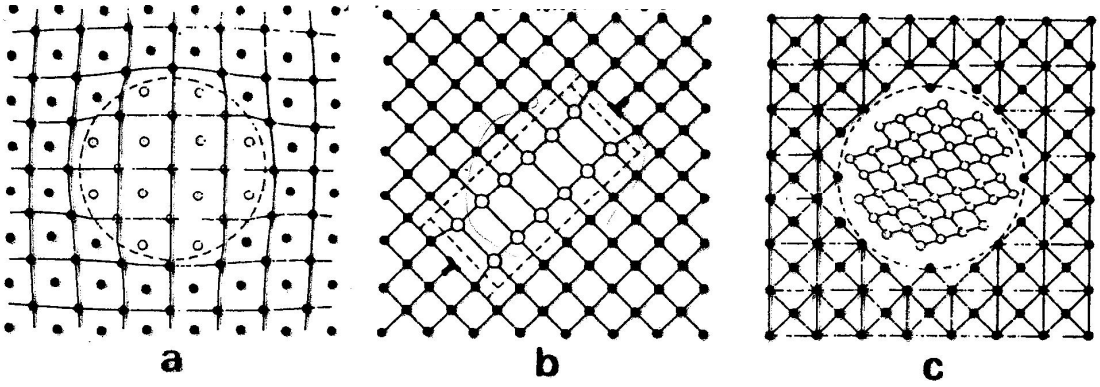
3.2 Leghe di Al indurite per precipitazione

Trasformazioni che portano alla precipitazione

Il requisito di base che deve avere una lega per essere indurita per precipitazione è una solubilità decrescente con la temperatura. Il trattamento termico completo avviene in tre stadi:

1. Trattamento di solubilizzazione a una temperatura corrispondente circa alla massima solubilità per sciogliere completamente gli elementi di lega.
2. Tempra o rapido raffreddamento solitamente a temperatura ambiente per ottenere una soluzione solida soprassatura (SSSS).
3. Controllo della decomposizione della SSSS per formare precipitati finemente dispersi attraverso l'invecchiamento del materiale per un certo tempo a un certo livello di temperatura.

La completa decomposizione della SSSS passa attraverso diversi stadi che porteranno la SSSS a trasformarsi nella fase di equilibrio che compare sul diagramma delle fasi.
La prima fase comporta la formazione di addensamenti di atomi di soluto spessi pochi piani atomici denominati zone di Guinier-Preston (GP). Queste zone di GP creano una distorsione del reticolo ma mantengono la continuità dei piani reticolari (coerenti)(a). La formazione delle zone di GP richiede il movimento di atomi su piccolo distanze perciò sono finemente dispersi nella matrice. La diffusione degli atomi di soluto è molto influenzata dalla presenza di vacanze reticolari (il movimento degli atomi avviene per spostamento di vacanze in senso opposto); con la tempra si riporta il numero di vacanze presenti ad alta temperatura (la concentrazione di vacanze varia con la temperatura secondo $C = C_0 e^{-H/kT}$) e di conseguenza nella SSSS si ha una maggior diffusione rispetto al sistema in equilibrio e si formano le zone GP.

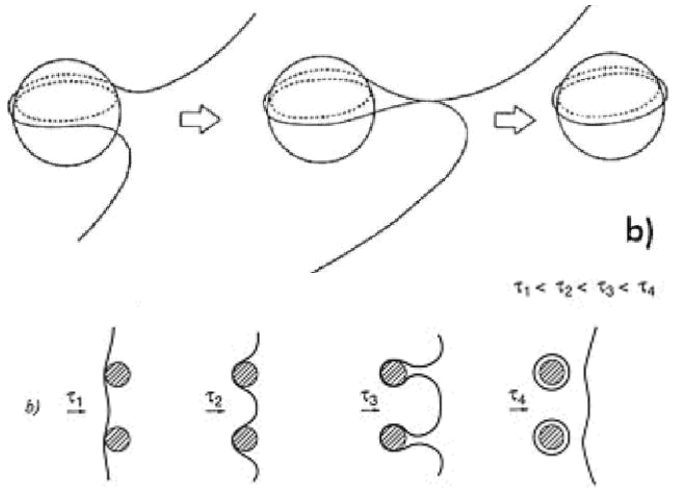


© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 110

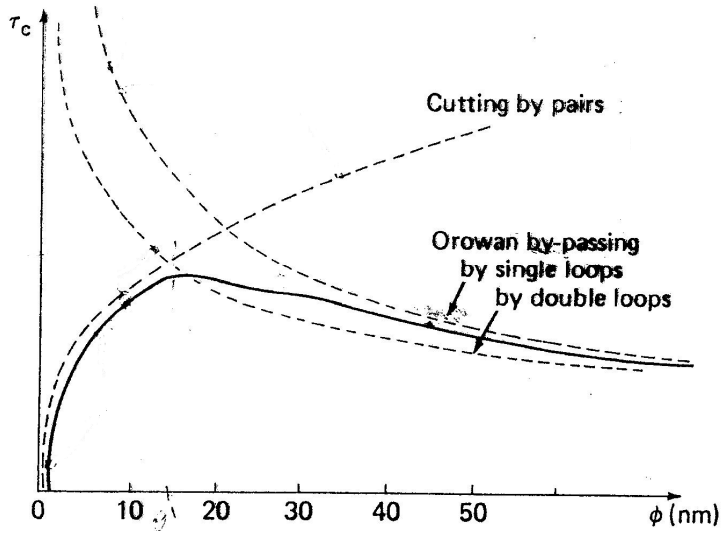
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 110

punti della stessa dislocazione entrano in contatto e si saldano tra loro così che la dislocazione possa proseguire il suo moto; intanto sulla particella si è creato un anello (loop) di dislocazione (b). Se le particelle sono grandi e largamente spaziate l'incurvatura risulta minore e lo sforzo annesso anche. Se le particelle sono piccole e più ravvicinate la dislocazione si dovrà incurvare di più e il rafforzamento sarà maggiore. Lo sforzo è, quindi, inversamente proporzionale alle dimensioni del precipitato. Questo meccanismo di indurimento va sotto il nome di rafforzamento per dispersione.

$$\tau_c = \beta \cdot \frac{2Gb}{r}$$



Entrambi i meccanismi di rafforzamento entrano in gioco nelle leghe invecchiate. Se si diagrammano i due andamenti in funzione della grandezza del precipitato si ottiene il diagramma sotto (curve tratteggiate).



Se i precipitatati sono molto piccoli e finemente dispersi (zone di GP) per la dislocazione è più facile oltrepassare le particelle tagliandole (prima parte del diagramma) . Man mano che prosegue l'invecchiamento e che le dimensioni dei precipitati aumentano, la τ_c sale fino a quando viene raggiunta una dimensione critica dei precipitati alla quale corrisponde la massima τ_c e il picco di durezza. Oltre la

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 110

ossida c'è un'altra specie che si riduce formando così una reazione di ossido riduzione.
La semireazione di ossidazione può essere schematizzata come segue:

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^-$$

Il metallo M quindi cede un certo numero di elettroni e diventa uno ione positivo. Questi elettroni che vengono rilasciati devono essere acquisiti da un'altra specie chimica attraverso una reazione di riduzione che dipende dalla natura della soluzione alla quale il metallo è esposto. Nelle soluzioni acide dove è presente un'alta concentrazione di ioni H^+ la reazione di riduzione è la seguente:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

Nelle soluzioni (acide e basiche) in cui è disciolto ossigeno le reazioni probabili sono:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \quad (acide)$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH^-) \quad (basiche)$$

Come un metallo può essere ossidato esso può anche essere ridotto sia parzialmente che totalmente secondo la reazione:

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M$$

La reazione elettrochimica completa deve essere la somma delle due poiché non ci può essere accumulo di carica elettrica. Se si considera la corrosione dello zinco metallico in una soluzione acida:

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$$

E poiché gli elettroni viaggiano nel metallo conduttori vengono trasferiti nelle zone adiacenti per ridurre gli ioni idrogeno:

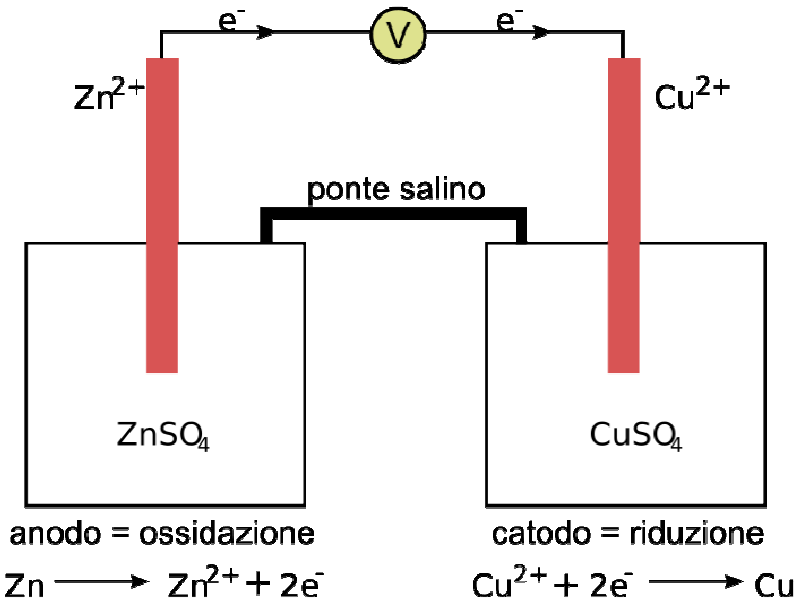
$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

La somma delle reazioni è:

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$$
$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

$$Zn + 2H^+ \rightarrow Zn^{2+} + H_2$$

Gli ioni del metallo possono rimanere in soluzione o a loro volta reagire per formare composti insolubili (es. ruggine).



Non tutti i metalli però si ossidano con la stessa facilità e quindi hanno un comportamento diverso nei confronti della corrosione. Una misura della tendenza a ossidarsi di un metallo si ottiene misurando il voltaggio di una cella galvanica.
La cella galvanica è costituita da due elettrodi formati da un lamina metallica immersa in una soluzione di propri ioni (in concentrazione 1M) e poste in

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 110

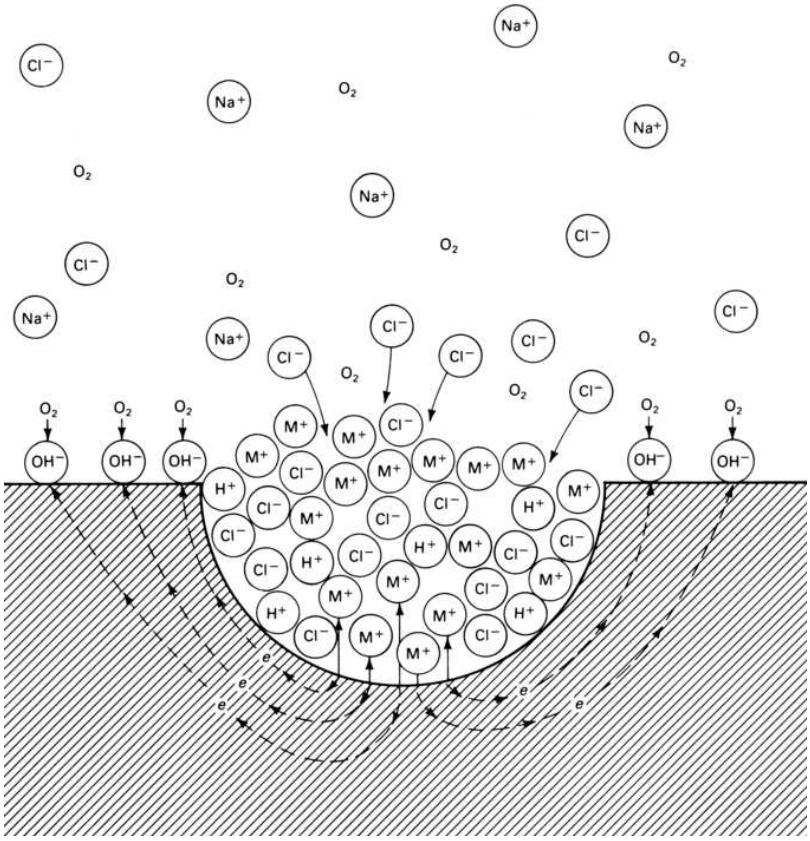
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 110

$$\Delta V = (V_2^0 - V_1^0) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M_1^{n+}]}{[M_2^{n+}]}$$

Dove: *R*:costante universale dei gas perfetti, *T*: temperatura assoluta, *n*: numero di elettroni coinvolti nella reazione, *F*: costante di Faraday (96500 C/mol), $[M_1^{n+}]$: concentrazione della soluzione della specie che si ossida; $[M_2^{n+}]$: concentrazione della soluzione della specie che si riduce.
La differenza di potenziale rappresenta quindi l'intensità della spinta termodinamica a far avvenire la corrosione ma non dice niente sulla velocità di corrosione poiché si riferisce a condizioni di equilibrio. Quando i metalli della cella sono in contatto si passa a condizioni transitorie e in questo caso il potenziali variano e questo può portare a una corrosione inaspettatamente più veloce o più lenta.

Uno di casi è il fenomeno della passivazione. La passivazione è la perdita di reattività del materiale che normalmente è suscettibile a corrosione. Questo fenomeno è dovuto alla formazione di uno strato di ossido molto compatto e aderente alla superficie che va ad isolare il metallo sottostante dall'ambiente esterno. I materiali che si passivano sono l'alluminio il nickel, il titanio il rame, il cromo (usato negli acciai inossidabili). Questo film di ossido superficiale è stabile nella maggior parte degli ambienti (escluso quello marino in cui il cloro riesce a perforare il film di ossido).

La corrosione dei metalli si manifesta in vari modi. L'attacco può essere esteso o localizzato in alcune aree della superficie oppure nasce sotto certe condizioni di esercizio e in particolari ambienti.
La corrosione estesa avviene quando la superficie del materiale viene attaccata uniformemente. Gli attacchi localizzati invece sono il pitting (vaiolatura) e la corrosione interstiziale. Questi attacchi localizzati si verificano per effetto della differenza di concentrazione di specie ossidante in posizioni adiacenti (ad esempio dovuto ad un interstizio nel quale la soluzione ristagna) e formano una cella cosìdetta "a concentrazione" (la f.e.m. è data solo dal dalla differenza di concentrazione degli ioni nella legge di Nernst). Nel pitting la corrosione si manifesta come piccoli fori



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 110

composto Al_6Mn con l'alluminio che ha lo stesso potenziale di elettrodo dell'alluminio.

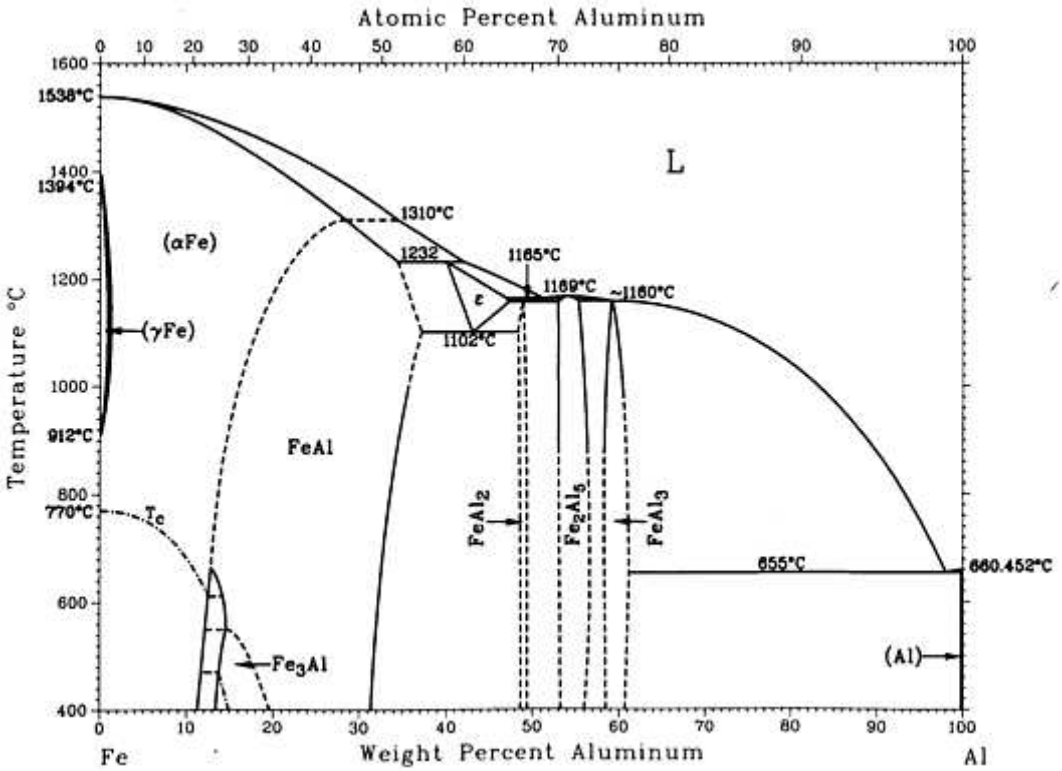
Table 2.3 Electrode potentials of various metals and alloys with respect to the 0.1 M calomel electrode in aqueous solutions of 53 g l^{-1} NaCl and 3 g l^{-1} H_2O_2 at 25°C (from *Metals Handbook*, Volume 1, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1961)

Metal or alloy		Potential (V)
Magnesium		− 1.73
Zinc		− 1.10
Alclad 6061, Alclad 7075	aluminium alloys*	− 0.99
5456, 5083	aluminium alloys*	− 0.87
Aluminium (99.95%), 5052, 5086	aluminium alloys*	− 0.85
3004, 1060, 5050	aluminium alloys*	− 0.84
1100, 3003, 6063, 6061, Alclad 2024	aluminium alloys*	− 0.83
2014–T4		− 0.69
Cadmium		− 0.82
Mild steel		− 0.58
Lead		− 0.55
Tin		− 0.49
Copper		− 0.20
Stainless steel (3xx series)		− 0.09
Nickel		− 0.07
Chromium		− 0.49 to + 0.18

Solid solution or micro-constituent	Potential (V)
Mg_5Al_8	− 1.24
Al–Zn–Mg solid solution (4% $MgZn_2$)	− 1.07
$MgZn_2$	− 1.05
Al_2CuMg	− 1.00
Al–5% Mg solid solution	− 0.88
$MnAl_6$	− 0.85
Aluminium (99.95%)	− 0.85
Al–Mg–Si solid solution (1% Mg_2Si)	− 0.83
Al–1% Si solid solution	− 0.81
Al–2% Cu supersaturated solid solution	− 0.75
Al–4% Cu supersaturated solid solution	− 0.69
$FeAl_3$	− 0.56
$CuAl_2$	− 0.53
$NiAl_3$	− 0.52
Si	− 0.26

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 110



Il fenomeno dipende da:

a. composizione della lega di colata; il Fe allevia il problema, Mn e Ti sono leggermente efficaci, il Ni è dannoso

b. composizione acciaio: H13 al C è facilmente aggredibile, H11 legato resiste meglio, è molto più costoso

c. temperatura d'iniezione: deve essere più bassa possibile, massimo 670°C, si limita la cinetica di diffusione e reazione Al-Fe

d. si possono fare ricoprimenti superficiali dello stampo:

i) deposizioni PVD di nitruro di boro NB che impedisce il contatto

ii) alluminizzazione della superficie dello stampo: si bagna con Al liquido a 780°C, poi si tiene 24 h a 300°C così si forma l'intermetallico Fe_3Al, poi, successivamente si lucida la superficie.

Altri problemi legati alla fonderia dell'alluminio riguardano la difettosità dei getti. Oltre alle inclusioni e agli ossidi che dipendono da come viene manipolata la lega e dal livello di protezione della scoria, i problemi specifici riguardano soprattutto la porosità e gli strappi a caldo.

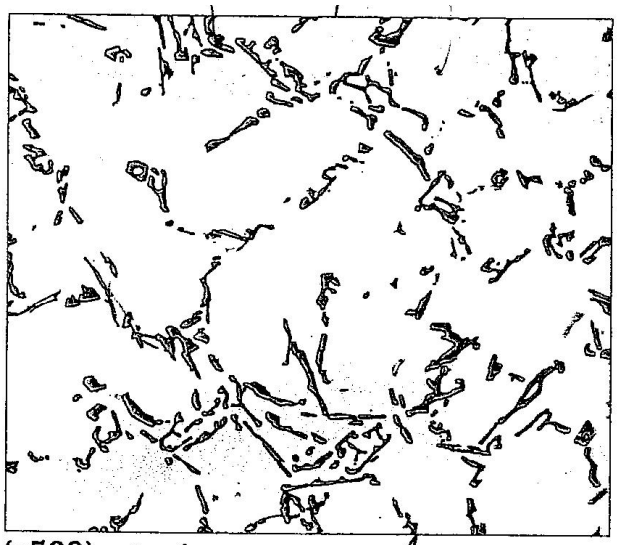
La porosità nei getti di Al, sia micro che macro, è favorita dall'alto ritiro volumetrico che il metallo (6%). L'unico metallo che riduce il ritiro è il silicio (1-2%) mentre gli altri elementi non lo influenzano più di tanto. Altro parametro è l'intervallo di solidificazione della lega perché, come raccontato prima, le dendriti ostacolano il fluire del metallo liquido che quindi non riesce a riempire le cavità interdendritiche. Questo fa intuire come le composizioni circa eutettiche siano importanti sia perché diminuiscono la frazione di solido (quindi la mushy zone) e sia per l'elevato livello di

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 110

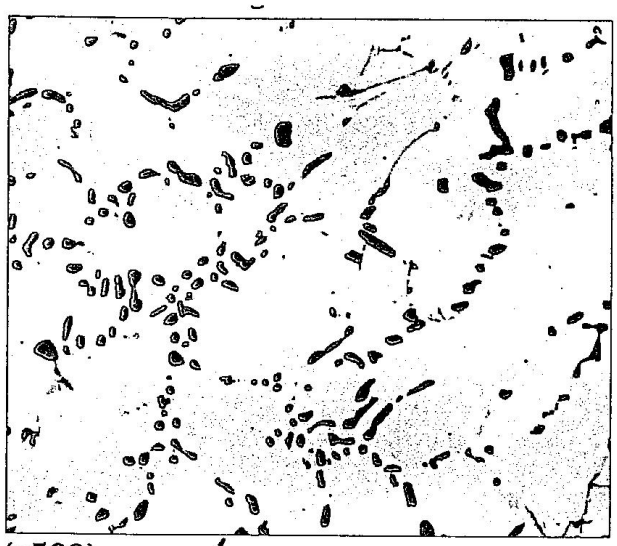
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 110

Microstrutture tipiche e modificazione delle leghe Al-Si

Le leghe ipoeutettiche hanno la microstruttura descritta nei paragrafi precedenti costituita da dendriti di formazione primaria (fase α pro eutettica) e da liquido eutettico solidificato composto da Si, in forma di aghi, placche o particelle globulari, e fase α. La crescita delle particelle di silicio è fortemente anisotropa (reticolo cristallino tipo diamante) per cui con raffreddamenti lenti (quindi alto tasso di crescita) le particelle tendono ad assumere la forma di grossi aghi.



(x500) Silicio in aghi



(x500) Silicio globulare

Questa microstruttura è meno resistente in quanto, quando si fratturano, le particelle di silicio danno fessure più ampie che indeboliscono maggiormente il materiale.
Da ciò segue che per aumentare la resistenza meccanica di queste leghe si può agire modificando la morfologia delle particelle di Si che si formano per solidificazione del liquido eutettico formando quindi delle fibre sottili o dei globuli. Questo si può realizzare in pratica attraverso un raffreddamento veloce (tipo colata in conchiglia) oppure attraverso la modificazione chimica dell'eutettico.
La modifica chimica è fatta comunemente con aggiunta di sali di sodio o sodio metallico in piccole quantità (0,005-0,015%) al bagno metallico. Il sodio agisce sui nuclei di silicio avvelenandoli e facendoli ridisciogliere nel fuso alla normale temperatura eutettica. Affinchè la fase eutettica possa formarsi è quindi necessario scendere a temperature di almeno 12°C inferiori e per via di questo sottoraffreddamento il rate di nucleazione sarà maggiore rispetto a quello di crescita e la struttura eutettica sarà più fine.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 110

Table 4.4 Mechanical properties of Al–13% Si alloys (from Thall, B. M. and Chalmers, B., *J. Inst. Met.*, **77**, 79, 1950)

Condition	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Rockwell B)
Normal sand cast	125	2	50
Modified sand cast	195	13	58
Normal chill cast	195	3.5	63
Modified chill cast	220	8	72

Un altro elemento che può essere usato come modificatore dell'eutettico è lo stronzio Sr. L'aggiunta di questo elemento in una percentuale variabile tra 0,03% e 0,05% sotto forma di "master alloy" Al-Sr o Al-Sr-Si produce un aumento delle proprietà meccaniche comparabili a quelle del sodio. L'uso dello stronzio inoltre non da le problematiche del sodio. Si ossida meno e non evapora così si che si possa controllarne meglio la quantità immessa dando effetti più riproducibili. Non da sovra modifica in quanto l'eccesso di stronzio va a formare un composto $SrAl_3Si_3$ che non ha effetto sulla dimensione delle particelle di Si. Lo svantaggio sta nel suo costo.

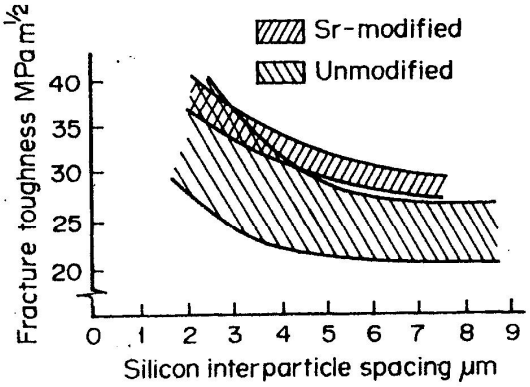
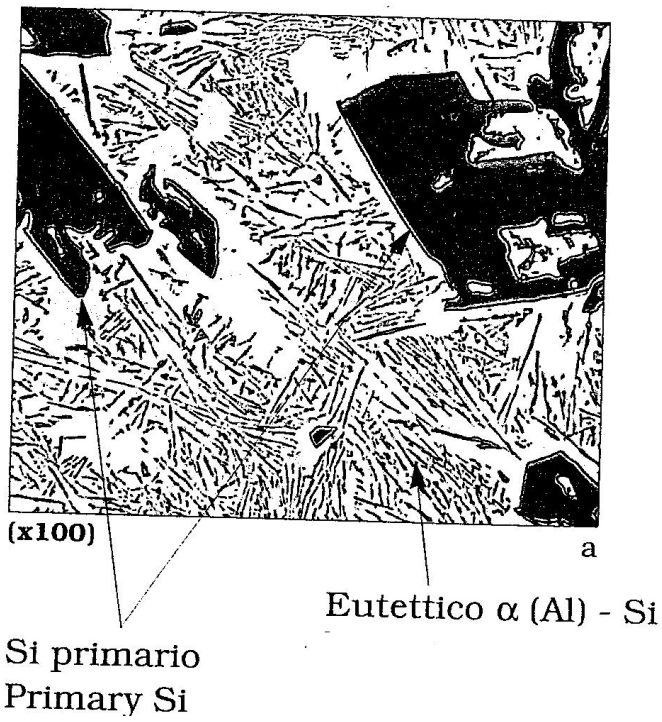


Fig. 4.2 Fracture toughness of alloy A357 (Al–7Si–0.5 Mg). Castings solidified over a range of cooling rates, with and without strontium modification

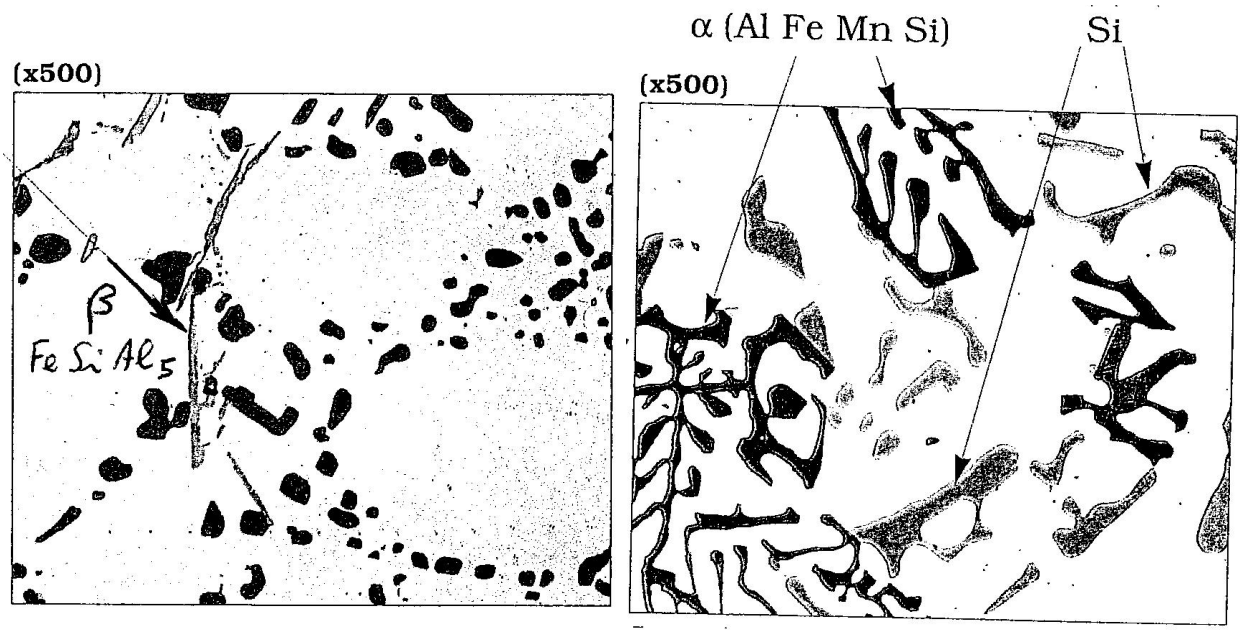
Le leghe ipereutettiche (12,7-17% di Si) hanno una struttura che presenta grosse particelle di silicio primario pro eutettico immerse nella solita struttura formata da liquido eutettico solidificato.

Queste leghe sono normalmente fragili a causa delle particelle di Si primario e vengono usate in applicazioni in cui è richiesta resistenza all'usura unita a alta colabilità (es. blocco cilindri dei motori). Per rendere queste leghe più resistenti e duttili è necessario rendere i cristalli di silicio primario più fini e globulari. Si deve quindi mettere un affinante eterogeneo che fa nucleare in



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 110



Affinamento del grano

Si desiderano grani fini perchè, come in tutte le leghe metalliche che non lavorano in regime di creep, si ottengono maggiore resistenza e duttilità. Si può procedere:

- aggiungendo al bagno delle leghe ("master alloys" contenenti titanio e boro) sotto forma di leghe di Al contenenti una dispersione di particelle come TiB_2, che non si sciolgono alla temperatura del bagno e fungono da germi di nucleazione dei cristalli
- aumentando il più possibile la velocità di raffreddamento

Si conseguono i seguenti vantaggi:

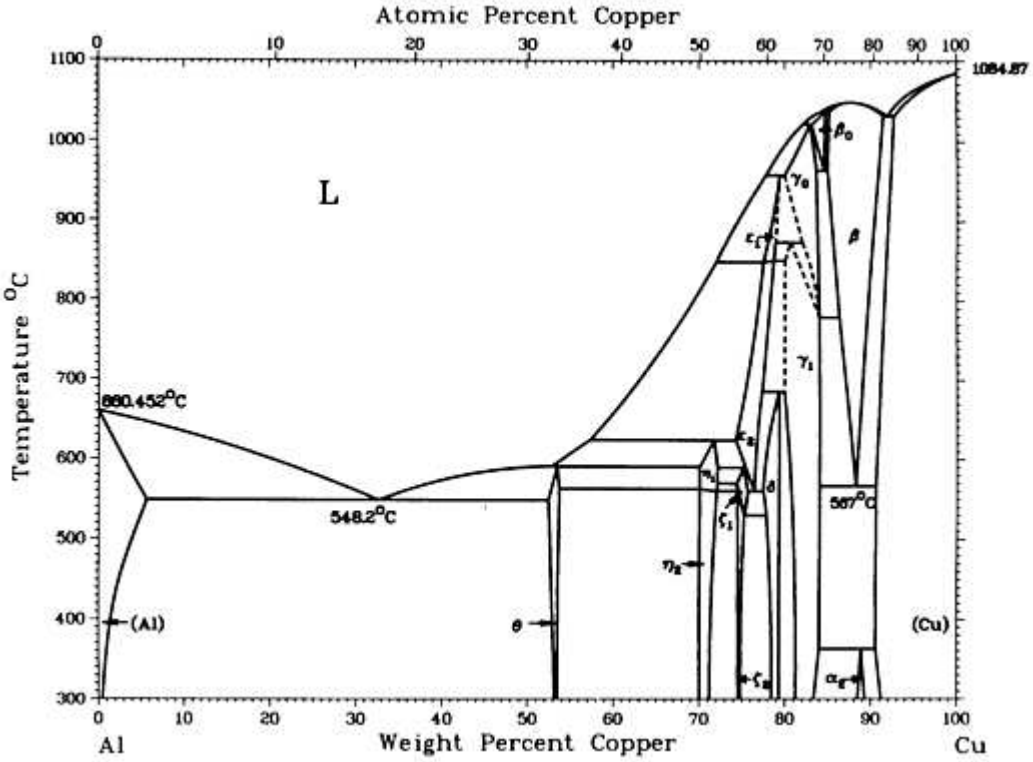
- migliori caratteristiche meccaniche
- diminuisce la porosità, sia da ritiro, sia da idrogeno
- si contrasta la formazione degli strappi a caldo disperdendo l'ultimo liquido su una vasta ma poco localizzata superficie di bordo grano

Leghe commerciali Al-Si

Le composizioni delle leghe che si trovano in commercio sono diverse ed articolate
Le leghe binarie ipoeutettiche hanno buona duttilità se sono ipoeutettiche purchè la percentuale di Fe deve essere bassa, 0,2% max per leghe colabili in sabbia e conchiglia altrimenti può comparire la fase fragile Al_5FeSi; in alternativa si aggiunge il Mn che cambia la morfologia del composto. Se si vuole usare la colata in pressione però si deve aggiungere molto ferro in percentuale compresa tra l'1 e il 2% per contrastare l'hot tearing.
Le leghe di composizione circa eutettica hanno molto Si e quindi sono molto fluide e ritiro contenuto e possono essere colate in pressione anche il spessori molto sottili (dell'ordine di 2mm) quindi è l'ideale per carcasse e coperchi per riduttori e altri componenti meccanici (es. lega 413.0).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 110



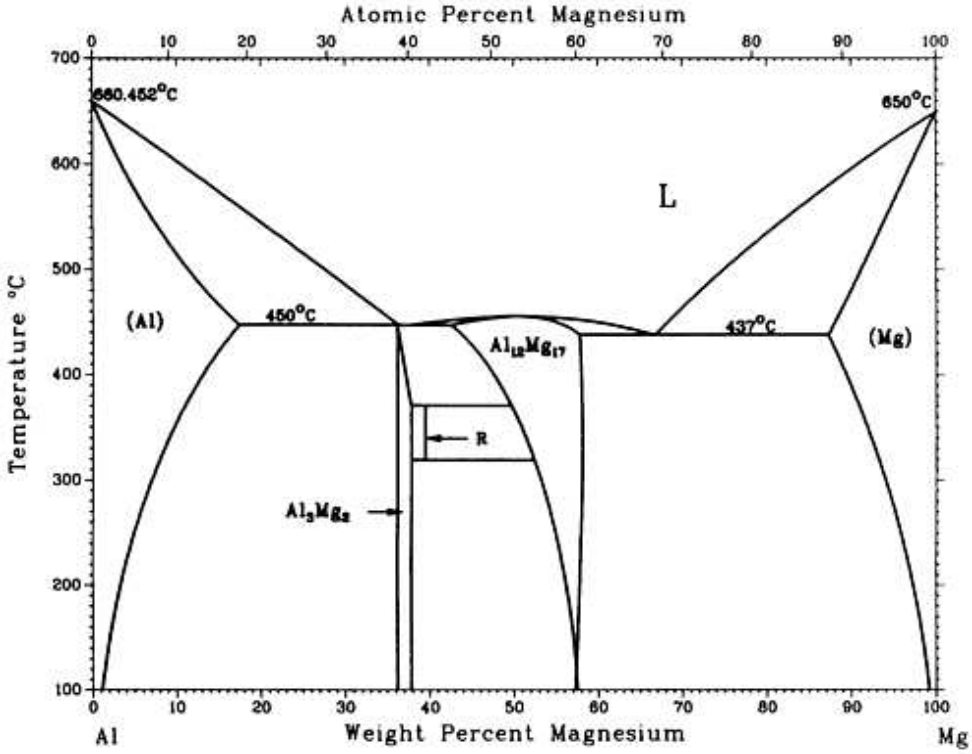
Lega 201.0: lega di composizione più semplice contiene rame al 4.5% ha proprietà di resistenza elevate e viene trattata T6. può contenere Ag come affinante dei precipitati. La colata di questa lega deve essere effettuata in sabbia o conchiglia per via del grande ritiro e la tendenza a dare hot tearing, viene colata con l'aggiunta di TiB_2 per affinare il grano.
Lega 242.0: questa lega oltre al rame contiene il Ni come elemento di lega principale (2%), inoltre contiene Fe e Zn come impurità. Il nickel fonma con l'alluminio un composto Ni_3Al che possiede elevata stabilità termica e da rafforzamento per dispersione. La lega è adatta per applicazioni in cui c'è usura a elevata temperatura e per questo motivo è trattata T5 perché tende a lavorare in sovrainvecchiamento. Questa lega è tipicamente fragile per via dei composi e delle inclusioni dovute a Fe e Zn.

Leghe Al-Zn-Mg

Le leghe binarie Al-Zn erano usate nel passato come anodo sacrificale per proteggere le strutture di acciaio dalla corrosione nell'acqua marina per via della loro bassa resistenza alla corrosione.
Le leghe che contengono zinco oggi contengono anche magnesio e elementi quantità minore come rame, cromo ferro e manganese.
Queste leghe rispondono positivamente all'invecchiamento e si induriscono per precipitazione, l'invecchiamento naturale del T4 si compie in 1-2 settimane. Hanno buona lavorabilità, stabilità dimensionale e resistenza a corrosione e inoltre hanno eutettici basso fondenti, perciò si prestano ad assemblaggi per brasatura (es. lega commerciale è la 713.0)

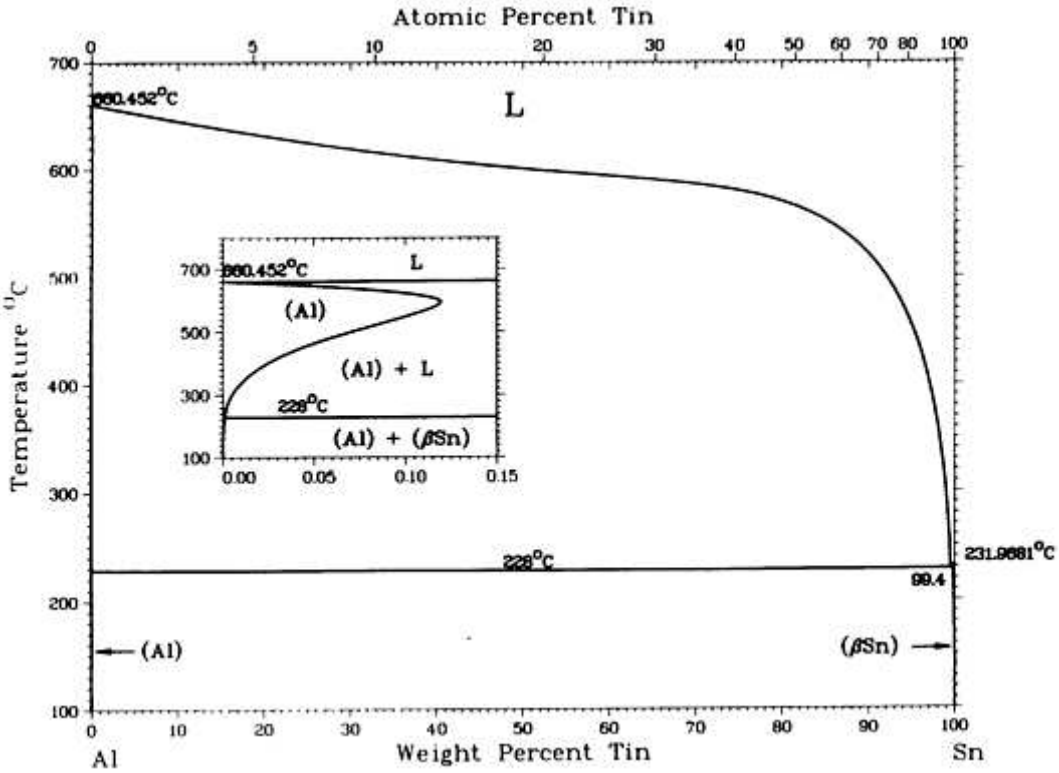
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 110



Leghe Al-Sn

Queste leghe sono usate per la fabbricazione di supporti a strisciamento per alberi rotanti. Questo uso è favorito dalle proprietà dell'alluminio come l'alta conducibilità termica, la resistenza a corrosione e a fatica (lega 850.0)



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 110

COMPOSIZIONE CHIMICA ED APPLICAZIONI DI LEGHE DA GETTO DI ALLUMINIO SELEZIONATE

A.A.	processo	Si	Fe max	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn max	Ti	altro
201.0	sabbia e conchiglia	0,1	0,15	4,5	0,4	0,4	-	-	-	0,25	Ag 0,7
impieghi	elementi strutturali, alloggiamenti pressurizzati aeronautici, scatole d'ingranaggi e alberi aeronautici, teste cilindri motori, giranti di compressori e tutti i casi dove è richiesta grande resistenza										
242.0	sabbia e conchiglia	0,7	1	4	0,35	0,25	0,25	2	0,35	0,35	-
impieghi	pistoni, teste cilindri, e tutti i casi dove è richiesta resistenza ad alta temperatura										
319.0	sabbia e conchiglia	6	1	3,5	0,5	0,1	-	0,35	1	0,25	-
impieghi	teste cilindri, basamento motore, è molto versatile perchè ha caratteristiche medie ed è facilmente colabile										
A332.0 premium quality	conchiglia	12	1	1	0,35	1		2	0,35	0,25	-
impieghi	pistoni, pulegge, tutti gli usi dove sono richiesti elevata resistenza ad usura, basso coefficiente di dilatazione termica, resistenza ad alta temperatuta										
355.0	sabbia e conchiglia	5	0,6	1,3	0,5	0,5	0,24	-	0,35	0,25	-
impieghi	corpi di pompe di combustibile, carcasse di surriscaldatori aeronautici, pistoni per compressori ad aria, teste cilindri raffreddate ad acqua, basamento motore, e tutti i casi dove è richiesta resistenza, facile colabilità e tenuta a pressione										
A356.0 premium quality	sabbia e conchiglia	7	0,2	0,2	0,1	0,3			0,1	0,25	-
impieghi	parti di pompe aeronautiche, scatole ingranaggi e trasmissione, supporti motore, alternatore e ausiliari, elementi strutturali aeronautici, blocchi cilindro raffreddati ad acqua, tutti gli usi dove è richiesta la migliore combinazione di proprietà possibile, esclusa la resistenza a caldo										
A357.0 premium quality	sabbia e conchiglia	7	0,15	0,05	0,03	0,55			0,05	0,25	-
impieghi	componenti strutturali aeronautici, supporti, e tutti gli usi dove è richiesta la migliore combinazione di proprietà possibile con particolare riguardo alla resistenza, esclusa quella a caldo										
360.0	pressocolata	9,5	2	0,6	0,35	0,5		0,5	0,5		-
impieghi	lega di uso generale dove è richiesta grande colabilità, tipicamente carcasse e contenitori di strumentazione										

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 110

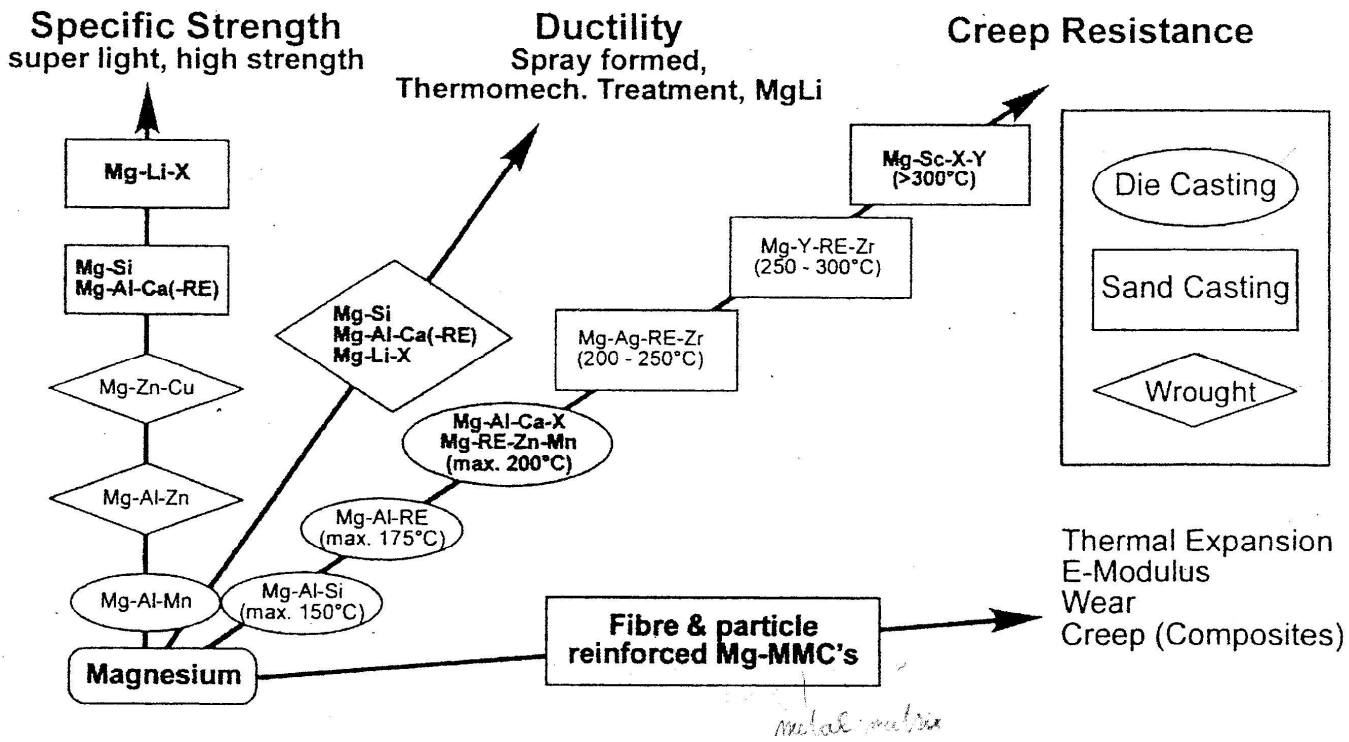
CARATTERISTICHE MECCANICHE TIPICHE E CARATTERISTICHE TECNOLOGICHE DI LEGHE DA GETTO DI ALLUMINIO

A.A.	T T	$R_{0,2}$ [MPa]	R [MPa]	A%	fluidità	tenuta a pressione	strappi a caldo	tendenza al ritiro	resistenza a corrosione	saldabilità	lavorabilità
201.0	T6	345	415	5	C	D	D	D	D	C	B
242.0	T5	235	275	1	C	D	D	D	D	D	B
319.0	T6	240	260	1	B	B	B	B	C	B	C
A332.0	T6	295	325	1	B	C	A	B	C	B	C
355.0	T6	260	310	2	A	A	A	B	C	B	C
A356.0	T6	220	290	7	B	A	A	A	B	B	C
A357.0	T6	290	360	5	B	A	A	A	B	B	C
360.0	T5	110	185	2	A	B	A	B	B	B	C
A380.0	F	180	310	3	B	B	B	D	D	-	C
390.0	F	240	280	1	A	C	C	B	B	B	D
413.0	F	140	265	2	A	A	A	B	B	A	C
520.0	F	170	315	14	D	E	B	E	A	E	B
713.0	T5	175	235	4	D	C	E	D	B	D	A
850.0	T5	-	110	5	D	E	E	D	D	E	A

A→E diminuzione delle caratteristiche

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 110

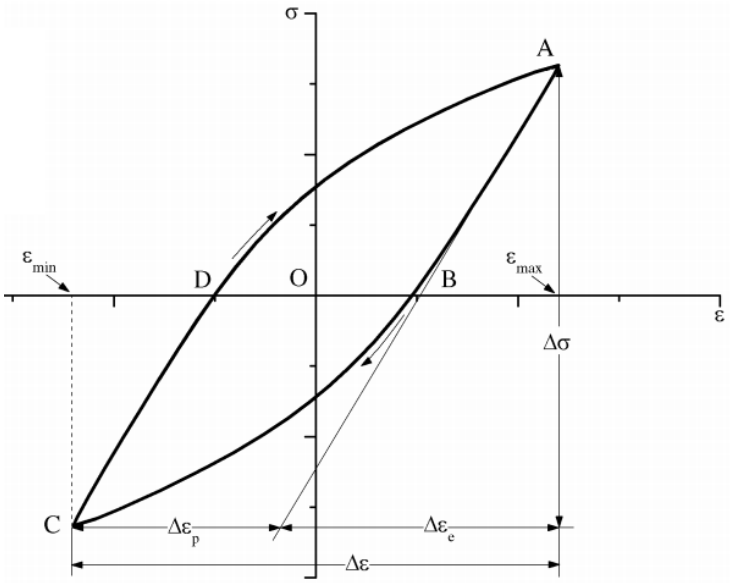


Applicazioni:

1. industria automobilistica.
2. industria aeronautica: invertitore del verso di uscita dei gas combusti, flaps, scatola ingranaggi della tramissione, scatola ingranaggi del rotore di elicotteri, carcasse di compressori per turbine
3. industria biomedica: è in fase di sviluppo, da superare i problemi di corrosione
4. applicazioni sportive: archi da tiro all'arco, mazze da golf, racchette da tennis, telai da bici (smorzamento), telai per pattini
5. industria elettronica e ottica: carcasse di computer portabili, di telefoni e telecamere (leggerezza, dissipazione calore, schermo alle interferenze elettromagnetiche), bracci di lettori di hard disks, sistemi di proiezione delle immagini, supporti di lenti
6. strumentazione: carcasse, manici, protezioni di trasmissione (leggerezza, smorzamento)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 110



Come si vede la curva assume la forma di un ciclo di isteresi. L'area racchiusa da questo ciclo rappresenta l'energia dissipata per unità di volume.

$$U_{diss} = \oint \sigma d\varepsilon$$

L'energia elastica assorbita in un ciclo si esprime come:

$$U_{el} = 2\int_0^{\sigma_{\max}} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{E}\sigma_{\max}^2$$

Da cui si ottiene che la capacità smorzante è: $D = \dfrac{U_{diss}}{U_{el}}$

La tabella sotto illustra la capacità di smorzamento per vari materiali.

Lega	Stato di trattamento termico	Capacità % con ampiezza 14 MPa	Capacità % con ampiezza 35 MPa
AM60	F	13	52
AS21	F	33	60
AS41	F	13	44
AZ91	F	5	29
EZ33	T5	5	22
ZE41	T5	2	2
Al356	T6	0,5	1,2
Ghisa grigia	F	5	17

2) La migliore <u>lavorabilità all'utensile</u> di tutte le leghe metalliche strutturali. Ciò è principalmente dovuto alla formazione di trucioli piccoli (il Mg, essendo esagonale, ha comportamento relativamente fragile) che si staccano facilmente. Ecco le conseguenze:

a) incremento della vita dell'utensile di 5-10 volte tanto(l'usura dipende dalla differenza di durezza tra le superfici)

b) le superfici di lavorazione sono molto lisce e non c'è bisogno di finitura o di lubrificazione fino a velocità di taglio al di sotto di 1000 m/min

c) la lubrificazione può essere consigliabile per evitare rischi d'incendio da parte delle polveri prodotte, soprattutto se le velocità di taglio sono molto elevate.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 110

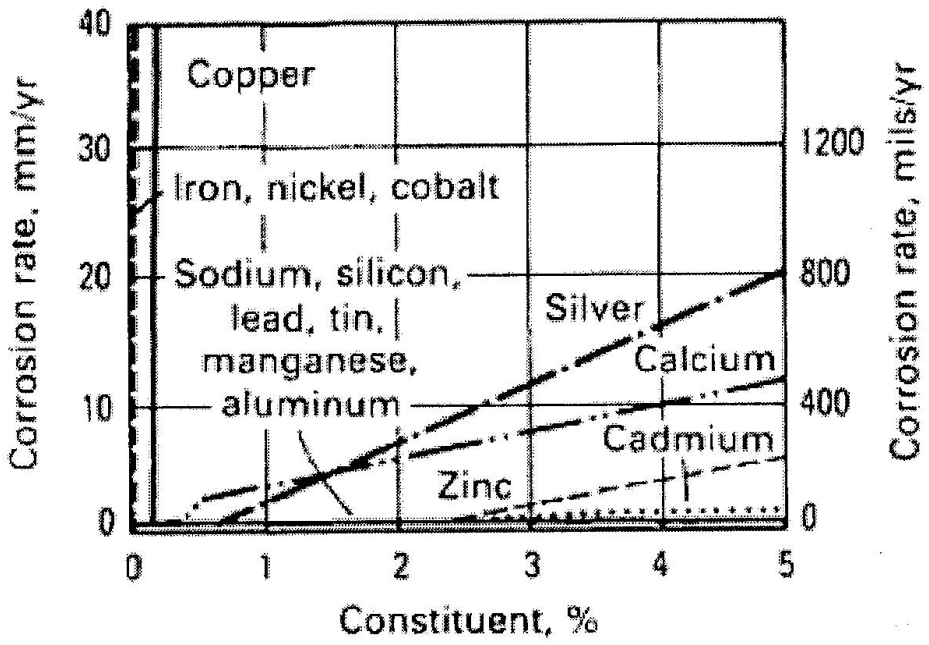
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 110

Le lettere di suffisso A, B, C, ecc. sono variazioni composizionali rispetto al nominale i suffissi A, B, C indicano rispettivamente prima, seconda e terza composizione registrata presso ASTM.
Suffisso D: composizione di alta purezza registrata presso ASTM
Suffisso E: composizione di alta resistenza a corrosione registrata presso ASTM
X designa leghe sperimentali, oppure X indica il calcio.
Le sigle dei trattamenti termici sono le stesse dell'Al.

4.3 Aspetti metallurgici

Corrosione

Il magnesio è un metallo molto anodico, ha il potenziale elettrico più piccolo di tutti i metalli strutturali. Accoppiato con altri metalli, si corrode galvanicamente in modo più o meno veloce.
In ambiente rurale all'atmosfera o in acqua il Mg resiste bene, la velocità di corrosione è dell'ordine di 0,25 mm/anno a causa della passivazione che forma una incrostazione di idrossido $Mg(OH)_2$ protettivo. Tuttavia lo strato di passivazione è più poroso e meno stabile di quello di Al e Ti.
Gli elementi leganti influiscono in maniera più o meno marcata sulla velocità di corrosione (grafico sotto: rate di corrosione in soluzione di NaCl al 3%)



Il magnesio è molto suscettibile alle impurità di metalli più nobili come ferro nickel e rame (soprattutto nelle leghe Mg-Al e Mg-Al-Zn). Rame e nickel sono più difficili da trovare come impurità mentre il ferro può entrare nel bagno di fusione con facilità per esempio dai crogiuoli in acciaio.

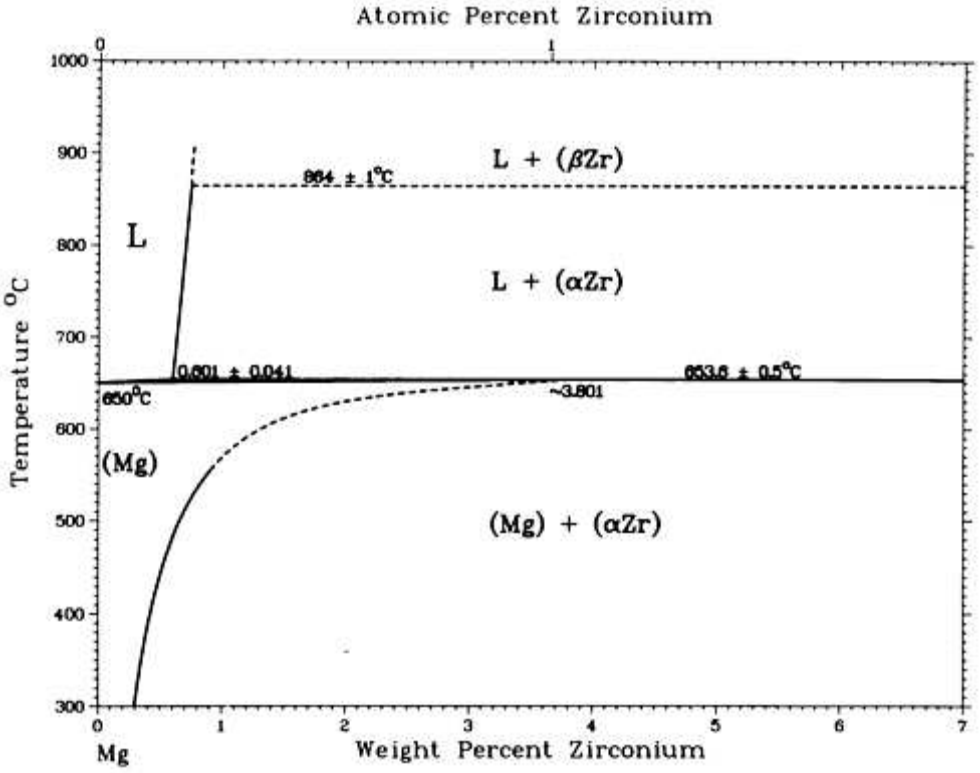
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 110

Grandezza del grano e affinamento

Altro problema su leghe storiche, e talvolta ancora adesso, è la taglia del grano, che può essere grande e variabile, implicando caratteristiche meccaniche scadenti, soprattutto lo snervamento e la tendenza a dare microporosità. Per ridurre queste problematiche, durante il trattamento del liquido si fanno pratiche di affinamento usando diversi sistemi.
Si è visto che lo Zr funzionerebbe molto bene come affinante, ma con Al e Mn forma composti stabili e quindi è rimosso dalla soluzione solida, quindi non si usa su leghe contenente questi elementi.
Per questo nelle leghe contenenti Al si aggiungono al bagno composti contenenti carbonio volatili (ad esempio esacloro etano allo 0,05%) sotto forma di mattoncini sul fondo dei crogioli prima di colarci il liquido sopra. Il composto si dissocia in carbonio e cloro. Questo purifica il bagno e il C forma composti tipo Al_4C_3 che funzionano da inoculante.

Per la maggior parte delle leghe si aggiunge zirconio, la cui fase α ha una struttura cristallina esagonale (come Mg) stabile sotto 862°C e con costanti reticolari (a=0,32 nm e c=0,514 nm) molto vicine a quelle del Mg. Lo zirconio funge allora da nucleatore di Mg, infatti la microanalisi ha rivelato zone ricche di Zr al centro dei cristalli di Mg. Dal diagramma delle fasi Mg-Zr si vede che può esserci inoculazione purchè la percentuale di questo superi lo 0,58%, altrimenti lo zirconio resta in soluzione nel liquido, come è evidente dal diagramma delle fasi Mg-Zr. Oppure, in caso di leghe più che binarie, l'effetto nucleante viene da composti contenenti Zr.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 110

PROCESSI DI PRECIPITAZIONE NELLE LEGHE DI MAGNESIO

Sistema	Dopo tempra	Zone GP	Precipitati Intermedi	Precipitati finali
Mg-Al	SSSS	-	-	incoerente β $Mg_{17}Al_{12}$
Mg-Zn (+Cu)	SSSS	a disco, coerenti	$MgZn_2$ bastoncelli coerenti, poi dischi semicoerenti	Mg_2Zn_3 incoerente
Mg-RE (Nd)	SSSS	a disco, coerenti	coerente β'' Mg_3Nd, poi semicoerente β' Mg_3Nd	incoerente β $Mg_{12}Nd$
Mg-RE-Zn	SSSS	struttura ordinata	γ' esagonale	γ CFC
Mg-Y-Nd	SSSS	β'' Mg_3Nd	globulare β'($Mg_{12}NdY$), poi placche CFC $β_1$ (Mg_3NdY)	incoerente CFC β $Mg_{14}Nd_2Y$
Mg-Ag-RE(Nd)	SSSS	bastoncelli + ellissoidi	semicoerente β+ coerente γ	incoerente $Mg_{12}Nd_2Ag$

Porosità da gas

Come per l'alluminio, il magnesio liquido scioglie l'idrogeno che però non è solubile nel solido che proviene da vapore di fondenti umidi o da scarti riciclati umidi. Rimedi e problemi:
· le leghe Mg-Al o Mg-Al-Zn sono più prone a porosità e allora vanno degasate con cloro
· con lo Zr in lega ci sono meno problemi perché lo Zr tende a reagire 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.

4.4 Leghe di magnesio senza zirconio

Leghe binarie Mg-Al

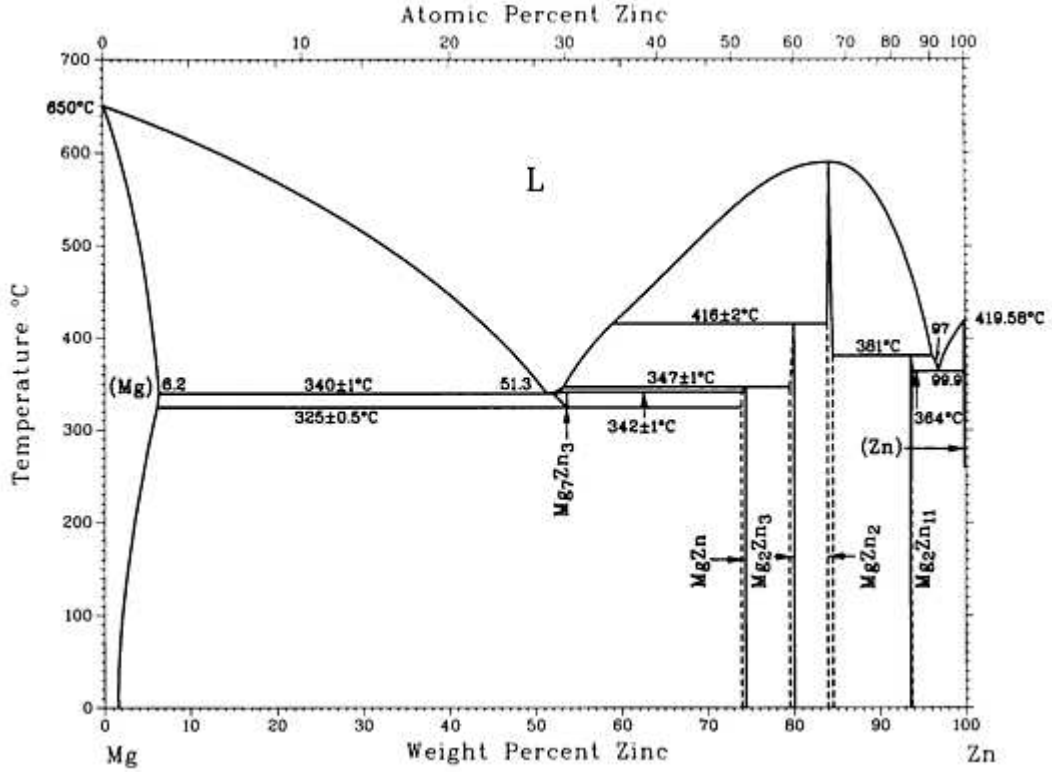
Sono state le prime leghe e sono state introdotte dai tedeschi durante la prima Guerra Mondiale. Contengono principalmente Al (8-9%), sono le leghe più usate per il loro costo e perché, più di tutte le altre, a causa della loro eccellente fluidità impartita dall'Al, si prestano a essere colate soprattutto a pressione. Altri elementi leganti sono lo Zn (che aumenta la resistenza), Si e obbligatoriamente Mn (per aumentare la resistenza a corrosione).
Sono leghe molto fluide per via dell'Al e quindi si colano a pressione ma per la stessa ragione contengono la tipica porosità. L'Al conferisce rafforzamento per soluzione solida che però vanno inoculate e si rafforzano per bordo di grano.
Possono soffrire di corrosione (per esempio AZ91A, AZ91B e AZ91C) a meno che non siano di alta purezza (bassissimi Fe, Cu e Ni) come la AZ91D, oppure con composizione bilanciata per avere alta resistenza alla corrosione (Fe, Cu e Ni inglobati in precipitati o intermetallici poco catodici rispetto alla matrice) come la AZ91E, oppure infine contengano Mn.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 110

contenuto di Al aumenta. Con raffreddamenti più lenti si formano precipitati discontinui di β con una struttura perlitica.
Con una ricottura sui 420°C dissolve tutta o in parte la fase β al bordo di grano e dà rafforzamento per soluzione solida, aumenta resistenza e duttilità in generale la presenza di β peggiora la resistenza a creep si ha scorrimento sui bordi di grano, dovuto alla fase β $Mg_{17}Al_{12}$ che si rammollisce all'aumentare della temperatura e poi fonde a 460°C (situazione individuabile dal diagramma delle fasi).

Leghe Mg-Al-Zn (AZ)



Si può diminuire la quantità di β o eliminarlo introducendo dello zinco; si ha solo aumento moderato di resistenza a creep, ma è interessante il rafforzamento per precipitazione durante l'invecchiamento, in cui lo Zn porta alla fase metastebile $MgZn_2$ semicoerente e rafforzante.

Caratteristiche meccaniche della lega AZ91D in diversi stati di trattamento termico (Bag, Zhou, J. Mat. Scie. Lett., 2001, 457-459)

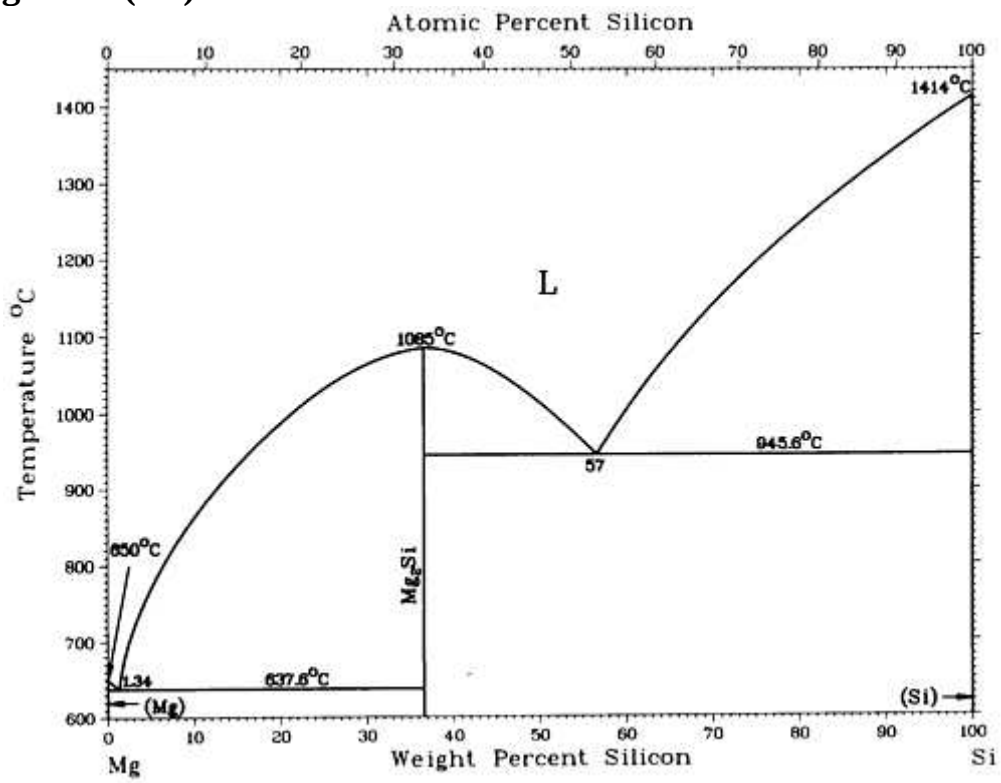
Stato di fornitura	R0.2 [MPa]	R [MPa]	A%
F	110	165	5
T4	125	185	6
T6	155	210	4

Lo Zn deve essere presente in quantità moderate (1-3%), altrimenti causa la comparsa di strappi a caldo (figura)
Zn e Al devono perciò avere livelli inversi, come AZ63 o AZ91, la lega più usata da

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 110

Leghe Mg-Al-Si (AS)



Introducendo silicio si riduce la quantità di fase β con raffreddamenti lenti Mg_2Si scrittura cinese, peggiorano le proprietà meccaniche. Con raffreddamenti veloci della pressocolata si ha fine Mg_2Si al bordo di grano che contrasta il creep.
Si può sopprimere Mg_2Si a scrittura cinese aggiungendo 0,1% di Ca
Queste leghe hanno una buona resistenza meccanica a temperatura ambiente e resiste a creep a temperature moderate, cioè fino a 150°C per il rafforzamento a bordo grano svolto dalla precipitazione di Mg_2Si.
Le leghe di questo tipo sono più performanti riducendo la quantità di alluminio della lega ma questo ne peggiora inevitabilmente la colabilità (leghe commerciali AS41 e AS21).

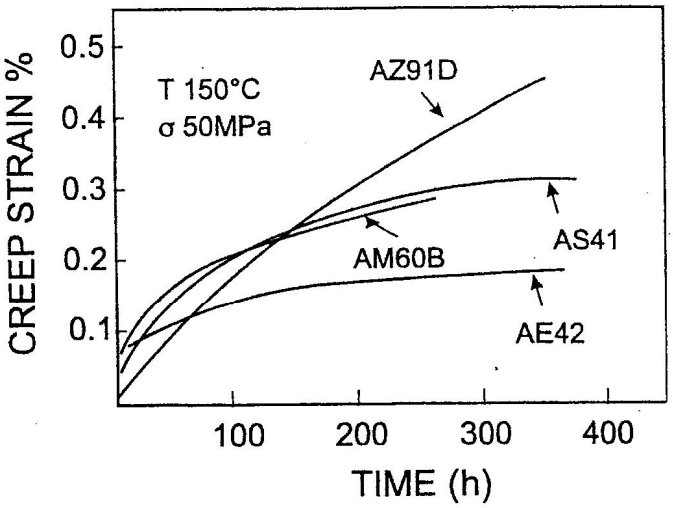


Fig. 5.15 Creep strain versus time for commercial magnesium die casting alloys based on the Mg–Al system. Tests at 150 °C and a stress of 50 MPa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 110

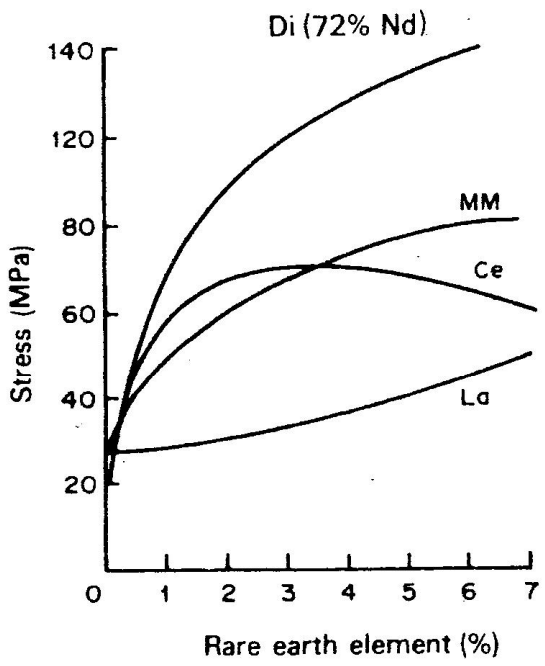


Fig. 5.17 Effect of various rare earth metals on the stress for 0.5% extension in 100 h at 205 °C. Fully heat-treated Mg–RE alloys (from Leontis, T. E. *TAIMME*, **35**, 968, 1949).

Le leghe Mg-Al-RE sono adatte per pressocolata perché la forte velocità di raffreddamento produce una dispersione di fini precipitati rafforzanti del tipo $Al_{11}RE_3$ all'interno dei grani e questo permette di risparmiare evitando il T6
La precipitazione contemporanea di composti a bordo tipo $Mg_{12}RE$ grano aumenta resistenza a creep
per esempio la AE42 (4Al-2RE-0,3Mn) è superiore alle leghe Mg-Al-Si per il creep, anche se rimane comunque inferiore alla lega di Al A380
· ha una buona resistenza al creep fino a temperatura di 175°C, superando la quale ricompare la fase molle β-$Mg_{17}Al_{12}$ e si perde resistenza allo scorrimento:

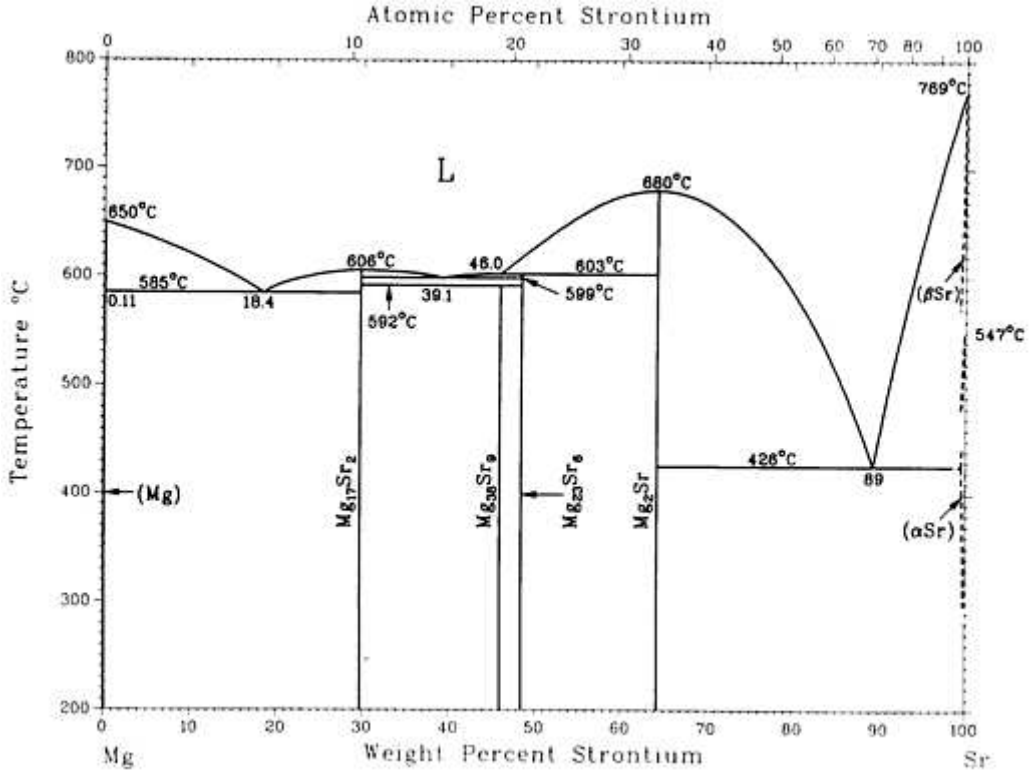
$$Al_{11}Re_3 \rightarrow Al_2Re + Mg_{17}Al_{12}$$

Leghe con metalli alcalini (AX, AJ)

Si tratta di leghe nuove, e sono in sviluppo altre leghe. Sono state introdotte per competere con le leghe con Al e RE tipo la AE42, ma a minor costo, visto il prezzo delle terre rare.
Il calcio (leghe AX come la AX52 cioè 5Al-2Ca) e lo stronzio Sr (leghe AJ come la AJ62, cioè 6Al- 2Sr) hanno basse solubilità e formano i composti A_2Ca e Al_4Sr sui bordi grano, contrastando creep.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 110



Se in concomitanza ci sono RE, c'è fine precipitazione e si rafforza la matrice impedendo lo scorrimento delle dislocazioni.
Ca e Sr diminuiscono la fluidità e accrescono la suscettibilità agli strappi a caldo
Attualmente le leghe AX sono preferite alla AJ perché anche se lo Sr costa di più, la resistenza a caldo è un poco migliore
Sono in utilizzo perché hanno resistenza a creep competitiva con la lega di Al di riferimento A380 a 175°C, si è fatto qualche blocco motore (BMW).

TABELLA COMPARATIVA DI RESISTENZA A CALDO

lega	$R_{0.2}$ a 20°C [MPa]	R a 20°C [MPa]	A% a 20°C	$R_{0.2}$ a 150°C [MPa]	R a 150°C [MPa]	A% a 150°C	$R_{0.2}$ a 175°C [MPa]	R a 175°C [MPa]	A% a 175°C
A380	170	290	3	155	255	6	150	240	8
AZ91	90	145	3	90	130	18	70	115	21
AE42	140	225	11	100	160	22	85	135	23
AJ62	140	240	7	115	165	27	100	140	18

TABELLA COMPARATIVA DI RESISTENZA A CREEP

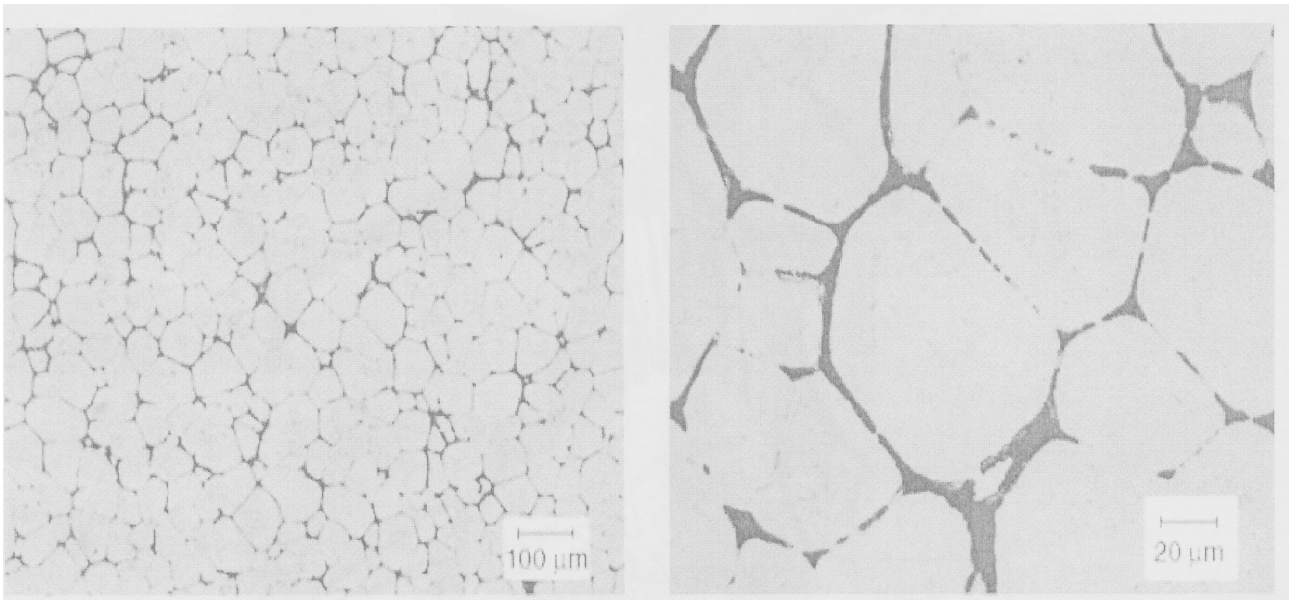
lega	e% creep a 50 MPa, 200 h, 150°C	e% creep a 50 MPa, 200 h, 175°C	velocità di corrosione in nebbia salina mg/(cm^2·day)
A380	0,04	0,08	0,34
AZ91	2,7	rotto	0,1
AE42	0,06	0,33	0,21
AJ62	0,05	0,05	0,09

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 110

presenza di RE e Zn
2. la microporosità è scarsa e non vi è pericolo di strappi a caldo grazie alla presenza delle terre rare
3. si possono colare in sabbia, conchiglia e anche a pressione per la speciale combinazione di elementi e l'adattabilità al processo produttivo secondo i componenti che si vogliono produrre

Nello stato grezzo di colata la microstruttura è fatta di grani a circondati da una rete di precipitati intermetallici al bordo di grano $Mg_{12}RE$ che ostacolano efficacemente lo scorrimento dei grani a caldo
Se le leghe sono colate in sabbia o conchiglia (o anche a pressione sotto vuoto) vi è la possibilità del T6 con precipitazione di fasi nanometriche all'interno dei grani che contribuiscono, assieme agli intermetallici intergranulari, all'aumento della la resistenza creep ed inoltre incrementalo la resistenza a caldo. La precipitazione dentro il grano avviene principalmente per la presenza delle terre rare che danno luogo a precipitati intermedi che perdono di coerenza per temperature di esercizio superiori a 250°C dove si assiste a un incremento del valore del creep. Il ruolo dello zinco nella precipitazione è minore perche va a formare con le RE la rete intorno a bordi di grano.
Infine l'affinamento del grano con Zr, che aumenta la resistenza, ma anche la tenacità.



Microstruttura della lega EZ33 con in evidenza il reticolo eutettico di composti intermetallici contenenti Al-Nd-Zn (fasi scure in figura)

Due leghe di successo commerciale la ZE41 e la EZ33. Sono impiegate in campo automobilistico e aeronautico. Una nuova lega commerciale ma non registrata, con nome commerciale AM-SC1, è sviluppata e prodotta in Australia per parti di motore automobilistico:
· la ZE41 e la EZ33 sono colate in sabbia e conchiglia, e sono ottimamente fluide

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 110

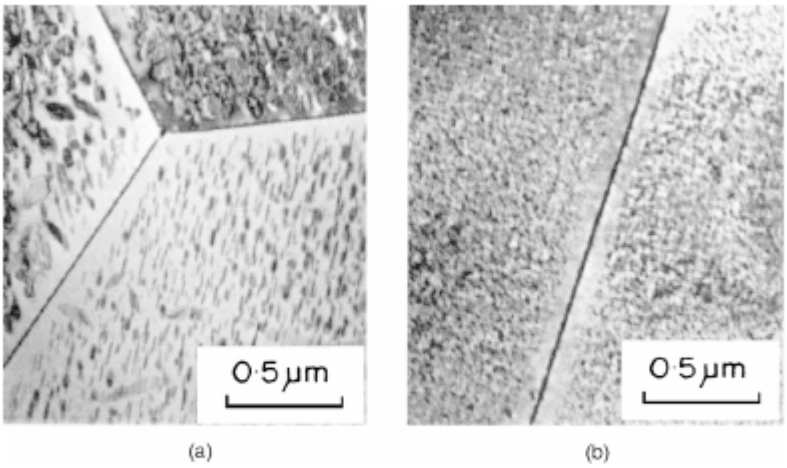
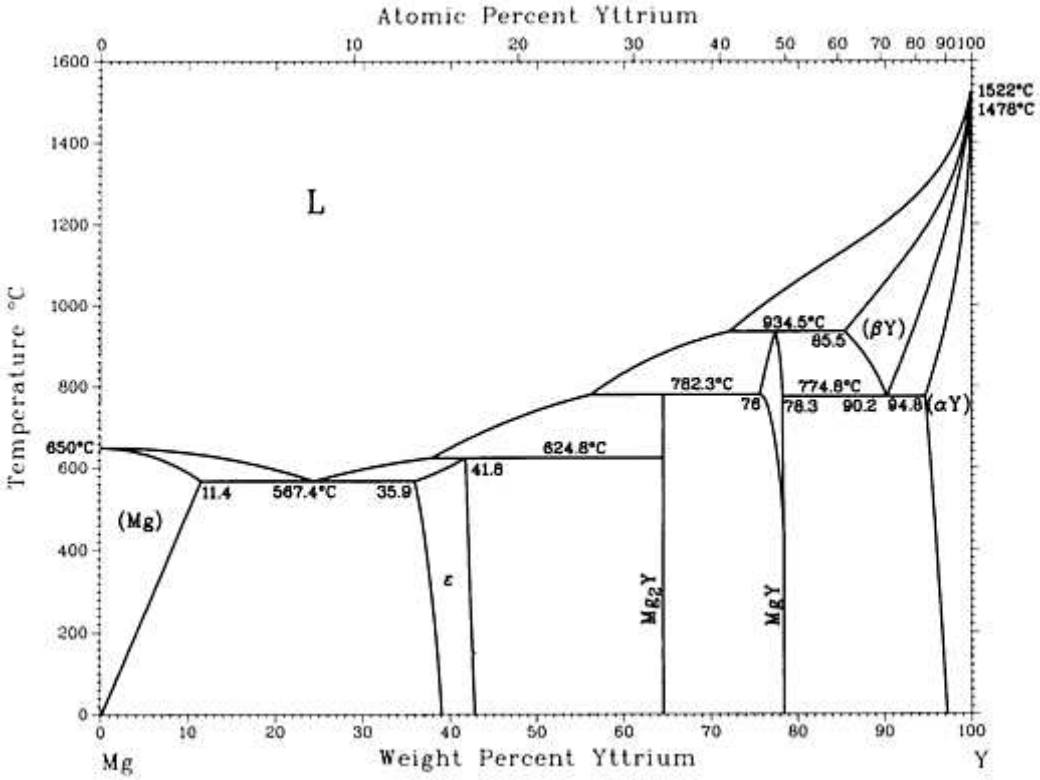


Fig. 5.29 Thin-foil electron micrographs showing the effect of silver on precipitate size in Mg–RE(Nd)–Zr alloys aged to peak hardness at 200 °C: (a) EK21 (Mg–2.5RE(Nd)–0.7Zr); (b) QE22 (Mg–2.5Ag–2RE(Nd)–0.72Zr) (courtesy K. J. Gradwell) (× 32 000).

Leghe Mg-Y e Mg-Nd-Gd

Sono state studiate per avere alta resistenza meccanica e a creep:
L'ittrio ha grande solubilità nel Mg e dà rafforzamento per soluzione solida e dà anche rafforzamento per precipitazione e dispersione con il composto metastabile $Mg_3(Nd,Y)$ o il composto stabile $Mg_{14}Nd_2Y$ ad alte temperature d'invecchiamento, vantaggioso perchè si elimina sovrainvecchiamento a T più basse.

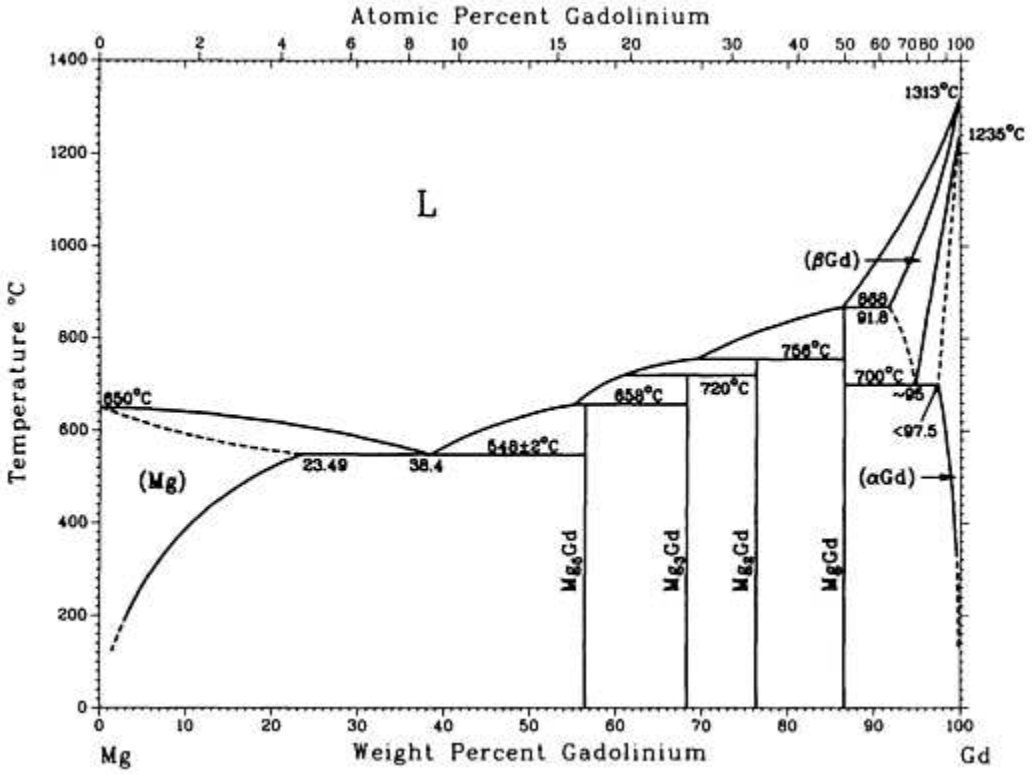


Sono state sviluppate leghe Mg-Y-Nd (RE o Mischmetal)-Zr:
· alta resistenza meccanica a T ambiente ($R_{p0,2}$ = 200MPa, R_m = 275 MPa)
· alta resistenza a creep fino a 300°C con T6 si ha la migliore resistenza a corrosione di tutte le leghe di Mg per alta temperatura e comparabile con quelle di Al.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 110

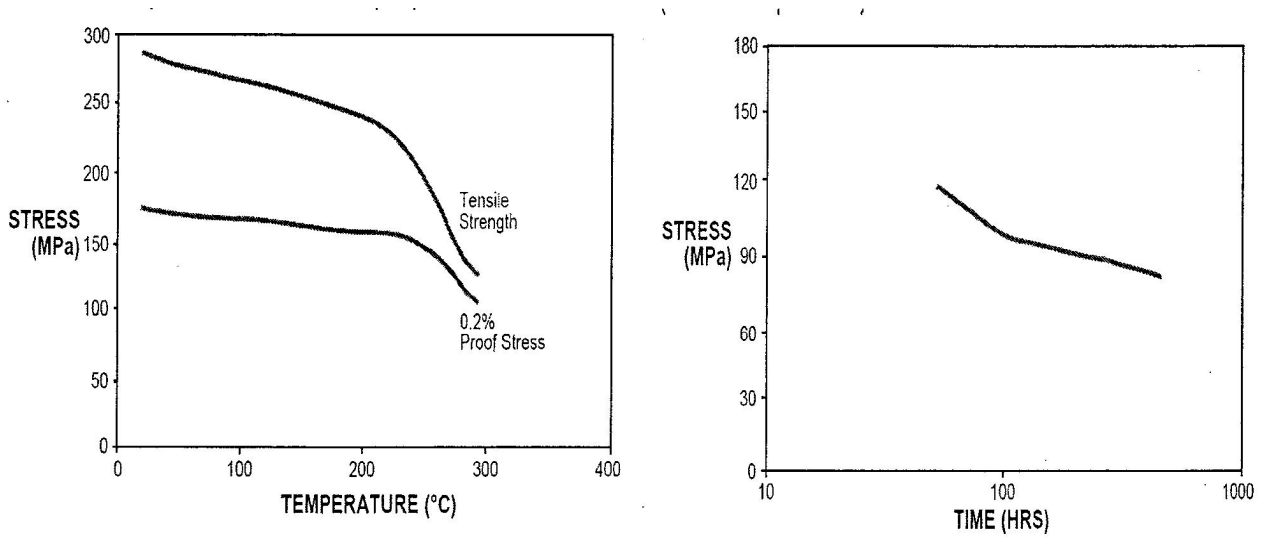
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 110

Lega con Gd Elektron 21



Viene sfruttato il Gd presente nel Mischmetal e se ne aggiunge ancora un poco per ottenere una veloce risposta all'invecchiamento ad alta temperatura perchè stimola la precipitazione di fasi stabili in grande frazione volumiche.

- migliora la fluidità perchè il liquido si ossida meno facilmente
- ha eccellente resistenza alla corrosione tipica delle leghe con RE
- le proprietà meccaniche, che sono altissime, si mantengono eccellenti e quasi inalterate fino a 250°C, poi decadono ma rimangono buone fino a 300°C
- la resistenza al creep è eccellente fino a 200°C
- è una lega costosa, con applicazioni in aerei, elicotteri e motori da corsa



Lega EV31: a sinistra la resistenza meccanica in funzione della temperatura, a destra lo stress in funzione del tempo di esercizio per una deformazione a creep dello 0,1% a 200°C

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 110

5. SCHIUME METALLICHE

Le schiume metalliche fanno parte dei materiali cellulari. Tutti i materiali ingegneristici si prestano a questo tipo di formazione. Si trovano infatti schiume fatte di materiale polimerico (schiume poliuteraniche usate in edilizia), le schiume metalliche, le schiume di materiale ceramico e di materiale organico e biologico (ossa).

La struttura dei materiali cellulari è varia. Le celle possono essere a base prismatica (es. nido d'ape, honeycomb) che possono essere multistrato (sandwich core, schiuma in mezzo a due lamine di solido monolitico) e usate anche per applicazioni strutturali. Oppure si trovano celle di forma sferica, poliedrica o irregolare, sia chiusa che aperta; e sono usate per le più svariate applicazioni in tutti i settori dell'ingegneria perle loro particolari proprietà

a. strutturali:
- leggerezza per bassa densità
- rigidezza (sandwich core)
- resistenza
- assorbimento di energia di urto (shock adsorber)
- smorzamento di vibrazioni
- galleggianti (schiume a celle chiuse)

b. termiche
- smorzamento termico (bassa conducibilità)
- resistenza alla fiamma
- facilità di asportazione del calore in schiume a cella aperta per la grande superficie accessibile

c. elettriche:
- attenuazione di onde elettromagnetiche

d. smorzamento acustico

e. antiscorrimento per il loro elevato coefficiente di attrito

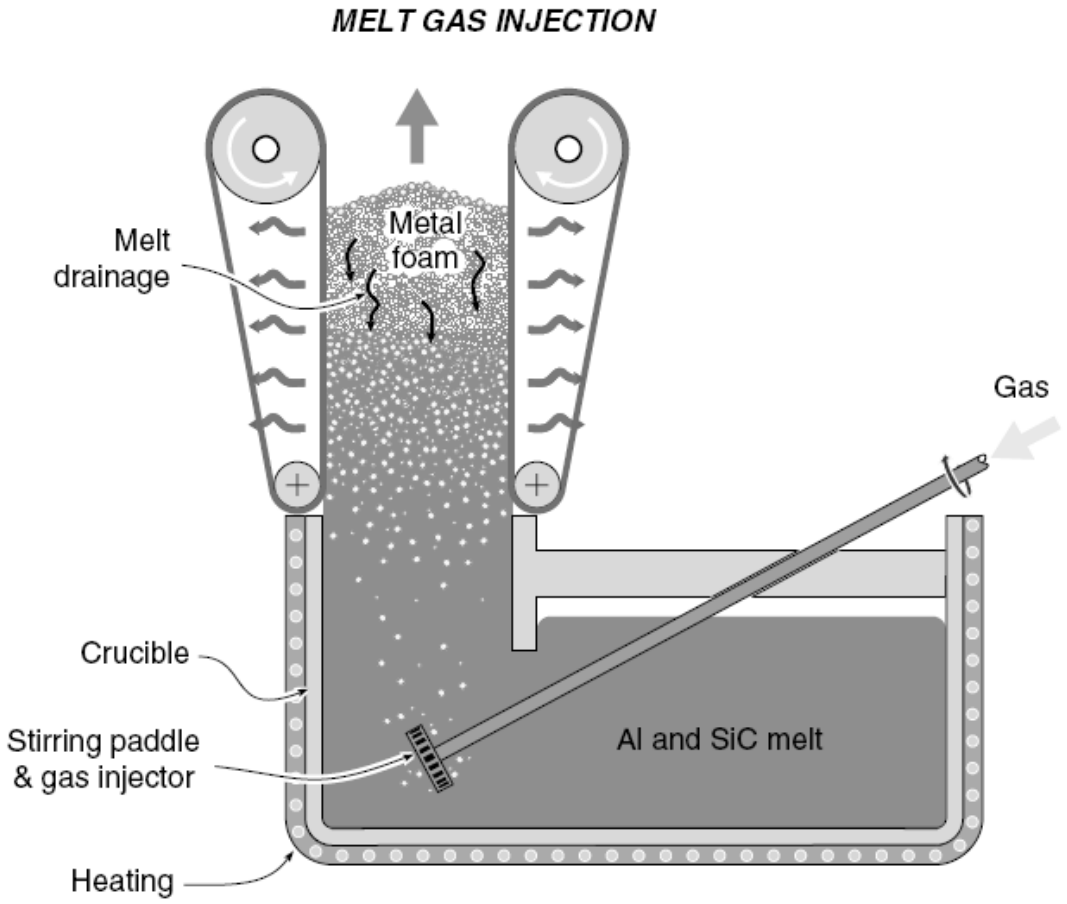
f. porosità per celle aperte
- filtri
- dosatori di fluidi
- supporti per catalizzatori
- membrane repellenti all'acqua (tessuti impermeabili e traspiranti)
- biomateriali

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 110

5.1 Processi di produzione delle schiume

Tramite il soffiaggio di bolle dentro un fluido è possibile creare una schiuma se il liquido è abbastanza viscoso o pastoso da far sì che le bolle rimangano tali per il tempo che occorre per la solidificazione. Questo processo è facile da implementare ed è adatto per materiali ceramici, polimeri e metalli. Per questi ultimi si deve aumentare la viscosità inserendo particelle ceramiche (5-15%)di Al_2O_3, ZrO_2, SiC o TiB_2, con diametro fra 0,5 e 25 μm per aumentare la viscosità. Il soffiaggio è effettuato con gas come aria, CO2, O2, gas inerti e fianco vapore. Si ottengono schiume a cella chiusa a bassa densità relativa, 0,03-0,1.

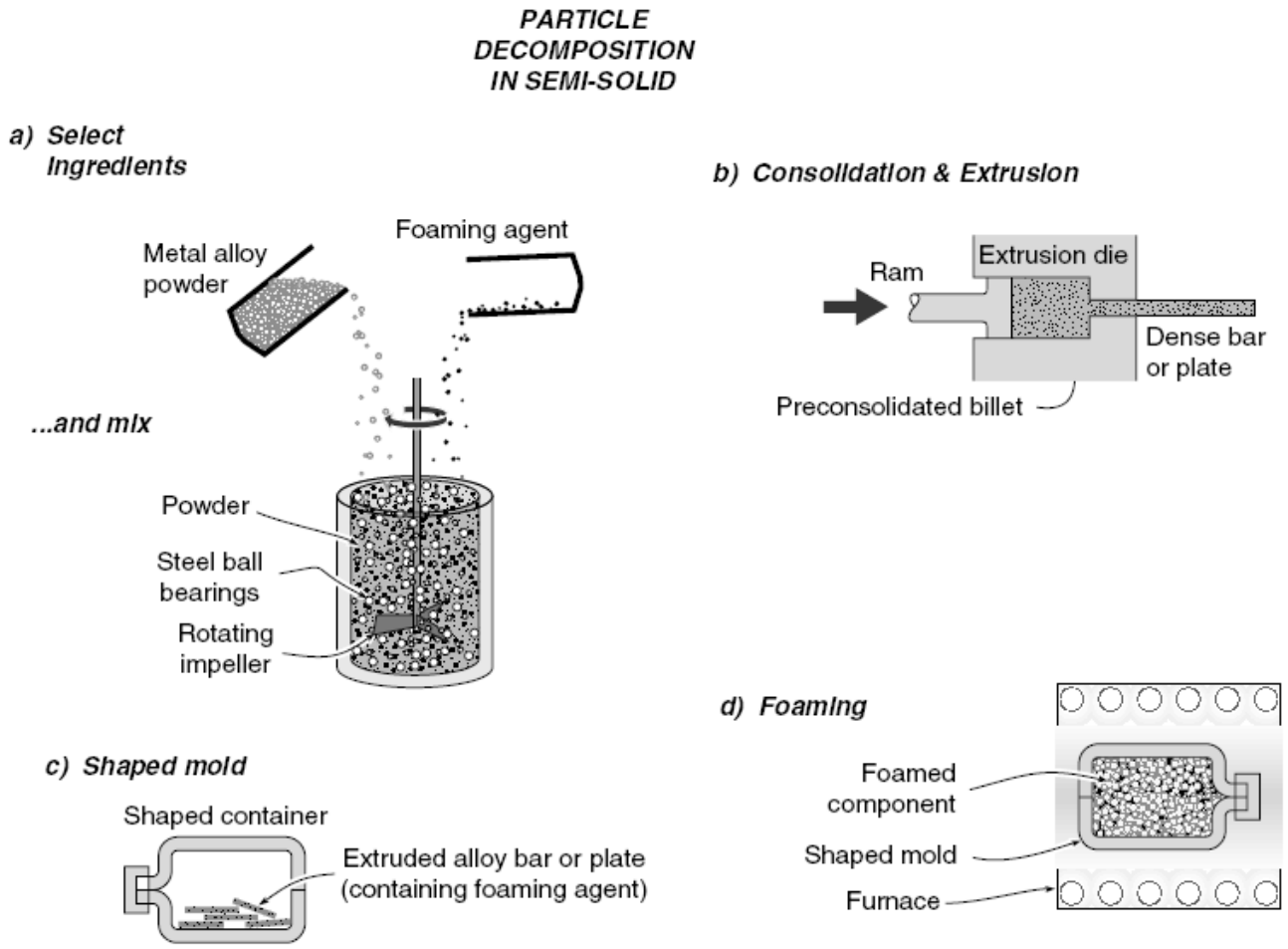


Al posto di insufflare gas si può distribuire un agente schiumogeno che volatilizza (temperature basse, polimeri) o dissocia al riscaldamento (per esempio TiH2 sopra 465°C, per metalli e ceramiche) dentro un materiale fuso o semisolido o pastoso. Si fa un'aggiunta di 1-2% di CaO per aumentare la viscosità. Si realizzano celle chiuse di diametro 0,5-5 mm, e densità relativa 0,07-0,2. Si usa solo per Al perchè la

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 110

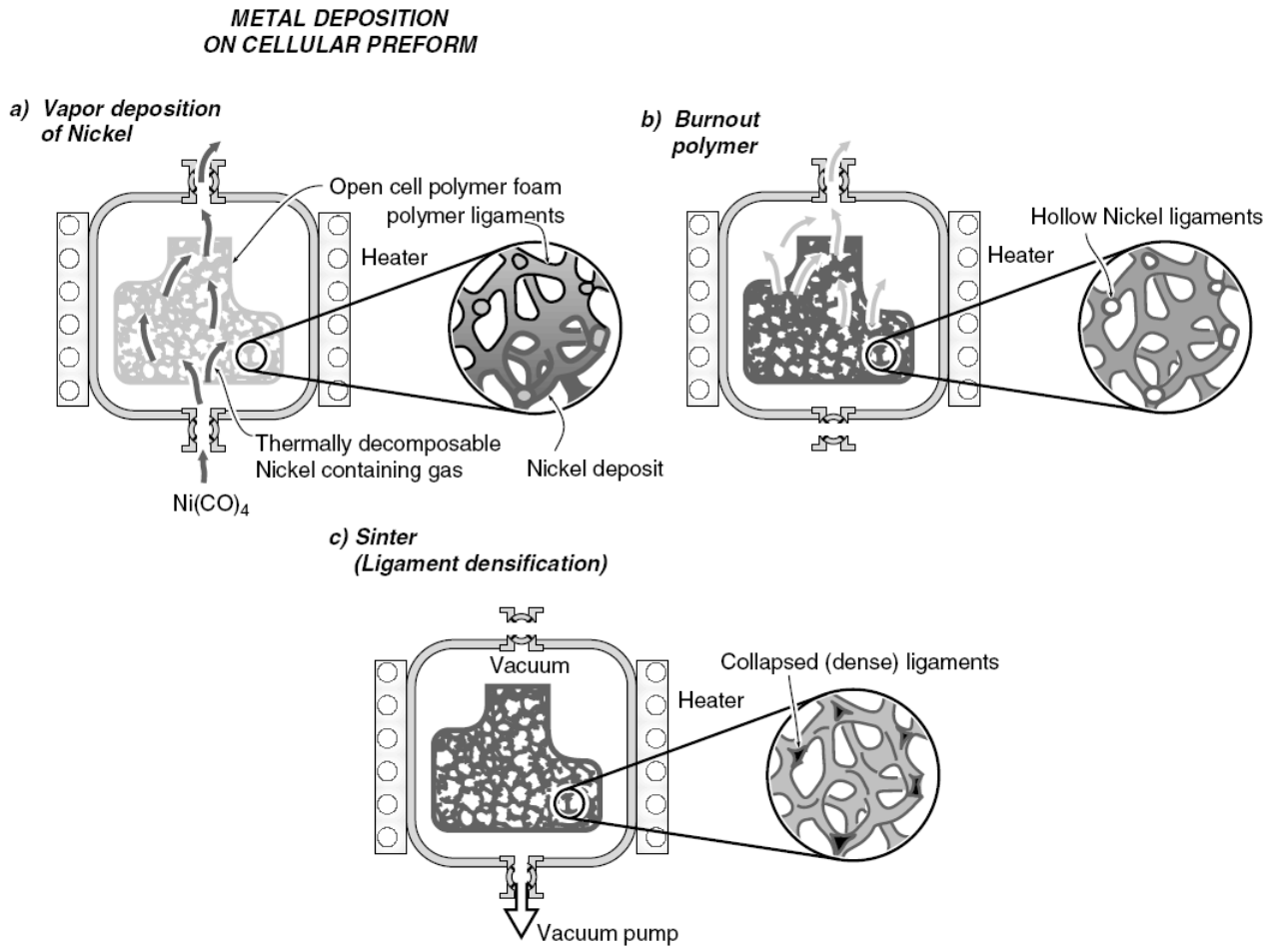
Si possono anche ottenere semilavorati con la sinterizzazione una finissima polvere di metallo (per lo più Al, Cu, Zn, Mg, Ni, leghe ferrose, intermetallici, vetri metallici) è miscelata con una finissima polvere di agente schiumogeno (per lo più idruri di Ti, Zr, Mg, con temperature di decomposizione fra 300 e 600°C). Si compatta la polvere in una preforma creando il "verde"; si sinterizza ad una temperatura fra solidus e liquidus e si ottiene un metallo poroso a cella chiusa. Si può lavorare per deformazione plastica o per asportazione di truciolo fino alla forma voluta.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 110

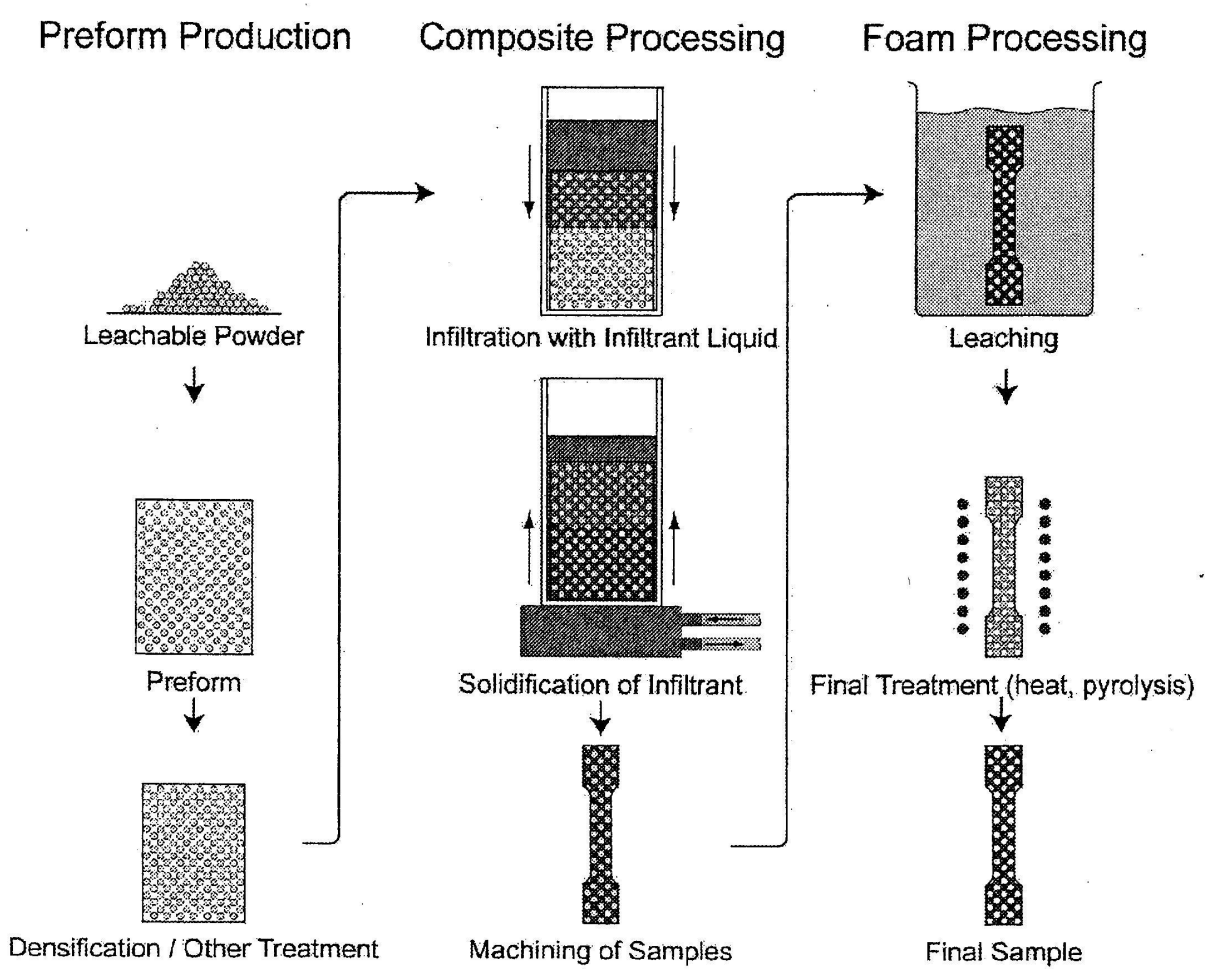
Ricopertura con CVD (deposizione vapori contenenti il metallo in questione) di schiume polimeriche a cella aperta seguita da pirolisi per eliminare lo scheletro polimerico (metalli e ceramici).



Espansione di gas intrappolati: si comprimono polveri con gas inerte come Ar ad alta pressione. Con un successivo riscaldamento si ha l'espansione del gas e lo scorrimento viscoso del metallo. Le celle sono chiuse, con porosità fino a 0,5 e 10-300 μm di dimensione di cella.

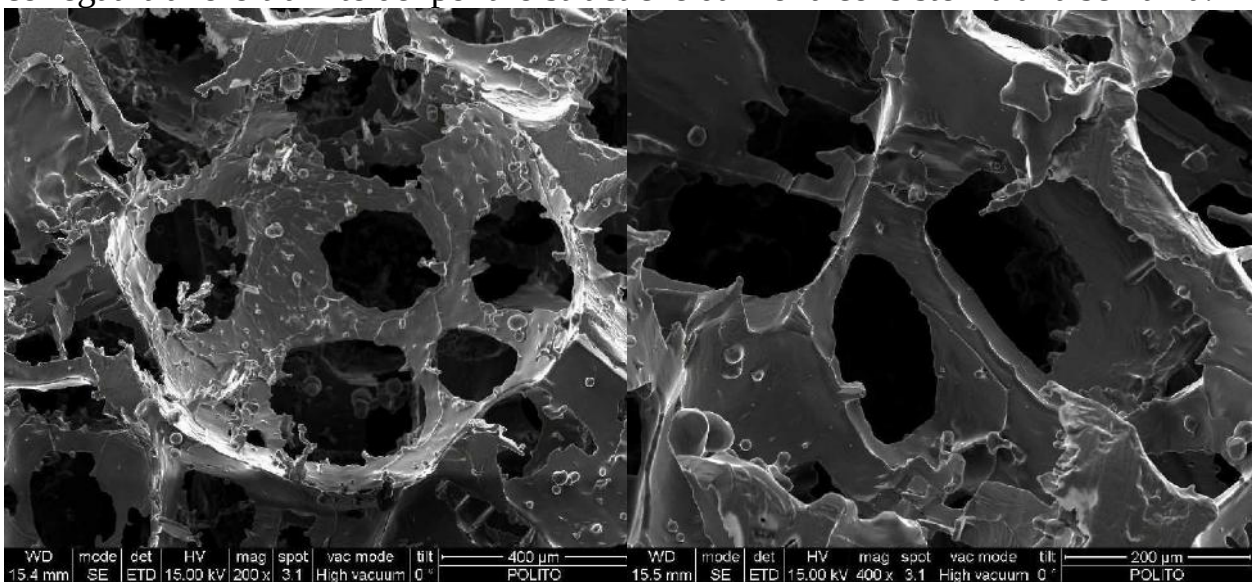
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 110



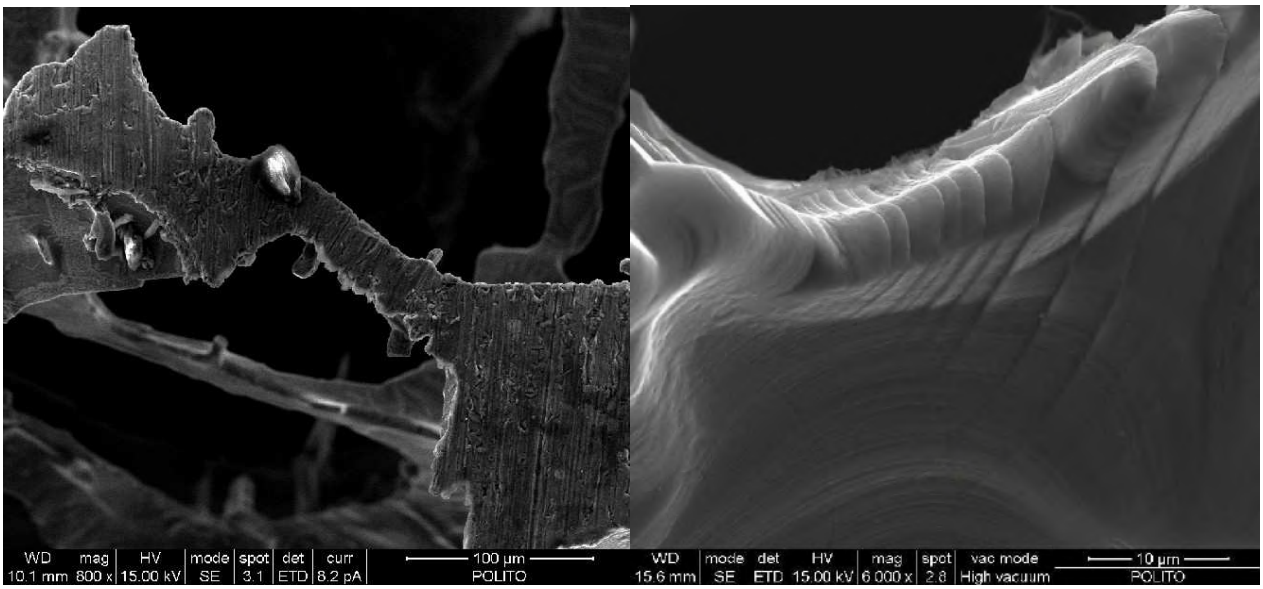
4.2 Architettura e comportamento meccanico delle schiume

La schiuma è composta da celle costituite essenzialmente da vuoto. Questi vuoti sono collegati tra loro tramite dei ponti o struct che danno la consistenza alla schiuma.

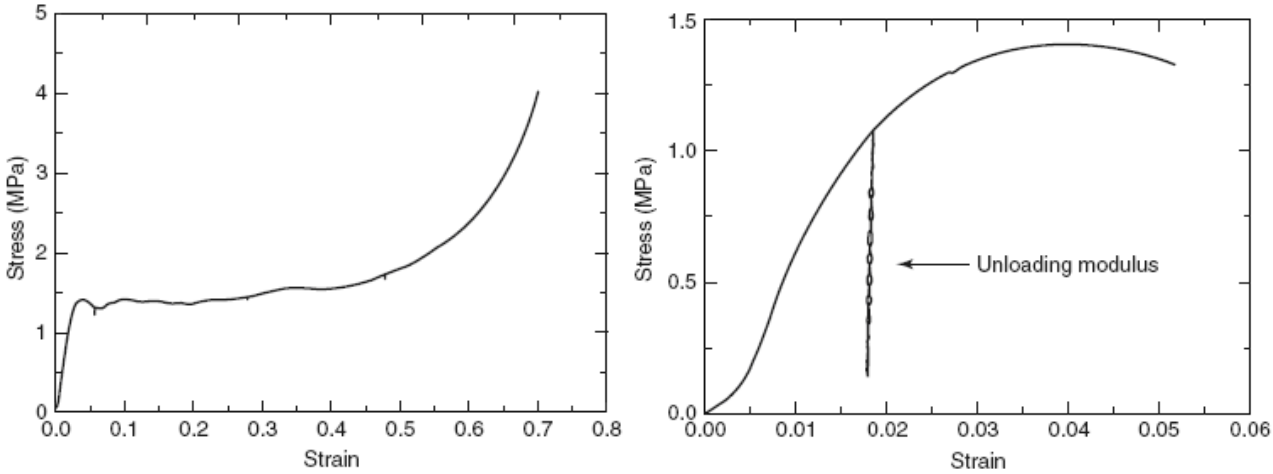


© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 110



Questo implica che, in alcune zone, gli struts si sono già deformati plasticamente, mentre in altre, gli struts mantengono un comportamento elastico.
Questo fatto da luogo a una non linearità che lentamente porta al raggiungimento del plateau come si vede nella figura sotto.



Togliendo il carico si nota come la schiuma abbia un ritorno elastico con una pendenza maggiore rispetto a quella iniziale dovuta proprio alle deformazioni plastiche. Il modulo elastico si misura allo scarico dal 75% picco di snervamento in compressione. Se non c'è picco, la resistenza a compressione è all'intersezione fra la retta del tratto di salita e quella piatta del plateau.
In trazione gli andamenti sono sostanzialmente diversi rispetto alla compressione.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 110

Poi dopo però cambia tutto: la rotazione e lo stiramento delle celle riduce il momento applicato sugli struts. Lo stress necessario σ* per continuare la deformazione varia con la densità, ma alla fine diventa quello necessario ad estendere le celle già allineate e stirate. Questo vale sia per celle chiuse (eventualmente con incluso l'effetto del fluido se questo è denso), sia per celle aperte. Lo stress necessario ad incrementare la deformazione deve quindi crescere e non da origine al plateau. Un modello meccanico molto soddisfacente non è disponibile. Ci sono però i risultati sperimentali che danno una tendenza per la resistenza a trazione:

$$\frac{\sigma_R^*}{\sigma_{ts}} = k_{R,traz}\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

4.3 Meccanica delle schiume

Essendo molto intuitivo e facile da misurare, il parametro più importante per un schiuma è la densità relativa, cioè il rapporto tra la densità della schiuma e la densità del solido monolitico:

$$V_m = \frac{\rho^*}{\rho_s}$$

Tramite un modello fisico multi scala possiamo correlare le caratteristiche meccaniche del materiale monolitico (ad es. modulo elastico e tensione di snervamento) a quelle della versione cellulare dello stesso materiale proprio in funzione della densità relativa che, a sua volta dipenderà dal processo di fabbricazione. Infine se si dispone di buon controllo del processo produttivo si possono fabbricare schiume che hanno le proprietà desiderate.

Parametri del modello

Questo modello, valido per schiume a celle chiuse e a celle aperte, permette di ricavare i parametri macroscopici analizzando la deformazione delle celle. Si individuano tre livelli caratterizzati da parametri diversi:

- macroscopico: la scala macroscopica è quella della schiuma (ordine di grandezza (10-100 mm). A questa scala si vede il provino di schiuma, di sezione *A*, al quale è applicato un carico *P*. La schiuma si deformerà di una certa quantità ε^*.
- mesoscopico: a questa scala (0,1-1 mm) si vede la cella, che nel nostro modello si può approssimare cubica i cui spigoli si possono approssimare a travi, caratterizzata da un certo volume di cella proporzionale al lato del cubo:

$$V_{cell} \propto l^3$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 110

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 110

Con E_s modulo elastico del materiale, J momento d'inerzia della sezione degli struts che è proporzionale a t^4. Allo strut è associata la deformazione:

$$\varepsilon_s = \frac{\delta}{l}$$

Calcolo del modulo elastico della schiuma a cella aperta e a cella chiusa

I parametri delle varie scale possono essere collegati.
Per l'equilibrio delle forze il carico P della schiuma è proporzionale alla carico F che agisce sulla cella. Inoltre anche la deformazione se si resta in campo elastico anche la deformazione della cella è proporzionale a quella della schiuma.

$$P \propto F \;;\; \varepsilon_{cella} \propto \varepsilon^* \;;\; E_o^* \propto \frac{P}{A\varepsilon^*} \;;\; \sigma \propto \frac{F}{l^2}$$

$$\Rightarrow E_o^* \propto \frac{\sigma}{\varepsilon_{cella}}$$

Passando dalla cella agli struts si può assumere che la deformazione che le due deformazioni siano proporzionali.

$$\varepsilon_{cella} \propto \varepsilon_{struct}$$

Con questa approssimazione si può legare il comportamento della schiuma alla deformazione degli struts:

$$E_o^* \propto \frac{F}{l^2\varepsilon_{strust}} \propto \frac{Fl}{l^2\delta} \propto \frac{F}{l}\frac{E_s t^4}{Fl^3} \propto E_s\left(\frac{t}{l}\right)^4$$

Il rapporto t/l si può correlare alla densità relativa sempre con il modello di prima.
La densità della cella coincide con la densità ρ^* della schiuma; in quanto quest'ultima è la riproduzione nello spazio dell'elemento cella che ha densità costante. Questa densità vale:

$$\rho_{cella} = \rho^* = \frac{m_{cella}}{V_{cella}}$$

La massa della cella è uguale alla massa dello scheletro, cioè alla somma delle masse degli struts; mentre il volume dello della cella è la somma del volume dello scheletro più lo spazio vuoto. Si può scrivere allora:

$$\rho_{cella}V_{cella} = \rho_{scheletro}V_{scheletro}$$

Con: $V_{cella} \propto l^3$ e $V_{scheletro} \propto t^2 l$

Si ottiene: $\dfrac{\rho_{cella}}{\rho_{scheletro}} = \dfrac{\rho^*}{\rho_s} = \dfrac{V_{scheletro}}{V_{cella}} = \left(\dfrac{t}{l}\right)^2$

Sostituendo nell'espressione del modulo elastico:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 110