

16 Trattamenti termici delle ghise

Principali trattamenti termici delle ghise

Preparazione del campione per l'esame al microscopio della grafite

Il campione da esaminare al microscopio deve avere dimensioni tali da consentire la preparazione di una superficie di almeno 140 mm².

Il prelievo del provino deve essere fatto in corrispondenza della parte del getto destinata a ricevere maggiori sollecitazioni in opera, tenendo presente che nello stesso getto si possono avere condizioni diverse da punto a punto e quindi una diversa presentazione di grafite.

Poiché la superficie esterna del pezzo è sottoposta a una velocità di raffreddamento superiore a quella del cuore, il prelievo del campione deve essere preparato a una profondità di superficie corrispondente a quella del sovrametallo da asportare.

La superficie deve essere lucidata con molta cura, per evitare che la grafite possa essere ricoperta dalla struttura metallica.

Esame della superficie al microscopio

In prima fase si fa il rilievo con un ingrandimento di 20 volte, per avere una visione panoramica di tutta la superficie e avere una indicazione globale della disposizione e della forma della grafite in ogni parte.

Si rileva così la percentuale delle varie forme.

Si procede successivamente all'esame della grafite a 100 ingrandimenti.

Se nella struttura si hanno più forme di grafitizzazione, occorre procedere all'esame di ciascuna.

Classificazione UNI delle forme di grafitizzazione

Secondo le norme UNI le forme delle singole lamelle o noduli sono classificate con numeri romani da I a VI.

Grafite tipo I (fig. 1)

Sono lamelle lunghe e sottili con punte aguzze.

La presenza delle lamelle aumenta al massimo l'effetto di intaglio, perciò diminuisce notevolmente la resistenza meccanica.

Grafite tipo II (fig. 2)

È formata da noduli con accentuate ramificazioni di lamelle.

Grafite lamellare tipo III (fig. 3)

È costituita da lamelle spesse con punte arrotondate.

Se la distribuzione è di tipo A, le lamelle di tipo III garantiscono una resistenza meccanica migliore rispetto alle lamelle di tipo I.

A parità di percentuale di grafite, un maggiore spessore comporta una minore estensione del contorno e una minore interruzione di continuità della matrice metallica; le punte arrotondate determinano un minore effetto di intaglio.

Grafite tipo IV (fig. 4)

È costituita da flocculi frastagliati.

Si trova facilmente nelle ghise malleabili a cuore bianco.



Figura 1
Grafite tipo I.



Figura 2
Grafite tipo II.

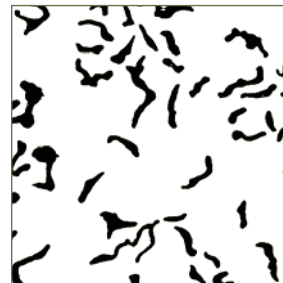


Figura 3
Grafite lamellare tipo III.



Figura 4
Grafite tipo IV.

Grafite tipo V (fig. 5)

È costituita da flocculi compatti, di contorno irregolare.
Si trova nelle ghise malleabili a cuore nero.

Grafite tipo VI (fig. 6)

È costituita da noduli a contorno ben definito, pressoché circolare.
Questa forma determina la massima resistenza, perché la forma circolare è quella che dà il minore effetto di intaglio possibile.



Figura 5
Grafite tipo V.

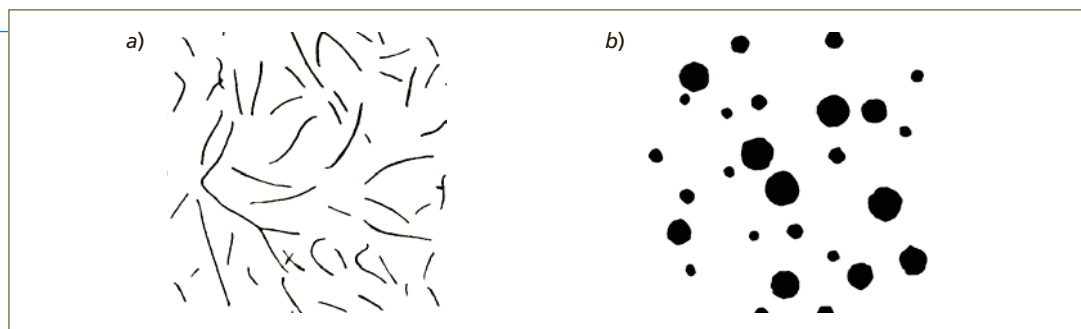


Figura 6
Grafite tipo VI.

Tipi di distribuzione della grafite**Grafite tipo A**

È costituita da lamelle sottili distribuite uniformemente e senza orientamento preferenziale (fig. 7a) o da noduli e flocculi (fig. 7b).

Figura 7
Grafite tipo A.

**Grafite tipo B**

È costituita da lamelle raggruppate in rosette e senza orientamento preferenziale.
Le aree centrali, occupate da lamelle più fini, si presentano a ciuffi più o meno sviluppati (fig. 8).

Grafite tipo C

È costituita da lamelle spesse e diritte, senza orientamento preferenziale (fig. 9).

Grafite tipo D

È costituita da lamelle piccolissime, senza orientamento preferenziale, distribuite nelle zone interdendritiche (fig. 10).

Grafite tipo E

È costituita da lamelle piccole, a orientamento preferenziale, raggruppate nelle zone interdendritiche (fig. 11).



Figura 8
Grafite tipo B.

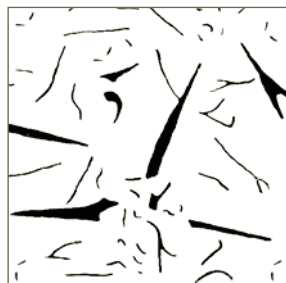


Figura 9
Grafite tipo C.

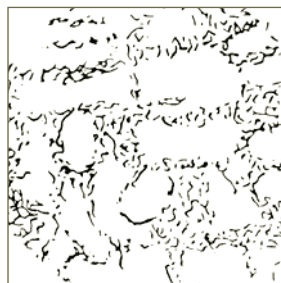


Figura 10
Grafite tipo D.

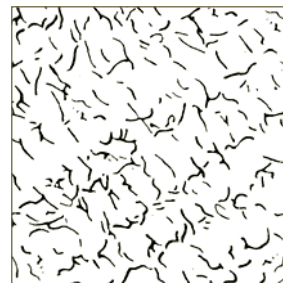


Figura 11
Grafite tipo E.

Esempi

In **figura 12** è rappresentata una ghisa lamellare, con grafite e rosette.

La struttura è costituita da perlite (scura) e da cementite (bianca).

In **figura 13** è rappresentata una ghisa lamellare con grafite a rosette.

La struttura è costituita prevalentemente da perlite.

Si notano solo tracce di cementite.

In **figura 14** è rappresentata una ghisa a grafite lamellare con lamelle lunghe.

La struttura è costituita da perlite e da una quantità rilevante di ferrite (grigio scuro).

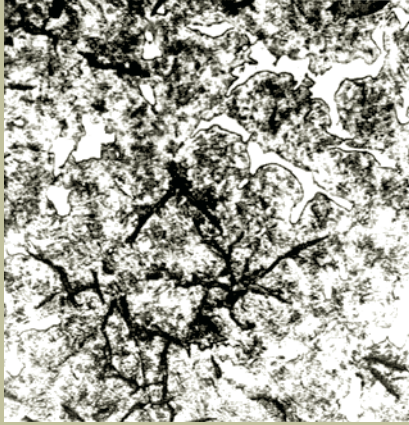


Figura 12



Figura 13

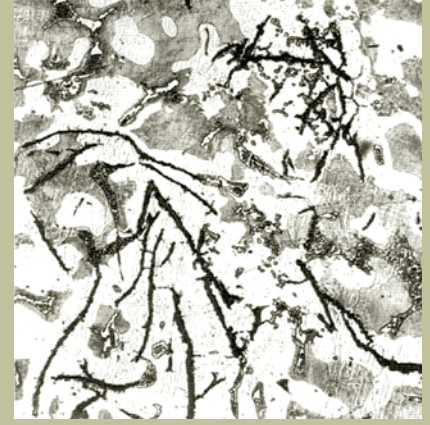


Figura 14

Esame delle dimensioni della grafite

Le dimensioni della grafite sono rilevate per confronto tra le immagini della grafite del campione e quella delle figure convenzionali catalogate. Il rilievo viene eseguito sulla immagine ripresa a 100 ingrandimenti, senza attacco, proiettata su vetro smerigliato.

La misura delle lamelle si riferisce alla loro lunghezza.

La misura dei noduli è quella corrispondente al loro diametro.

Le indicazioni della lunghezza delle lamelle e del diametro dei noduli sono espresse con i numeri convenzionali corrispondenti alla loro dimensione (**tab. 1**).

Per lamelle di lunghezza	A 100 ingrandimenti	Per noduli di diametro medio	A 200 ingrandimenti
maggiore di 100 mm	$N=1$	maggiore di 25 mm	$N=3$
da 50 a 100 mm	$N=2$	da 12 a 25 mm	$N=4$
da 25 a 50 mm	$N=3$	da 6 a 12 mm	$N=5$
da 12 a 50 mm	$N=4$	da 3 a 6 mm	$N=6$
da 6 a 12 mm	$N=5$	da 1,5 a 3 mm	$N=7$
da 3 a 6 mm	$N=6$	inferiore a 1,5 mm	$N=8$
da 1,5 a 3 mm	$N=7$		
inferiore a 1,5 mm	$N=8$		

Tabella 1

Lunghezza lamelle e diametro noduli.

Classificazione delle ghise

Una classificazione generale delle ghise ormai comunemente accettata si basa su tre elementi caratterizzanti:

- aspetto della frattura;
- struttura;
- proprietà.

Secondo questa classificazione, le ghise possono essere raggruppate come segue:

- ghise grigie e bianche;
- ghise ottenute mediante trattamento termico;
- ghise legate.

In particolare, le ghise ottenute mediante trattamento termico comprendono:

- ghise malleabili;
- ghise sferoidali.

Ghisa grigia

La sua denominazione deriva dall'aspetto della frattura.

La ghisa grigia contiene meno dello 0,8% di carbonio combinato, mentre il carbonio restante si trova allo stato di grafite, che dà colorazione grigia alla frattura.

La struttura può essere di tipo ferritico, perlitico e perlitico-ferritico.

Quando a un getto di ghisa, che ha la tendenza naturale a solidificare nella forma tipica grigia, si impone durante la solidificazione una velocità di raffreddamento molto elevata, si ottiene la trasformazione in ghisa bianca.

Si dà il nome di ghisa in conchiglia a una ghisa grigia che ha subito un raffreddamento in conchiglia metallica, e che, per questa ragione, si presenta con il carbonio combinato nella cementite in prossimità della superficie esterna.

Le ghise che hanno una struttura perlitica sono quelle maggiormente richieste per la produzione di getti.

In **figura 15** è presentata una ghisa grigia a struttura perlitica, esaminata a 500 ingrandimenti, con attacco della superficie con reattivi chimici.

Si rilevano i seguenti componenti:

- grafite lamellare (nera);
- struttura perlitica a lamelle;
- steadite, cioè eutettico ternario formato da cementite, ferrite e fosfuri (si presenta nella forma di piccoli puntini neri distribuiti nella zona centrale).

Le ghise che hanno una struttura ferritica sono caratterizzate da bassa durezza, da una più facile lavorabilità e da una buona tenacità.

La loro resistenza a trazione è bassa.

In **figura 16** è presentata una ghisa grigia a struttura ferritica.

Ghisa bianca

Contiene carbonio combinato nel composto intermetallico Fe_3C , cioè nella cementite.

La ghisa bianca è molto dura e fragile, perciò è di difficile lavorazione.

Il suo nome deriva dal colore della frattura.

La ghisa bianca viene prodotta per essere successivamente convertita in ghisa malleabile o per la costruzione di organi resistenti all'usura e all'abrasione.

In **figura 17** è presentata una ghisa bianca.

Ghisa malleabile

È ottenuta dalla ghisa bianca mediante trattamento termico di decarburazione, allo scopo di ottenere tenacità, resistenza e migliore lavorabilità.

I tipi di ghisa malleabile più comuni sono la ghisa a cuore bianco e quella a cuore nero.

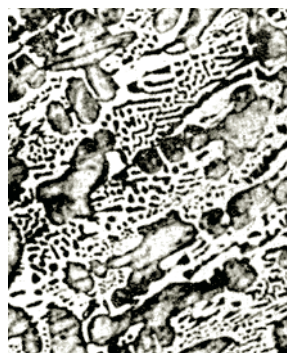
La ghisa malleabile a cuore bianco (europea) è ottenuta per decarburazione della ghisa a contatto con ossidi metallici (Fe_2O_3) e con l'aria (O_2).

La ghisa malleabile a cuore nero è ottenuta per prolungata ricottura, con decomposizione della cementite e formazione di grafite flocculare.

In **figura 18** è presentata una ghisa malleabile a cuore bianco.

**Figura 15**

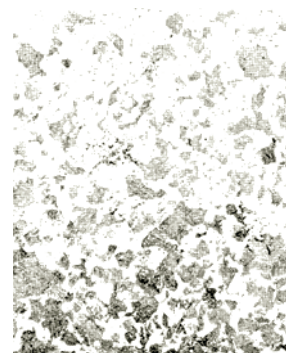
Ghisa grigia a struttura perlitica.

**Figura 16**

Ghisa grigia a struttura ferritica.

**Figura 17**

Ghisa bianca.

**Figura 18**

Ghisa malleabile a cuore bianco.

Ghisa sferoidale

La ghisa sferoidale viene prodotta con procedimenti speciali, mediante i quali si ottiene la precipitazione della grafite non in forma di lamelle, bensì di sferoidi.

Gli elementi chimici da aggiungere in lega per ottenere la sferoidizzazione sono il manganese e il cerio. La forma sferoidale della grafite elimina gli inconvenienti causati dalla forma lamellare (indebolimento, cricche e fessure che costituiscono un innesco alla rottura) e conferisce alla ghisa una maggiore resistenza alla trazione e una maggiore duttilità.

La ghisa sferoidale perciò può essere impiegata per la produzione di getti anche molto complessi. In **figura 19** è presentata una ghisa sferoidale.

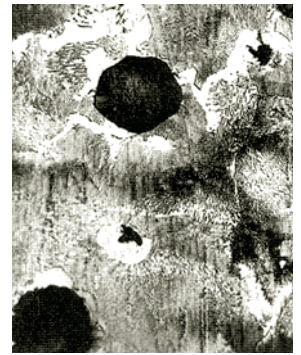


Figura 19
Ghisa sferoidale.

Ghise legate

Vengono prodotte con la massima regolarità nella distribuzione della grafite.

Rientrano in questa categoria la ghisa meehanitica, la ghisa di Lanz, di Emmel ecc.

Nelle ghise legate il tenore di silicio e di carbonio deve essere regolato, perché è soprattutto da questi due elementi che dipende la sensibilità della ghisa allo spessore, con graduale riduzione delle proprietà tecnologiche nel passaggio da un getto a un altro di spessore differente.

In **figura 20** è presentata una ghisa legata.

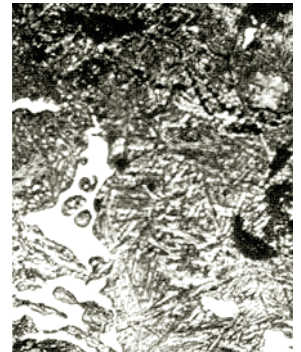


Figura 20
Ghisa legata.

8.3 Caratteristiche e strutture delle ghise grigie e bianche

Le caratteristiche meccaniche della ghisa dipendono dalla forma e dalla distribuzione del carbonio.

Le ghise di tipo nodulare, prodotte con particolari trattamenti termici e termochimici, hanno migliore resistenza meccanica.

Le ghise di tipo lamellare che hanno migliori caratteristiche meccaniche sono quelle a lamelle di tipo A, uniformemente distribuite e di piccola dimensione.

Effetto degli elementi aggiunti sulle caratteristiche meccaniche e sulla presentazione del carbonio

Gli elementi aggiunti influenzano le proprietà meccaniche delle ghise e la forma del carbonio. Indicando con C_t il carbonio totale, con C_c il carbonio combinato e con C_g la grafite, si ha:

$$C_t = C_g + C_c.$$

Il contenuto di grafite è tanto maggiore quanto più bassa è la velocità di raffreddamento della lega fusa e dipende dalla natura degli elementi aggiunti.

La **tabella 2** riassume gli effetti degli elementi aggiunti sulle caratteristiche meccaniche e sulla grafitizzazione.

Elemento	Caratteristiche meccaniche	Temperatura di fusione	Tipo di ghisa
Carbonio grafítico	inferiori	inferiore	grigia
Carbonio cementitico	inferiori	inferiore	bianca
Silicio	inferiori	inferiore	grigia
Manganese	aumenta la durezza	superiore	bianca
Fosforo	inferiori	inferiore	grigia
Zolfo	aumenta la durezza	superiore	bianca

Tabella 2

Effetto degli elementi aggiunti.

Carbonio equivalente e grado di saturazione

Viene definito carbonio equivalente il carbonio totale contenuto nella ghisa, corretto con le aggiunte di silicio e fosforo.

Indicato con C_E il carbonio equivalente si ha:

$$C_E = C_t + 0,25 \text{ Si} + 0,5 \text{ P}.$$

Dalla indicazione del carbonio equivalente è possibile dedurre la resistenza a trazione della ghisa.

Viene definito grado di saturazione il rapporto tra il carbonio totale della ghisa e il carbonio eutettico, corretto con aggiunte degli elementi leganti.

Indicando con G_s il grado di saturazione si ha:

$$G_s = \frac{C_t}{4,3 - 0,31 \text{ Si} - 0,42 \text{ P}}$$

Il grado di saturazione delle ghise influenza l'intervallo di solidificazione e la resistenza a trazione. Nella **figura 21a** è rappresentata la variazione della resistenza a trazione in funzione del carbonio equivalente.

Dal grafico si deduce che quanto più alto è il carbonio equivalente tanto più basso è il carico di rottura del materiale.

Anche le dimensioni del getto determinano il carico di rottura.

A parità di carbonio equivalente, i getti di dimensioni minori hanno più bassi carichi di rottura.

Il diagramma in **figura 21b** mette in evidenza l'andamento del carico di rottura in funzione del grado di saturazione.

Figura 21

Carico di rottura in funzione del tenore di carbonio e del grado di saturazione.

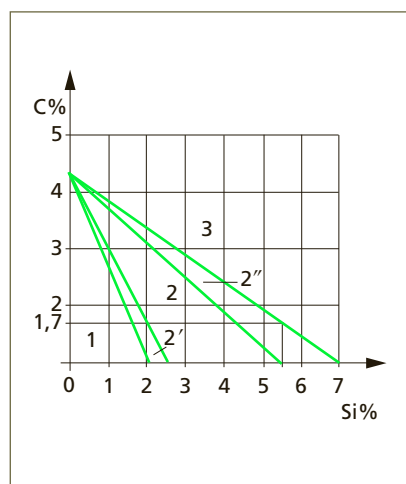
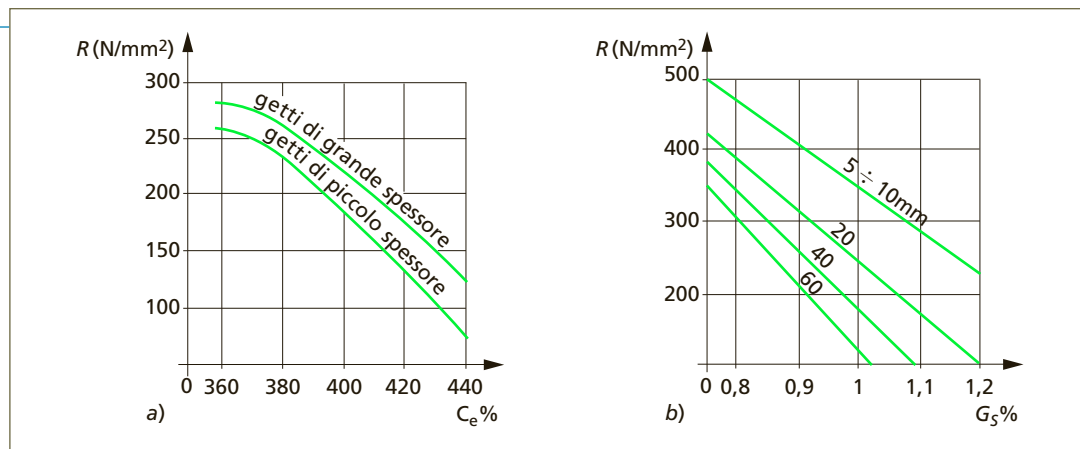


Figura 22

Diagramma di Maurer.

Diagramma di Maurer

Il diagramma di Maurer in **figura 22**, relativo a getti di $30 \div 40 \text{ mm}$ di spessore, ha in ascissa la percentuale di silicio e in ordinata la percentuale di carbonio corrispondente alla composizione della ghisa.

Il diagramma è diviso in zone, ognuna delle quali è caratterizzata da una particolare struttura. La zona 1 (limiti: A $C\% = 4,3$; $Si\% = 0$; B $C\% = 1$; $Si\% = 2$) determina il campo di esistenza delle ghise bianche, cioè delle ghise in cui il carbonio è completamente combinato sotto forma di cementite.

La zona 2 (limiti: A $C\% = 4,3$; $Si\% = 0$; C $C\% = 1$; $Si\% = 7$) determina il campo di esistenza delle ghise perlitiche.

La zona 3 determina il campo delle ghise ferritiche.

La zona 2-3 è detta anche campo delle ghise grigie data la presenza di carbonio sotto forma di grafite.

Ci sono poi due zone intermedie ($2'$, $2''$) che definiscono campi di strutture di transizione denominate rispettivamente ghise trogate e ghise perlitico-ferritiche.

Strutture principali delle ghise

Le strutture più comuni sono le seguenti:

- ferrite;
- cementite;
- perlite.

Ferrite

La struttura ferritica contenuta nella ghisa può variare entro ampi limiti.

In genere tende a presentarsi in quantità tanto maggiore quanto più alto è il contenuto di carbonio e di silicio e quanto più bassa è la velocità di raffreddamento del materiale fuso.

La durezza Brinell è $HB = 830 \text{ N/mm}^2$.

Cementite

È carburo di ferro, formula chimica Fe_3C . È sempre presente in quantità più o meno rilevante.

La sua presenza è favorita da un basso contenuto di silicio, da un alto contenuto di manganese, dalla presenza di elementi stabilizzanti dei carburi, quali cromo e vanadio, e da una elevata velocità di raffreddamento.

Perlite

È il costituente più importante delle ghise impiegate nella costruzione di parti di macchine.

La perlite conferisce ottime proprietà meccaniche alla lega.

La sua formazione è favorita da un raffreddamento moderato del getto e da un contenuto elevato di carbonio, di silicio e di manganese.

Ghisa bianca

La ghisa bianca è una lega che non contiene grafite.

Il carbonio si trova legato col ferro sotto forma di cementite.

Questa ghisa è detta ghisa bianca per il colore di frattura.

I getti in ghisa bianca hanno elevata resistenza all'usura e alla abrasione.

La ghisa bianca viene prodotta con una diversa composizione della lega e con diverse modalità della solidificazione, che è accelerata in forme metalliche (conchiglie).

Per questo la ghisa bianca è impiegata per la produzione di piastre di rivestimento di frantoi, sfere per mulini ecc.

Influenza della velocità di raffreddamento

Il diagramma di Greiner, rappresentato in [figura 23](#), mette in evidenza l'influenza dello spessore del pezzo e del contenuto complessivo di carbonio e di silicio sulla struttura.

Il diagramma mette in evidenza le seguenti zone:

- campo delle ghise bianche, limitato a ghise di piccolo spessore e di basso contenuto di carbonio e di silicio;
- campo delle ghise trotate, per spessori leggermente superiori e per adeguato contenuto di carbonio e di silicio;
- campo delle ghise perlitiche, per spessori superiori e adeguato contenuto di carbonio e di silicio;
- campo delle ghise ferritiche per elevati spessori per contenuto alto di carbonio e di silicio;
- campo delle ghise perlitico/ferritiche per contenuti alti di carbonio o di silicio e per spessori intermedi tra quelli che favoriscono le ghise ferritiche o quelle perlitiche.

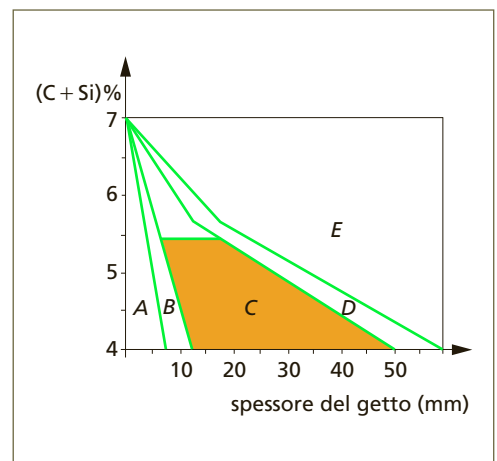


Figura 23

Diagramma di Greiner.

Trattamenti termici delle ghise

La ghisa può essere sottoposta a trattamento termico di tempra.

Dalla struttura di base della ghisa, con trattamento termico appropriato, è possibile ottenere le modifiche strutturali che ne migliorano le caratteristiche meccaniche.

Con i trattamenti termici può essere ottenuta anche la trasformazione del carbonio combinato.

I trattamenti termici sulle ghise sono i seguenti:

- tempra e rinvenimento;
- ricottura di addolcimento;
- ricottura di normalizzazione;
- ricottura di stabilizzazione o distensione.

Tempra e rinvenimento

È richiesto un trattamento di tempra sulla ghisa quando si vogliono ottenere elevate resistenze meccaniche e all'usura.

Per la tempra si richiede:

- riscaldamento di austenitizzazione fino a una temperatura superiore ad A_{c1} , per il tempo necessario a ottenere la totale austenizzazione;
- raffreddamento con una velocità adeguata a ottenere la trasformazione in martensite.

La temperatura di austenitizzazione è determinata anche dalla presenza nella ghisa di silicio e di manganese.

Dopo la tempra il materiale deve subire il trattamento di rinvenimento a bassa temperatura, per ottenere una parziale trasformazione della martensite ([fig. 24](#)).

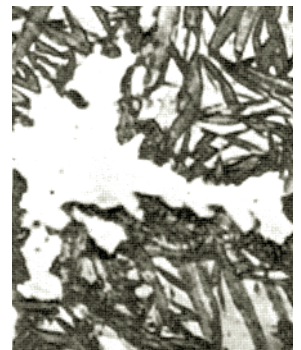


Figura 24

Ghisa sottoposta a tempra e rinvenimento.

**Figura 25**

Ciclo termico di tempra e rinvenimento.

Esecuzione dei trattamenti

Il trattamento richiede il seguente procedimento esecutivo.

Si riscalda la ghisa fino a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, per il tempo necessario ad avere uniformità di temperatura in ogni punto.

Si porta la temperatura fino a $840\text{ }^{\circ}\text{C}$, per avere la completa austenitizzazione della perlite.

Si raffredda la lega in acqua o in olio, allo scopo di ottenere strutture martensitiche che conferiscono durezza Brinell $\text{HB} = 600 \div 850 \text{ da N/mm}^2$.

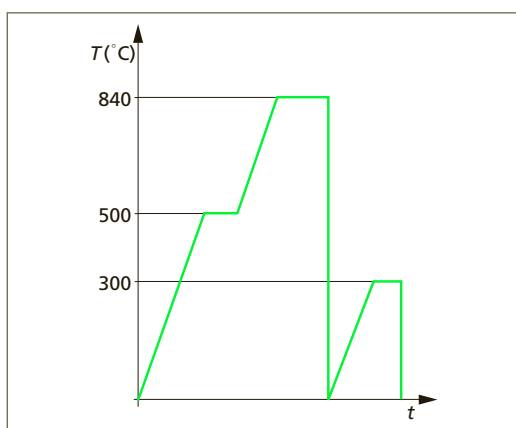
Dopo la tempra si esegue un rinvenimento a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, per trasformare parzialmente la martensite e ottenere strutture meno fragili.

Si fa rilevare che i trattamenti di tempra presentano notevoli pericoli di rotture, a meno di non introdurre in lega elementi speciali che riducano la velocità critica di tempra e rendano più elastica la ghisa.

Gli elementi più frequentemente aggiunti per ridurre i pericoli di rotture sono:

- nichel, che abbassa la velocità critica di tempra;
- manganese, che impedisce la grafitizzazione.

In **figura 25** è presentato il ciclo termico di tempra e rinvenimento per la ghisa.

**Figura 26**

Ghisa sferoidale sottoposta a tempra superficiale.

Tempra superficiale

È un trattamento che può essere eseguito su ghise a struttura perlitica.

Il trattamento di tempra superficiale è richiesto per l'indurimento delle guide delle macchine utensili, per le quali deve essere conservata, nelle altre parti, una struttura tenace.

La tempra superficiale viene eseguita con fiamma ossiacetilenica o a induzione. Il trattamento può essere eseguito sia su ghise comuni di tipo perlitico, sia su ghise legate.

Le ghise da sottoporre a trattamenti di tempra devono avere un basso contenuto di silicio, un elemento grafitizzante che riduce notevolmente il carbonio combinato.

In **figura 26** è riportata una ghisa sferoidale temprata, con struttura martensitica (ingrandimento $\times 400$).

Ricottura di addolcimento

La ricottura di addolcimento viene eseguita per trasformare la struttura al fine di ottenere una migliore lavorabilità della ghisa alle macchine utensili.

Con la ricottura di addolcimento si tende a ottenere la decomposizione della cementite sia libera sia perlitica.

Il carbonio e il silicio, come tutti gli elementi di tipo ferritizzante, facilitano le trasformazioni della cementite.

Il manganese, il cromo, il vanadio ecc., che stabilizzano i carburi, ostacolano la trasformazione della cementite.

Le ricotture di addolcimento possono essere ad alta, media o bassa temperatura.

Addolcimento ad alta temperatura

È richiesta una ricottura ad alta temperatura quando si vuole ottenere l'addolcimento di ghise bianche o troate.

Il trattamento è eseguito alla temperatura di $900 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La durata del trattamento deve essere prolungata per tempi anche superiori a due ore.

Trattamenti ancora più lunghi possono essere tollerati, purché si faccia ricorso ad atmosfere controllate. Il raffreddamento viene generalmente eseguito in forno fino a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, successivamente, in aria. Qualora lo scopo della ricottura sia decomporre i carburi, il raffreddamento può essere fatto direttamente in aria.

Addolcimento a media temperatura

La ricottura di addolcimento a media temperatura viene eseguita alla temperatura di $800 - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

È richiesta quando nella lega si hanno carburi molto stabili a causa di un elevato contenuto di elementi stabilizzanti e a causa di una bassa percentuale di silicio.

Il trattamento può essere prolungato per tempi superiori a 10 ore.

Il raffreddamento deve avvenire lentamente, per evitare che la grafite disciolta nella austenite riformi la cementite.

Addolcimento a bassa temperatura

La ricottura di addolcimento a bassa temperatura viene eseguita a 700 °C.

La ricottura di addolcimento a bassa temperatura è richiesta quando non si hanno carburi liberi ed elementi stabilizzanti dei carburi.

I tempi sono notevolmente lunghi.

Generalmente, è richiesto il tempo di 1 ora di permanenza a temperatura per ogni 25 mm di spessore.

Ricottura di normalizzazione

La ricottura di normalizzazione è richiesta per produrre una struttura perlitica fine ed è indicata soprattutto per la ghisa sferoidale.

La ricottura di normalizzazione viene eseguita con un riscaldamento alla temperatura di 850-900 °C, per il tempo di 1 ora circa, per ogni 25 mm di spessore.

Il raffreddamento viene eseguito in aria.

Qualora si desiderasse ottenere una struttura perlitica fine con grafite globulare, il riscaldamento viene eseguito alla velocità di 50 °C/h fino a 900 °C, e il raffreddamento in forno alla velocità di 30 °C/h fino a 850 °C, prima di raffreddare all'aria.

L'attesa in forno è di circa 5 ore.

Ricottura di stabilizzazione o distensione

Il raffreddamento dei getti dopo la colata, il trattamento termico o la saldatura avviene spesso in modo non uniforme. Per questa ragione tendono a formarsi tensioni interne fra le parti più sottili e quelle più spesse del pezzo e fra la superficie e il cuore. Queste tensioni permangono anche a temperatura ambiente.

In pezzi di piccole dimensioni le tensioni sono di scarsa entità, ma in getti di forma complessa possono raggiungere intensità tali da provocare una sensibile riduzione della resistenza alle sollecitazioni esterne.

Per ridurre notevolmente le tensioni residue la temperatura deve essere elevata fino a riduzione del limite elastico della ghisa, sufficiente a determinarne uno scorrimento plastico.

La durata del trattamento deve assicurare una soddisfacente distensione dei getti.

La riduzione delle tensioni dipende anche dal tipo di lega impiegato.

In **figura 27** è dato il diagramma che evidenzia la riduzione delle tensioni interne con trattamento a differenti temperature.

Per una ghisa grigia contenente 3,5% di carbonio, 2,2% di silicio e 0,7% di manganese si ha una riduzione del 70-80% delle tensioni interne operando a 530 °C.

Il trattamento viene eseguito a temperatura inferiore a quelle a cui si verificano trasformazioni strutturali.

Le temperature consigliate sono:

- per la ghisa grigia ordinaria: 500-570 °C;
- per la ghisa grigia legata: 600-650 °C.

La permanenza a temperatura di ricottura è di 1 h per pezzi di spessore inferiore a 25-30 mm, e deve aumentare proporzionalmente agli spessori.

Il riscaldamento per la ricottura di distensione deve essere lento, allo scopo di evitare che getti di forma complessa, con forti differenze di spessore, possano rompersi.

Il raffreddamento deve essere lento; fino alla temperatura di 300 °C viene eseguito nello stesso forno.

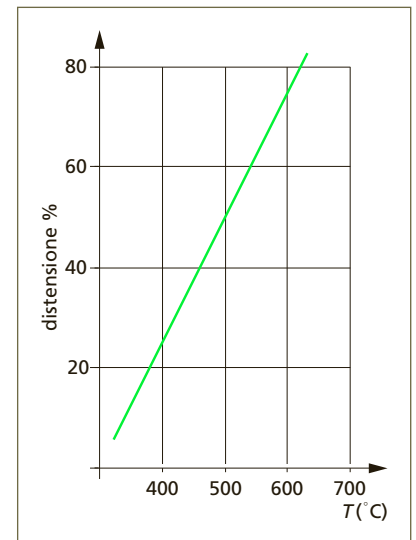


Figura 27

Riduzione delle tensioni in funzione della temperatura.

Ghise ottenute mediante trattamenti termici

Ghisa malleabile

La ghisa malleabile prende il nome da una certa plasticità a freddo, conferitale da un appropriato trattamento termico.

Le ghise malleabili sono classificabili in due tipi fondamentali, a seconda del tipo di trattamento termico:

- ghise malleabili bianche, o europee;
- ghise malleabili nere, o americane.

Il procedimento di fabbricazione per i due tipi è diverso, ma in entrambi i casi il trattamento si esegue su ghisa bianca, differenziata però nella composizione chimica:

- tenore di carbonio più basso per la ghisa malleabile bianca (2,1 ÷ 2,7%);
- tenore di carbonio più alto per la ghisa malleabile nera (2,8 ÷ 3,4%).

I getti sono molto duri e fragili, perché la ghisa è bianca.

La fragilità e la durezza del getto sono talmente elevate che non consentono nessuna lavorazione alle macchine utensili.

I getti, dopo il trattamento termico detto ricottura di malleabilizzazione, presentano una struttura ferritica, e come tali sono duttili e possono essere sottoposti a lavorazione meccanica.

Ghise malleabili bianche

Sono ghise ottenute dopo un trattamento termico di decarburazione, al termine del quale il contenuto di carbonio presente è molto basso e crescente dall'esterno verso l'interno del getto.

La matrice della lega può essere ferritica o perlitica più o meno fine.

Durante la ricottura avvengono due fenomeni:

- decarburazione;
- grafitizzazione.

La decarburazione è prevalente in getti di piccolo spessore, ma all'aumentare della sezione diventa rilevante la grafitizzazione.

L'uso di ghise malleabili bianche riguarda infatti getti di piccolo spessore, in cui la decarburazione può essere sensibile anche al cuore.

La durata media del trattamento completo di ricottura varia da 120 a 150 ore.

Il trattamento termico di ricottura si attua nelle seguenti fasi (fig. 28).

Si riscalda a circa 1.000°C in presenza di «cemento» ossidante.

Si mantiene a temperatura costante per un periodo dipendente dallo spessore e dalla composizione.

Durante questo periodo avviene la decarburazione, il cui meccanismo è il seguente:

- ad alta temperatura l'ossigeno dell'aria ossida il carbonio alla superficie del getto, trasformandolo in diossido di carbonio;
- il diossido di carbonio viene ridotto a ossido di carbonio dal carbonio che giunge in superficie dall'interno del pezzo;
- il cemento ossidante (Fe_2O_3) ritrasforma continuamente il diossido in ossido di carbonio.

Il meccanismo continua finché si raggiunge l'entità di decarburazione desiderata.

Infine, si raffredda con velocità dipendente dal tipo di struttura desiderata.

Ghise malleabili nere

Sono ghise ottenute dopo un trattamento termico di decomposizione della cementite, al termine del quale la grafite assume una struttura flocculare (fig. 29).

La matrice può essere ferritica o perlitica, a seconda che la grafitizzazione sia più o meno completa.

Il trattamento termico di decomposizione è adatto per la produzione di getti di spessore maggiore rispetto alla ghisa malleabile bianca.

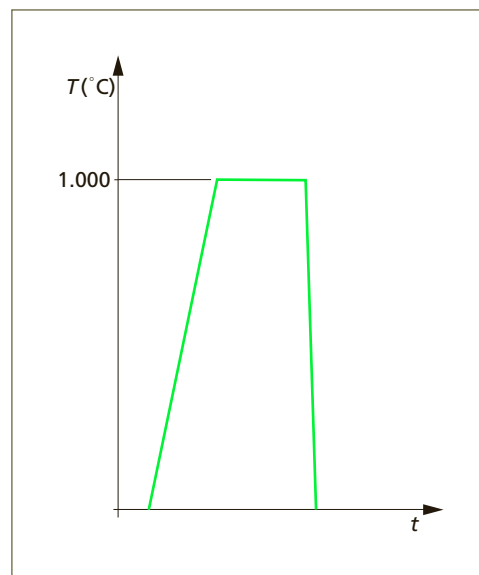


Figura 28

Ciclo termico di ricottura.

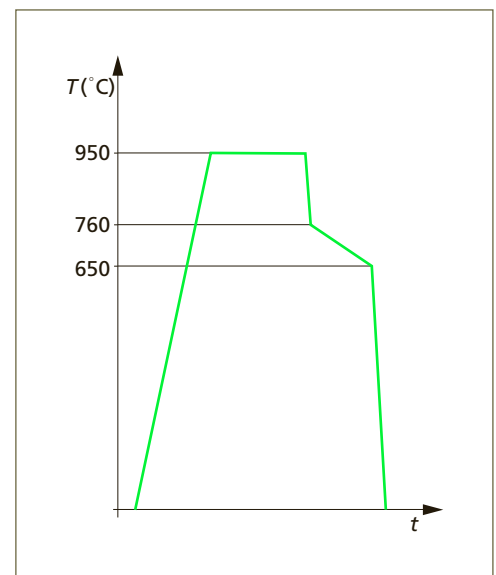


Figura 29

Ciclo termico di decomposizione della cementite.

Il trattamento si attua nelle seguenti fasi.

- Riscaldamento in atmosfera neutra a circa 950 °C. Durante questo riscaldamento si ha prima, alla temperatura eutettica, il passaggio da ferrite a perlite ad austenite; poi, a temperature più alte, l'aumento della solubilità del carbonio nel ferro γ .
- Mantenimento a temperatura costante. Durante questo periodo si passa dall'equilibrio iniziale del sistema metastabile ferro-cementite, in seguito alla lunga permanenza ad alta temperatura, al sistema stabile ferro-grafite. Se il contenuto in silicio è sufficiente, la cementite si decompone e varia anche la solubilità del carbonio. L'eccesso di carbonio precipita in forma di grafite flocculare (carbonio di ricottura).
- Raffreddamento normale fino a circa 760 °C e in seguito molto lento fino a circa 650 °C. La lentezza del raffreddamento è fondamentale per facilitare la precipitazione del carbonio in eccesso sotto forma di grafite.

Impiego delle ghise malleabili

Queste leghe vengono prodotte e utilizzate perché hanno proprietà migliori delle ghise (fluidità, colabilità) e buone caratteristiche meccaniche.

Infatti, per la realizzazione di pezzi di forma complicata e con spessori fortemente variabili non si possono utilizzare né le ghise bianche e grigie, troppo fragili e caratterizzate dalla presenza di inneschi di rottura dovuti alla struttura, né gli acciai, per la difficoltà di realizzazione e il costo dei getti.

Ghise sferoidali

La denominazione di ghisa sferoidale deriva dal fatto che la grafite, sottoposta a un apposito trattamento, non si presenta sotto forma di lamelle, bensì di sferoidi (noduli).

Nella ghisa sferoidale non si presentano le discontinuità di matrice derivanti dalla grafite lamellare, e la lega risulta più duttile e tenace.

Normalmente, la ghisa sferoidale deve essere sottoposta a trattamento termico.

Nelle ghise sferoidali si trovano, oltre agli elementi abituali di una lega, anche una piccola quantità di magnesio ($Mg < 0,08\%$) e di cerio ($Ce < 0,005\%$), introdotti per provocare il processo di sferoidizzazione della grafite.

La struttura delle ghise sferoidali può essere ferritica, perlitica, martensitica o austenitica.

La ghisa sferoidale austenitica è richiesta per la buona resistenza alla corrosione, alla ossidazione e all'usura.

In **fig. 30** sono illustrate le ghise sferoidali a struttura ferritica, ferritico-perlitica e perlitica, con le relative utilizzazioni.

La ghisa sferoidale ferritica (**fig. 30a**), rappresentata in figura, ha una elevata resistenza al calore, perciò viene impiegata per parti di costruzioni che debbano resistere ad alta temperatura.

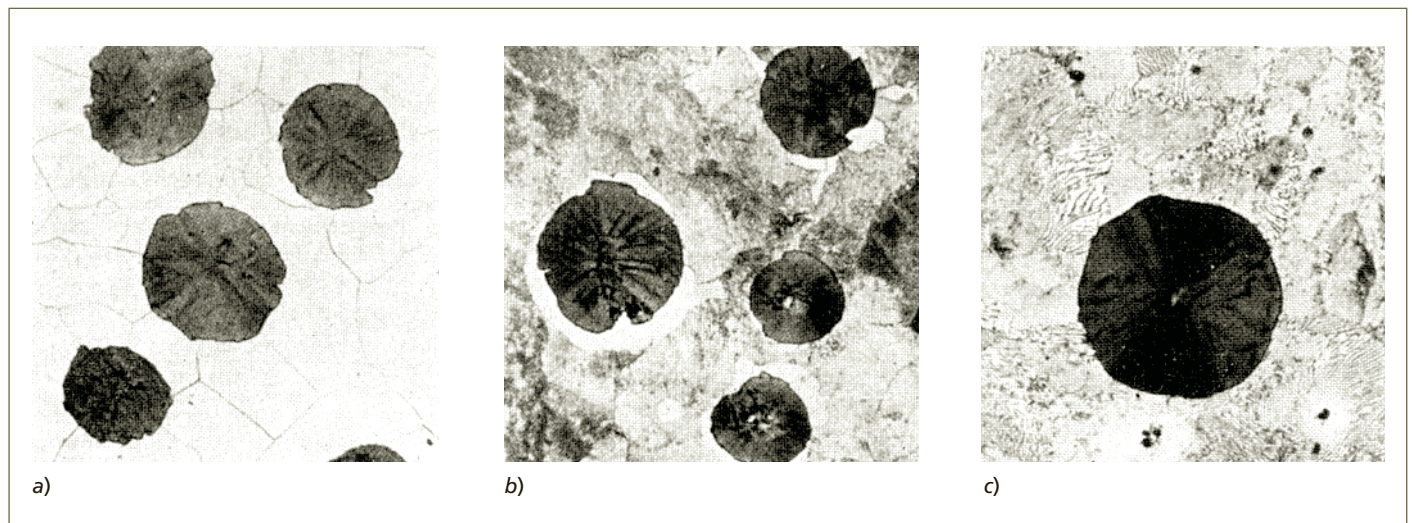
In ghisa sferoidale ferritica vengono prodotte parti di forni, cassette per ricottura e cementazione ecc.

La ghisa sferoidale ferritico-perlitica (**fig. 30b**), rappresentata in figura ($\times 400$), è un materiale di ottima qualità, utilizzato per la fabbricazione di organi di macchina, quali alberi, ruote ecc.

La ghisa sferoidale a struttura perlitica (**fig. 30c**), rappresentata in figura ($\times 400$), è impiegata per la fabbricazione di ingranaggi, stampi ecc.

Figura 30

Ghise sferoidali.



Procedimento di fabbricazione delle ghise sferoidali

La ghisa sferoidale viene ottenuta per trattamento della ghisa grigia, allo stato fuso, con magnesio e cerio, che, oltre a essere energici desolforanti, provocano l'agglomerazione della grafite nella forma di piccoli noduli. Gli elementi che ostacolano la sferoidizzazione del carbonio, e che devono essere evitati, sono il titanio, il piombo, il bismuto, antimonio, il selenio e il tellurio.

Piccole aggiunte di cerio possono annullare il loro effetto negativo.

Per la fusione si impiegano forni elettrici ad arco o a induzione. Non è consigliabile il cubilotto, anche se con rivestimento basico, perché non garantisce una regolare composizione.

Ghise sferoidali ferritiche

Le ghise sferoidali ferritiche hanno una notevole capacità di deformazione plastica.

Per ottenere la ghisa sferoidale a matrice ferritica si riscalda la lega a circa 850-920 °C e si mantiene la temperatura per un certo tempo (circa 2 ÷ 3 ore), in modo da consentire la decomposizione della cementite. Il raffreddamento fino a 800 °C avviene a una velocità di circa 100 °C/h.

In seguito si raffredda a una velocità di 20 °C/h fino a 650 °C, per impedire la formazione di perlite. Sotto i 650 °C il raffreddamento prosegue a velocità normale.

Ghise legate

Ghise Ni-hard

Le ghise Ni-Hard sono leghe di durezza elevatissima, a struttura cementitica, con contenuto molto alto di cromo e nichel. La composizione chimica delle ghise Ni-Hard è la seguente:

- | | | | | | | | |
|------------|----------|-------------|----------|---------|----------|-----------|-------|
| • carbonio | 3-3,6; | • manganese | 0,4-0,7; | • cromo | 1,4-3,5; | • fosforo | 0,45. |
| • silicio | 0,4-0,7; | • nichel | 4-4,75; | • zolfo | 0,15; | | |

La durezza Brinell è $HB = 550 \div 750$.

Le ghise Ni-Hard possono essere fuse in terra o in conchiglia.

La resistenza di quelle fuse in conchiglia è superiore alla resistenza di quelle colate in terra.

Le leghe Ni-Hard hanno vastissime applicazioni per la loro elevata resistenza agli urti e all'usura: sono impiegate nelle industrie minerarie, cementifere, per costruire sfere per frantoi e corpi di pompa per liquidi con sospensioni abrasive, trasportatori a coclea, mescolatori per la preparazione di calcestruzzo ecc.

In **figura 31** è rappresentata una lega Ni-Hard.

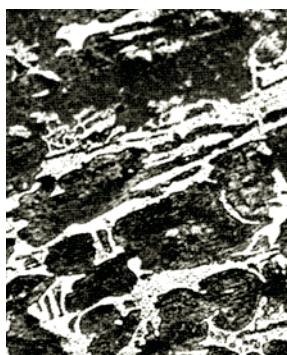


Figura 31

Lega Ni-Hard.

Ghise resistenti alla corrosione

Sono ghise resistenti alla corrosione quelle di tipo legato ad alto contenuto di silicio.

Ghise contenenti il 14-17% di silicio hanno una elevata resistenza agli acidi anche di tipo forte, a eccezione dell'acido fluoridrico e dell'acido cloridrico.

Queste ghise però hanno l'inconveniente di essere molto fragili e di avere un carico di rottura molto basso ($90 \div 130 \text{ N/mm}^2$) a causa di una grafite grossolana di tipo lamellare.

Altri elementi che favoriscono la resistenza alla corrosione sono il cromo, il nichel e il rame.

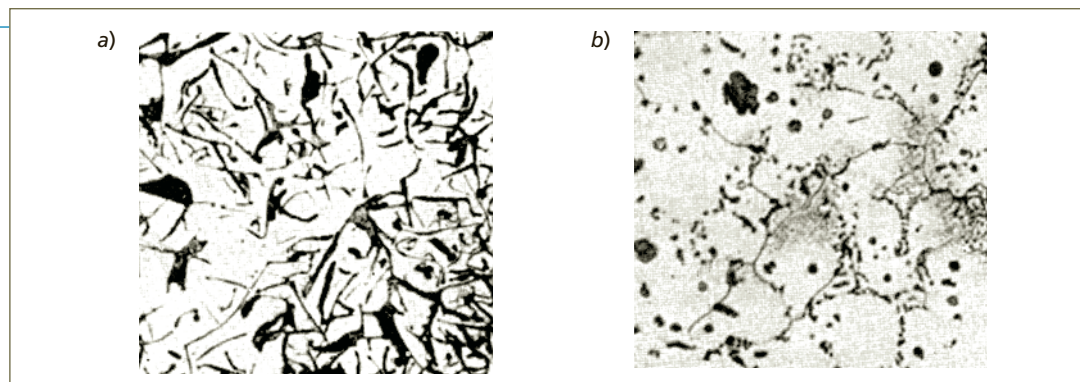
In **figura 32a** è rappresentata una ghisa ad alto contenuto di silicio.

Un miglioramento delle caratteristiche meccaniche può essere ottenuto con la globulizzazione della grafite mediante aggiunta di elementi particolari quali il cerio.

In **figura 32b** è rappresentato lo stesso materiale dopo che la grafite ha subito la trasformazione da lamellare a sferoidale.

Figura 32

Ghise resistenti alla corrosione.



Analisi chimica di alcuni tipi di ghise legate resistenti alla corrosione (tab. 3)

Le ghise al silicio hanno basse caratteristiche meccaniche ($R = 90 \div 130 \text{ N/mm}^2$), in particolare la resilienza; sono poco colabili e difficilmente lavorabili alle macchine utensili.

Le ghise al cromo hanno caratteristiche meccaniche migliori ($R = 200 \div 800 \text{ N/mm}^2$), buona resistenza agli urti e allo stato ricotto sono lavorabili alle macchine utensili.

Le ghise al nichel, pur avendo basse caratteristiche meccaniche ($R = 200 \div 300 \text{ N/mm}^2$), sono molto tenaci e facilmente colabili e lavorabili alle macchine utensili.

Tabella 3

Analisi chimica di alcune ghise resistenti alla corrosione.

Elementi	Ghise al silicio	Ghise al cromo	Ghise al nichel
Carbonio	0,4 ÷ 1	2 ÷ 4	2 ÷ 3
Silicio	14 ÷ 17	0,5 ÷ 3	1 ÷ 1,75
Manganese	0,4 ÷ 1	0,3 ÷ 1,5	0,4 ÷ 1,5
Nichel	—	5 max	14 ÷ 32
Cromo	—	12 ÷ 35	1,75 ÷ 5,5
Rame	—	3 max	7 max
Molibdeno	3,5 max	4 max	1 max

Ghise austenitiche Ni-Resistent

Le ghise Ni-Resistent sono leghe altamente legate, contenenti grafite allo stato lamellare o sferoidale, con struttura austenitica.

Le ghise Ni-Resistent hanno elevata resistenza a trazione e ottima resistenza alla erosione, alla corrosione e agli effetti dell'alta temperatura.

Le caratteristiche meccaniche delle ghise Ni-Resistent sono le seguenti:

- carico di rottura $R = 170 \div 240 \text{ N/mm}^2$;
- durezza Brinell HB = 130 ÷ 210.

La composizione delle ghise Ni-Resistent è la seguente:

- carbonio 3,00;
- silicio 1-2,8;
- manganese 1-1,5;
- nichel 13,50-36;
- rame 5,50-7,50;
- cromo 1,75-5,50.

Le leghe Ni-Resistent vengono impiegate per la costruzione di:

- corpi di pompa per liquidi contenenti acidi organici;
- valvole di condutture per liquidi corrosivi, per esempio nella fabbricazione della carta;
- cilindri essiccatori per l'industria cartaria;
- parti di colonna per la distillazione frazionata della benzina ecc.

Ghise resistenti ad alta temperatura

Le ghise comuni si ossidano e si disgregano a seguito di prolungato riscaldamento a contatto dell'ossigeno.

Le variazioni di temperatura, che causano dilatazione e contrazione della lega, contribuiscono a rendere meno resistente il materiale.

Tuttavia, con quantità elevate di elementi quali il cromo, il nichel, il molibdeno, l'alluminio e il silicio le prestazioni ad alta temperatura migliorano sensibilmente.

Le ghise sferoidali a matrice ferritica già esaminate in precedenza hanno comunque buone prestazioni.

Analisi chimica di alcuni tipi di ghise resistenti al calore (tab. 4)

Le ghise lamellari al silicio hanno $R = 170 \div 320 \text{ N/mm}^2$, bassa resistenza ai salti termici e possibilità di essere impiegate fino a 900°C (dato che fino a questa temperatura non subiscono cambiamenti di struttura).

Le ghise lamellari al cromo ($R = 300 \div 650 \text{ N/mm}^2$) hanno ottima resistenza ai salti termici e possibilità di impiego fino a 1.100°C .

Le ghise sferoidali al nichel ($R = 300 \div 650 \text{ N/mm}^2$) hanno basso coefficiente di dilatazione e temperatura di esercizio di circa 700°C .

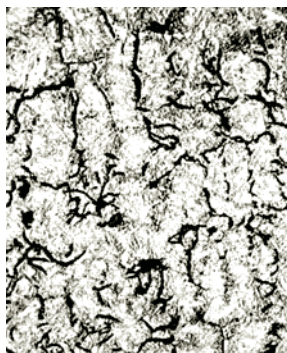
Tabella 4

Analisi chimica di alcune ghise resistenti al calore.

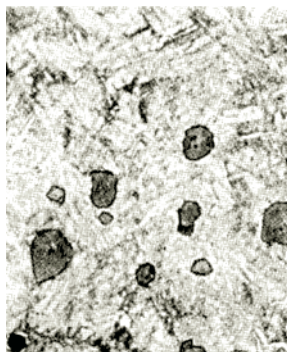
Elementi	Grafite lamellare		Grafite sferoidale
	Ghisa al silicio	Ghisa al cromo	Ghisa al 20% nichel
Carbonio	$2 \div 2,5$	2,3	2,9 max
Silicio	$4 \div 6$	$0,5 \div 2,5$	$1,75 \div 3,2$
Manganese	$0,4 \div 0,8$	$0,3 \div 1,5$	$0,8 \div 1,5$
Nichel	—	5 max	$18 \div 22$
Cromo	—	15-35	$1,75 \div 2,5$

8.7 Ghise per utilizzazioni particolari

Ghise aciculari

**Figura 33**

Ghisa lamellare con matrice bainitica.

**Figura 34**

Ghisa sferoidale con struttura aciculare.

Le ghise aciculari sono ghise grigie a grafite nodulare.

Il loro nome deriva dalla forma aciculare, cioè sviluppata in una direzione così da assumere forma di aghi, secondo cui si presenta la bainite.

Per ottenere ghise a strutture aciculari occorre effettuare un trattamento termico, dopo la colata, per trasformare l'utensile in bainite. È necessario un raffreddamento veloce, con elementi leganti che ostacolano la formazione della perlite.

La trasformazione della austenite in bainite è favorita da particolari elementi leganti quali il nichel, il cromo e il molibdeno.

Le ghise aciculari hanno un contenuto di carbonio pari a $2,5 \div 3,5\%$.

Il nichel è contenuto in percentuale tanto più alta quanto maggiore è lo spessore del pezzo, normalmente in percentuali fra l'1 e il 3,5%.

Il molibdeno è contenuto in percentuali variabili da 0,8 a 1,2%.

Con composizioni opportunamente scelte è possibile ottenere la formazione di perlite con raffreddamento del getto in terra.

La trasformazione in struttura aciculare può essere ottenuta con raffreddamento all'aria.

In **figura 33** è rappresentata una ghisa lamellare con matrice bainitica.

In **figura 34** è rappresentata una ghisa sferoidale con struttura aciculare (a 400 ingrandimenti).

Trattamento termico delle ghise aciculari

Per produrre ghise aciculari si riscalda la lega a una temperatura superiore a A_{c1} .

Successivamente, la si raffredda fino a una temperatura leggermente inferiore a quella per ottenere la formazione della perlite, ma superiore a quella richiesta per la formazione della martensite.

È necessario mantenere i pezzi alla temperatura di raffreddamento per il tempo necessario a ottenere la parziale trasformazione della austenite.

Successivamente viene effettuato il raffreddamento finale dei getti all'aria.

Le strutture ottenute con questo trattamento possono raggiungere il carico di rottura $R = 500 \text{ N/mm}^2$.

La struttura è a piccoli aghi, la cui forma dipende dalla composizione della ghisa e dalle condizioni di raffreddamento.

Caratteristiche e applicazioni delle ghise aciculari

Le caratteristiche più importanti delle ghise a struttura aciculare sono:

- alta resistenza a trazione;
- buona resistenza all'usura;
- elevata resistenza agli urti.

La ghisa aciculare è impiegata per la costruzione di alberi a gomito per motori Diesel e per compressori, inoltre per la costruzione di stampi, di fasce elastiche, di parti di laminatoio ecc.

Ghisa sintetica

La ghisa sintetica è ottenuta per carburazione dell'acciaio.

Le caratteristiche meccaniche e tecnologiche di queste leghe sono notevolmente superiori a quelle di ghise di analoga composizione fuse con i metodi tradizionali.

Le materie prime per la produzione delle ghise sintetiche sono le seguenti:

- acciaio, nella forma di boccame, sfridi di lamiera e rottame;
- ferro-leghe;
- rame;
- materiali carburanti (polverino di coke, rottami di elettrodi, grafite).

Sono utilizzabili anche trucioli di acciaio e di ghisa recuperati dalle lavorazioni alle macchine utensili. Le ghise sintetiche presentano una struttura perlitica compatta e regolare. In **figura 35** è rappresentata una ghisa sintetica a grafite lamellare di tipo A, con struttura perlitica.

Ghisa meehanitica

È una lega ad alta resistenza meccanica.

La distribuzione e la forma della grafite sono tali da conferire alla struttura tenacità e resistenza superiori a quelle di una ghisa di tipo normale.

La ghisa meehanitica è di tipo perlitico, con grafite che presenta un aspetto tondeggiante di piccole dimensioni il carico di rottura è $R = 300 \div 400 \text{ N/mm}^2$.

Per ottenere la ghisa meehanitica viene introdotto in siviera o nel canale di colata un quantitativo di siliciuro di calcio Ca_2Si pari a 0,1-0,2%.

Caratteristiche del siliciuro di calcio

Il siliciuro di calcio è il composto intermetallico delle leghe costituito da calcio-silicio, ed è:

$$\text{Ca} = 60\%; \text{Si} = 30\%; \text{C} = 1\%; \text{CaSiO}_3 = 1\%; \text{Fe} = 8.$$

Come impurezza può contenere anche alluminio.

Il siliciuro di calcio è un energico riducente, perché ha una notevole affinità per l'ossigeno. Formando ossido di silicio elimina l'ossigeno legato al ferro e riduce l'ossido di carbonio, attenuando lo sviluppo di gas e i pericoli delle soffiature.

Il siliciuro di calcio reagisce sviluppando calore; in questo modo contribuisce a mantenere alta la temperatura della lega fusa e impedisce l'ingrossamento delle lamelle di grafite e la formazione di soffiature.

Il siliciuro di calcio ha un'elevata capacità di formare centri di cristallizzazione e determina una dispersione regolare e minuta della grafite lamellare.

Per la presenza di calcio nella lega fusa si riduce notevolmente il contenuto di zolfo e fosforo, che vengono eliminati con la scoria.

Impieghi delle ghise meehanitiche

La ghisa meehanitica è di tipo perlitico, con grafite lamellare a lamelle molto fini, uniformemente distribuite; presenta una elevata resistenza alla pressione e agli acidi e consente di produrre getti complessi senza rischio di rotture.

In **figura 36** è rappresentata una ghisa meehanitica.

Ghise grigie contenenti rame

Il rame è un elemento che anche in percentuali molto basse produce notevoli e apprezzabili modifiche strutturali.

La durezza che la lega raggiunge con un trattamento di tempra è $\text{HB} = 550 \text{ daN/mm}^2$.

I miglioramenti che il rame apporta alla struttura sono i seguenti:

- resistenza meccanica più alta;
- distribuzione più regolare della grafite;
- uniformità delle caratteristiche in ogni parte del getto;
- ottima lavorabilità alle macchine utensili;
- diminuzione della sensibilità alle variazioni di spessore;
- formazione di strutture perlitiche che possono poi essere sottoposte a indurimento superficiale.

Il rame viene introdotto direttamente in siviera sotto forma di graniglia.

Per ottenere gli effetti desiderati è necessario disporre di rame puro, senza elementi nocivi quali il piombo e l'alluminio, che ne possono compromettere la funzione.

Impurità quale piombo, bismuto, arsenico, antimonio e zinco alterano sensibilmente la forma e la dimensione della grafite presente nella lega.

È necessaria una aggiunta di rame non superiore al 3,5%, perché un quantitativo superiore non sarebbe solubile nella lega.

Il rame contribuisce a conferire durezza elevata alla lega.

Impieghi delle ghise al rame

Le leghe contenenti rame vengono impiegate per la costruzione di parti di macchine utensili, camicie di cilindri per motocicli e per auto, tamburi per freni, alberi a gomito, fasce elastiche ecc.

In **figura 37** è rappresentata una ghisa al rame, con struttura perlitica e grafite lamellare.



Figura 35

Ghisa sintetica a grafite lamellare tipo A con struttura perlitica.



Figura 36

Ghisa meehanitica.

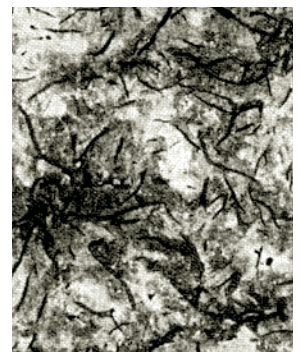


Figura 37

Ghisa al rame.