



Il rame e le sue leghe

Marco V. Boniardi
Andrea Casaroli

RAME

PROPRIETÀ GENERALI

Il **RAME** puro (cioè con un contenuto minimo di rame pari al 99,9%) è un metallo rossastro con una struttura cristallina cubica a facce centrate. La sua densità e la sua temperatura di fusione sono pari a 8920 kg/m^3 e 1083°C . Le principali proprietà del rame puro sono:

- **elevata conducibilità elettrica e termica**, inferiore solo a quella dell'oro e dell'argento.
- **Elevato grado di deformabilità**. Il rame puro può essere facilmente ridotto in lamine sottili (malleabilità) o in fili sottili (duttilità) tramite processi di deformazione plastica.
- **Bassa colabilità e fluidità**, che rendono inadatto il rame puro alla produzione di getti fusi.
- **Elevata resistenza a numerosi ambienti corrosivi**. Il rame, infatti, resiste:
 - ottimamente alla corrosione atmosferica di ogni tipo (comprese le atmosfere marine e quelle industriali);
 - bene al contatto con le acque naturali, con molte soluzioni acquose saline e alcaline, eccettuate quelle ammoniacali, mentre il comportamento alle soluzioni acquose acide dipende dall'assenza di ossidanti.
- **Facilità a formare leghe** con una grande quantità di metalli in proporzioni molto ampie. Per aggiunte di elementi di lega:
 - inferiori al 5%, si parla di leghe di rame basso-legate;
 - superiori al 5%, si parla di leghe di rame alto-legate.

PROPRIETÀ MECCANICHE

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche, il rame puro *allo stato ricotto* presenta:

- carico di rottura (R): **$180 \div 220 \text{ MPa}$** ;
- carico di snervamento ($R_{p0,2}$): **$80 \div 120 \text{ MPa}$** ;
- rapporto tra carico di snervamento e carico di rottura ($R_{p0,2}/R$): **0,5** (contro 0,6-0,65 degli acciai comuni);
- durezza: **$35 \div 45 \text{ HB}$** ;
- modulo elastico (E): **120.000 MPa** ;
- allungamento percentuale a rottura (A%): **maggiore del 40%**.

La resistenza meccanica del rame puro può essere notevolmente migliorata per incrudimento, attraverso cui è possibile raddoppiare il carico di rottura e quadruplicare il carico di snervamento (figura 1).

TRATTAMENTI TERMICI

L'unico trattamento termico al quale può essere sottoposto il rame puro è la **ricottura** che viene eseguita allo scopo di:

- eliminare le tensioni indotte dalle lavorazioni meccaniche;
- rigenerare la struttura cristallina incrudita dalle lavorazioni plastiche a freddo;

La ricottura viene effettuata alla temperatura di 550°C per il tempo minimo necessario a consentire la ricristallizzazione, variabile in funzione del grado di incrudimento e delle dimensioni del componente. Il raffreddamento può avvenire sia in aria che in acqua. Se è necessario preservare la brillantezza del rame, il trattamento termico deve essere svolto in atmosfera controllata tramite l'utilizzo di gas inerti (es. azoto).

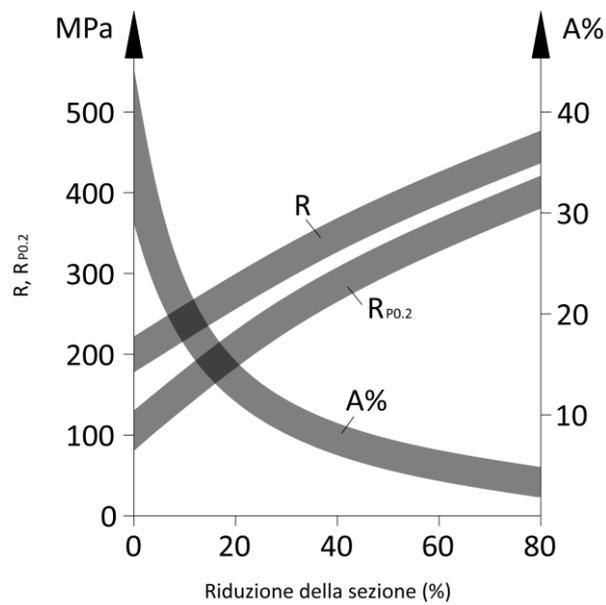


Figura 1: Andamento del carico di rottura (R), del carico di snervamento ($R_{P0.2}$) e dell'allungamento percentuale a rottura ($A\%$) in funzione del grado di incrudimento per il rame puro (adattato da E. Gianotti, Rame e sue leghe, Classificazioni e trattamenti termici).

Dal punto di vista industriale esistono tre tipi di rame puro:

- **rame contenente ossigeno;**
- **rame disossidato con residuo di fosforo;**
- **rame a bassissimo contenuto di ossigeno, ottenuto senza l'utilizzo di disossidanti.**

La ragione di tale distinzione sta nelle conseguenze che la presenza di ossigeno ha sulle proprietà del rame.

- Il rame contenente ossigeno (presente sotto forma di ossidulo Cu_2O) diviene fragile se riscaldato sopra i 500°C in ambiente ricchi di idrogeno, a causa delle reazioni di quest'ultimo con il Cu_2O . Tale caratteristica rende il rame contenente ossigeno inutilizzabile per le applicazioni in cui sia necessario prevedere l'esecuzione di saldature o saldobrasature (come i tubi gas). Durante il raffreddamento dallo stato liquido, l'ossidulo si dispone al bordo dei grani del cordone di saldatura e si combina con l'idrogeno formando vapore d'acqua, il quale genera rigonfiamenti a bordo grano e provoca il decadimento delle proprietà meccaniche. Per contro la presenza di ossigeno in tenori moderati ($\text{O}_2 < 0.04\%$) comporta un notevole miglioramento della conducibilità elettrica favorita dalla formazione di ossidi insolubili da parte delle impurezze solubili nel metallo. Tale tipo di rame è quindi utilizzato per la produzione dei normali cavi elettrici per il trasporto dell'energia elettrica (Cu - ETP).
- Il rame disossidato viene ottenuto per mezzo di aggiunte al bagno fuso di fosforo il quale, avendo una affinità per l' O_2 superiore a quella del rame, si combina ad esso formando scoria che viene eliminata. La disossidazione, per essere efficace, deve essere eseguita con leggero eccesso di fosforo, che al termine della fusione, sarà contenuto in soluzione solida. La presenza di fosforo comporta un notevole abbassamento della conducibilità elettrica e pregiudica, se il tenore eccede lo 0.012% , le applicazioni elettriche. L'assenza di ossigeno, però, evita i rischi di fragilità in ambienti contenenti idrogeno e permette l'esecuzione delle saldature. Tale tipo di rame è quindi abitualmente utilizzato per la produzione di tubi, barre o lamiere che richiedano una giunzione meccanica tramite saldatura. Un esempio è costituito dai tubi per il trasporto del gas (Cu - DHP).

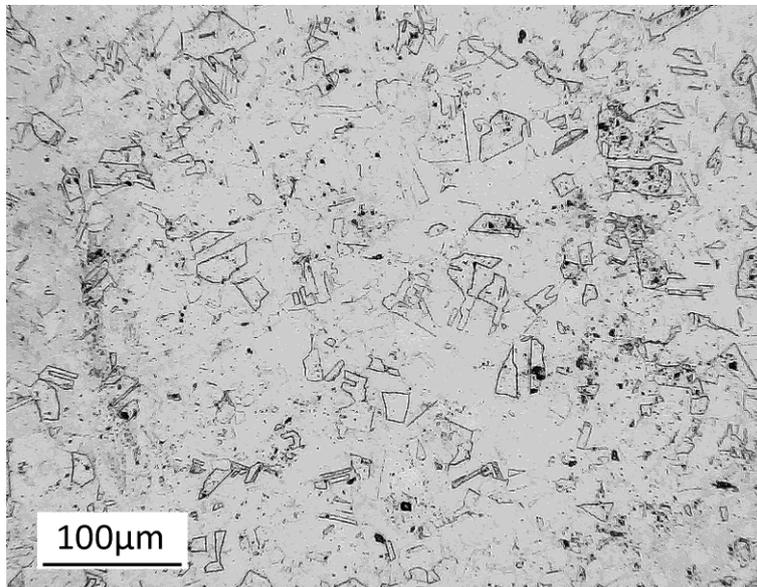


Figura 2: Microstruttura di rame puro Cu-DHP, cioè disossidato con residuo di fosforo (fonte: Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

- Il rame privo di ossigeno (rifuso sotto vuoto), contiene un tenore di impurezze molto basso e presenta un'ottima conducibilità elettrica; dato il costo elevato viene riservato a impieghi pregiati o in cui sia necessaria una conducibilità elettrica molto elevata.

Le principali applicazioni industriali del rame puro sono:

- **60% - materiale elettrico** (cavi, interruttori, spire di bobine, ecc.);
- **20% - settore edile** (canale, pluviali, tubi e raccordi per impianti idraulici);
- **20% - componenti di macchinari industriali** (alette di scambiatori di calore, tubi e raccordi per il trasporto di fluidi sia liquidi che gassosi).

Il rame puro ha un **prezzo pari a circa 7-8 volte quello di un normale acciaio al carbonio.**

RAME CONTENETE OSSIGENO ($O_2 < 0.04\%$)

- **Cu - ETP** (Electrolytic Tough Pitch): rame raffinato elettroliticamente. Il titolo minimo di rame più argento è pari al 99.90%, non è disossidato ed è adatto per usi elettrici.
- **Cu - FRHC** (Fire Refined High Conductivity): rame raffinato a fuoco. Il titolo minimo di rame più argento è pari al 99.90%, non è disossidato ed è adatto per usi elettrici.
- **Cu - FRTP** (Fire Refined Tough Pitch): rame raffinato a fuoco. Il titolo minimo di rame più argento è pari al 99.80%, non è disossidato, è adatto per usi meccanici che non debbano subire saldature e inadatto per usi elettrici.

RAME DISOSSIDATO

- **Cu - DLP** (Deoxidized Low Phosphorus): rame disossidato a basso tenore di fosforo ($P = 0.005\% \div 0.012\%$). Il titolo minimo di rame più argento è pari al 99.90%, è adatto per usi meccanici anche quando debba subire saldature e inadatto per usi elettrici.
- **Cu - DHP** (Deoxidized High Phosphorus): rame disossidato ad alto tenore di fosforo ($P = 0.015\% \div 0.04\%$). Il titolo minimo di rame più argento è pari al 99.90%, è adatto per usi meccanici anche quando debba subire saldature e inadatto per usi elettrici.

RAME PRIVO DI OSSIGENO

- **Cu - OF** (Oxygen Free): rame esente da ossigeno perché colato sottovuoto o

APPLICAZIONI
INDUSTRIALI

PREZZO

DESIGNAZIONE

in gas inerte. Il titolo minimo di rame più argento è pari al 99.95% è adatto per usi elettrici anche quando debba essere saldato o debba lavorare a temperature alte in ambiente contenente idrogeno.

Dal punto di vista commerciale, più che il rame puro vengono utilizzate le sue leghe. Le principali sono:

- rame-stagno (**bronzo**);
- rame-alluminio (**cupralluminio**, impropriamente detto bronzo all'alluminio);
- rame-zinco (**ottone**).

BRONZO

PROPRIETÀ GENERALI

Il **BRONZO** è una lega composta da rame e stagno, che formano tra loro una soluzione solida di tipo sostituzionale. L'aggiunta dello stagno al rame ne eleva nettamente la durezza e la resistenza meccanica, abbassandone però la malleabilità e la duttilità.

Per contenuti di stagno compresi fra l'8% e il 20%, tipici dei bronzi maggiormente utilizzati, la densità è pari a circa $8500 \div 8000 \text{ kg/m}^3$ mentre la temperatura di fusione è compresa fra 980°C e 830°C circa.

La colorazione varia a seconda della percentuale di stagno: il bronzo appare rosso dorato in forte presenza di rame, colore che sbiadisce verso pallidi gialli argentati all'aumentare delle percentuali del metallo in alligazione.

Le sue proprietà sono:

- **buona malleabilità e duttilità;**
- **elevata fusibilità, colabilità e saldabilità;**
- **buona resistenza in numerosi ambienti corrosivi.** I bronzi, infatti, resistono:
 - ottimamente alla corrosione atmosferica di ogni tipo (comprese le atmosfere marine e quelle industriali) anche ad elevata temperatura;
 - ottimamente al contatto con liquidi corrosivi come soluzioni acide, soluzioni saline, petrolio;
 - abbastanza bene in ambienti basici (comunque meglio del cupralluminio e dell'ottone).

PROPRIETÀ MECCANICHE

L'influenza dello stagno sulle proprietà meccaniche del bronzo, allo stato ricotto (e raffreddato lentamente), è indicata in figura 3.

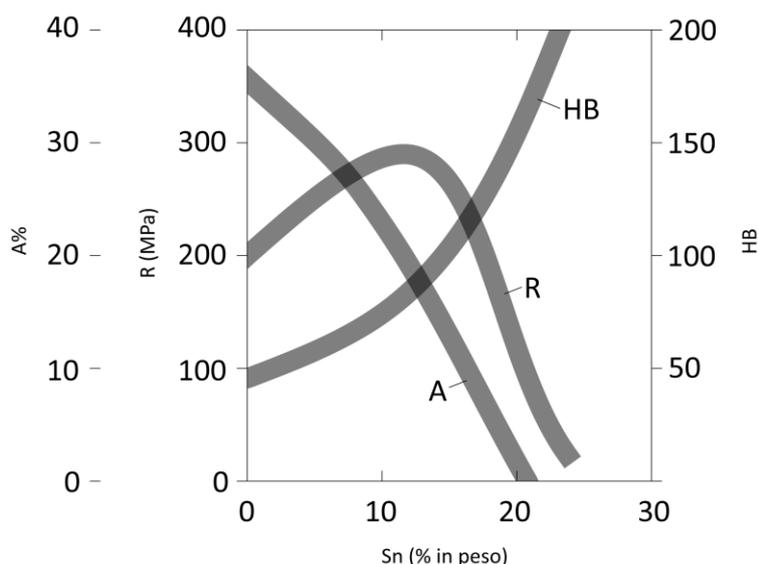


Figura 3: Andamento del carico di rottura (R), della durezza Brinell e dell'allungamento percentuale a rottura (A%) del bronzo, in funzione della percentuale di stagno in lega - stato ricotto e raffreddato lentamente (adattato da E. Gianotti, Rame e sue leghe, Classificazioni e trattamenti termici).

Caratteristico è l'andamento del carico di rottura a trazione (R) e della durezza (HB). Il primo raggiunge un massimo in corrispondenza del 15% di stagno, per poi decadere rapidamente, mentre la seconda è sempre crescente.

Per riuscire a comprendere questo fenomeno è necessario fare riferimento al diagramma di stato Cu-Sn, (figura 4) di cui si prende in considerazione la porzione con tenori di stagno fino al 30%. Dall'osservazione del diagramma di stato Cu-Sn si nota che per tenori di stagno:

- inferiori al 13.9% è presente solo la soluzione solida α che presenta ottima deformabilità a freddo. La fase α aumenta la sua durezza e diminuisce la propria deformabilità all'aumentare del contenuto di stagno (es. Sn = 4% HB = 60; Sn = 6% HB = 65; Sn = 10% HB = 85);
- superiori al 13.9% compare la soluzione solida β , mentre con tenori maggiori del 26% si origina una terza fase γ che in corrispondenza di 520°C si trasforma nel composto Cu_4Sn , durissimo e fragile, chiamato fase δ .

È ora facile capire come in caso di condizioni di raffreddamento lente, che permettano di rispettare le condizioni di equilibrio tipiche dei diagrammi di stato, il decadimento repentino del carico di rottura (**R**) e dell'allungamento percentuale a rottura (**A%**) sia da attribuire alla formazione della fase δ .

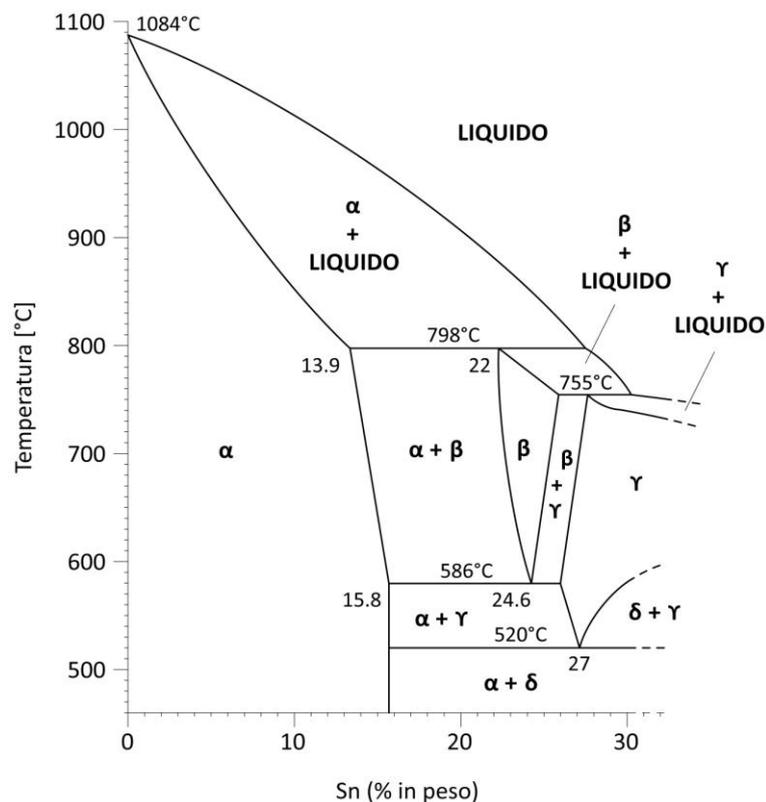


Figura 4: Diagramma di stato Cu - Sn (porzione di interesse per i bronzi).

TIPOLOGIE UTILIZZATE INDUSTRIALMENTE

Per quanto sopra indicato **a livello industriale si distinguono due categorie principali di bronzo**, distinte in funzione della percentuale di stagno:

- **bronzi con una percentuale di stagno inferiore al 13.9%**: sono costituiti dalla sola fase α e presentano buone caratteristiche meccaniche, pur conservando buona lavorabilità e deformabilità:
 - carico di rottura (**R**): **250 ÷ 300 MPa**;
 - carico di snervamento (**R_{p0.2}**): **80 ÷ 120 MPa**;
 - durezza: **60HB ÷ 90 HB**;
 - modulo elastico (**E**): **120.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A%**): **10% ÷ 20%**.

Questo tipo di bronzi sono da deformazione plastica a freddo e sono utilizzati per la produzione di laminati, estrusi, forgiati, stampati e trafilati; generalmente il loro contenuto di stagno non supera il 10%.

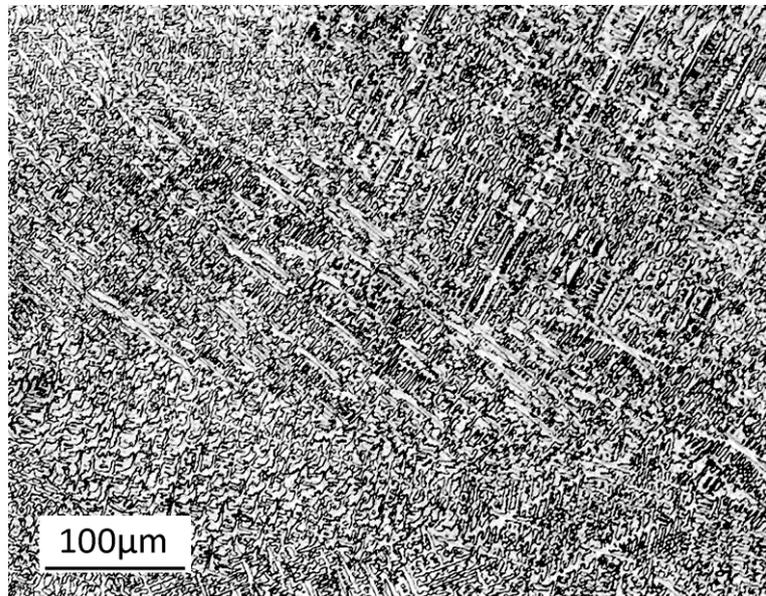


Figura 5: Microstruttura di un bronzo al 9% di stagno greggio di colata (fonte: Laboratori The Miller Company - <http://www.copper.org/>).

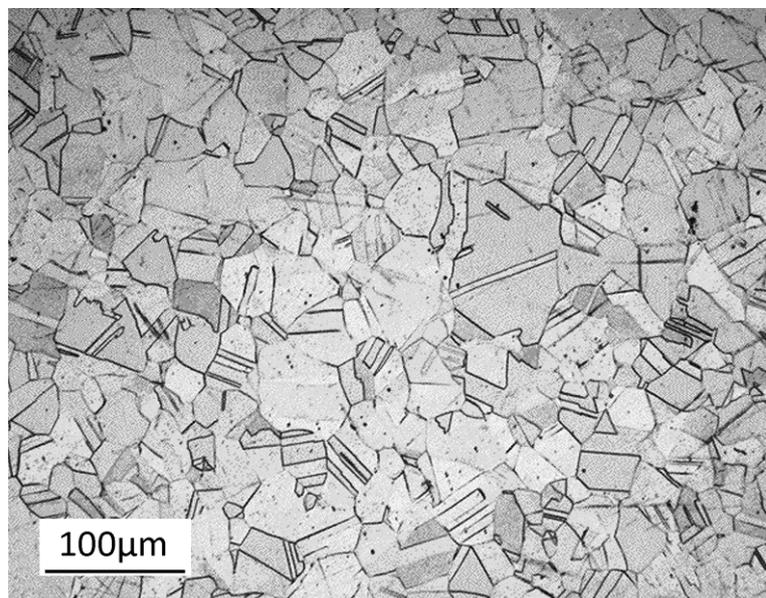


Figura 6: Microstruttura di un bronzo al 9% di stagno sottoposto a ricottura di omogeneizzazione (fonte: Laboratori University of Florida - <http://www.copper.org/>).

- **Bronzi con una percentuale di stagno superiore al 13.9%** (e comunque raramente maggiore al 15%): che presentano elevata durezza e scarse proprietà meccaniche:
 - carico di rottura (**R**): **circa 150 MPa**;
 - **non presentano lo snervamento** perché hanno comportamento fragile;
 - durezza: **150 ÷ 200 HB**;
 - modulo elastico (**E**): **95.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A%**): **inferiore al 3%**.

Le proprietà meccaniche possono essere migliorate tramite riscaldamento sopra i 587°C, in modo da trasformare tutta la fase δ in β , e rapido raffreddamento in acqua, che consente di mantenere la fase β anche a temperatura ambiente.

Questo tipo di bronzi sono per lo più utilizzati in fonderia, grazie alle buone doti di colabilità e fluidità che permettono alla lega liquida di occupare interamente lo stampo, anche nelle zone più sottili. Il principale problema è costituito dall'ampio intervallo di solidificazione che favorisce i fenomeni di segregazione e porosità da ritiro. Oltre al rame e allo stagno questa tipologia di bronzi può contenere in lega anche altri elementi, quali:

- nichel: restringe l'intervallo di solidificazione, permettendo di limitare i

problemi di segregazione e di porosità da ritiro;

- zinco: aumenta la fluidità e diminuisce la presenza di soffiature. L'aggiunta di zinco consente di inibire la formazione della fase δ rendendo la lega deformabile a freddo e abbassandone la durezza e la resistenza all'usura;
- piombo: elemento insolubile sia nel rame che nello stagno, viene aggiunto in tenori elevati (10% ÷ 20%) per la fabbricazione di cuscinetti a bassa velocità di rotazione ed elevato valore di carico, in tenori bassi (< 2%) per migliorare la lavorabilità alle macchine utensili;
- ferro: aumenta la resistenza meccanica abbassando la deformabilità;
- manganese: aumenta la resistenza meccanica e la deformabilità;
- fosforo: per valori contenuti 0.2% ÷ 0.3% ha una azione indurente senza pregiudicare le proprietà meccaniche.

Bronzi con Sn < 13.9%

Sono sottoposti alla sola ricottura che può essere di:

- omogeneizzazione, nel caso dei getti fusi. Le velocità di raffreddamento, adottate nella pratica industriale causano l'insorgere del problema della segregazione. Già per leghe con tenore di stagno del 5%, l'intervallo di solidificazione è così ampio da provocare la formazione di dendriti talmente ricche, di rame al centro e di stagno nelle ultime zone soggette a solidificazione, da provocare in queste ultime la formazione di fase δ . La ricottura di omogeneizzazione ha lo scopo di rendere uniforme la struttura cristallina permettendo di ottenere solo fase α (come indicato dal diagramma di stato Cu-Sn) e prevede il riscaldamento a temperature comprese fra 500°C e 700°C, il mantenimento in temperatura per circa 20h ed un raffreddamento in aria. Nel caso di leghe contenenti tenori di stagno vicini al 13% è necessario che il raffreddamento sia eseguito in acqua al fine di evitare la trasformazione della fase α in δ .
- Ricristallizzazione, nel caso dei semilavorati ottenuti per deformazione plastica. In questo caso riscaldamenti:
 - a bassa temperatura (250°C ÷ 300°C) sono utilizzati per indurre il fenomeno del "recovery", eliminando le tensioni generate dalla deformazione plastica a freddo senza provocare il decadimento della durezza e del carico di rottura;
 - a alta temperatura (500°C ÷ 700°C) sono utilizzati per provocare la ricristallizzazione della matrice metallica, ottenendo l'abbassamento della durezza e della resistenza meccanica e ripristinando la possibilità di ulteriori deformazioni plastiche a freddo.

Il tempo di mantenimento è più breve rispetto alla ricottura di omogeneizzazione, mentre le modalità di raffreddamento sono le stesse.

Bronzi con Sn > 13.9%

Sono sottoposti alla sola ricottura di omogeneizzazione seguita da rapido raffreddamento in acqua. Per i bronzi con contenuto di stagno superiore al 13.9%, le velocità di raffreddamento adottate nella pratica industriale causano la formazione della fase δ , che essendo dura e fragile, provoca il decadimento delle proprietà meccaniche. L'applicazione della ricottura di omogeneizzazione, alla temperatura di 600°C, permette di limitare la segregazione e di ottenere la trasformazione della fase δ in fase β , meno dura e fragile, mentre il raffreddamento rapido in acqua consente di fissare la fase β a temperatura ambiente.

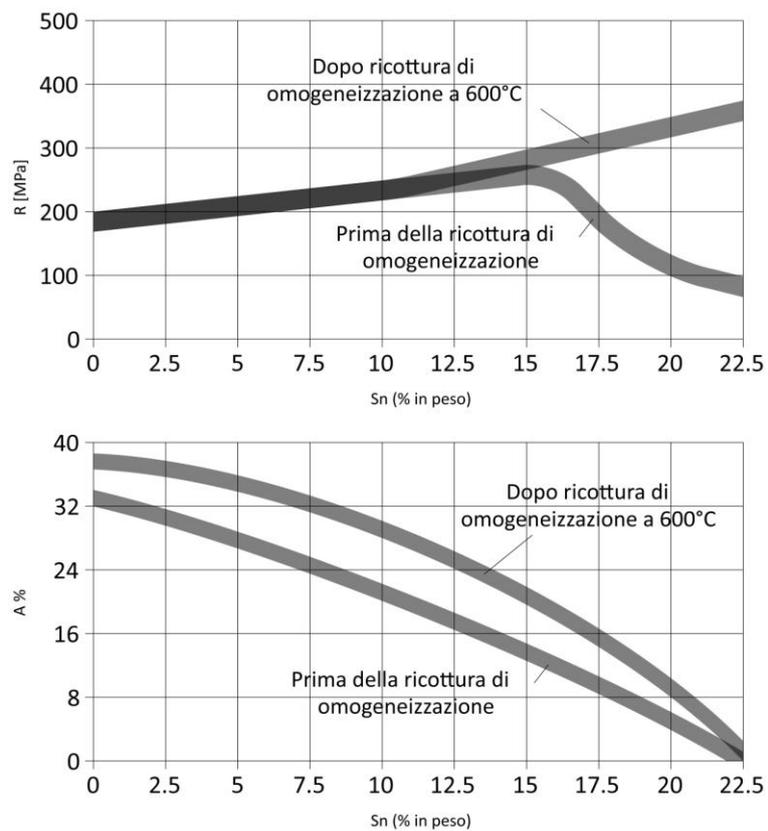


Figura 7: Effetto della ricottura di omogeneizzazione sul carico di rottura (R) e sull'allungamento percentuale a rottura (A%) in funzione della percentuale di stagno.

Dal grafico di figura 7 è possibile osservare che, all'aumentare della percentuale di stagno, la ricottura di omogeneizzazione consente di:

- aumentare sempre l'allungamento percentuale a rottura (A%); l'aumento è:
 - marcato per percentuali di stagno inferiori al 13.9%;
 - leggero per percentuali di stagno superiori al 13.9%.
- Aumentare il carico di rottura solo per percentuali di stagno superiori al 13.9%.

Le motivazioni sono da ricercare nell'effetto che il trattamento termico ha sulle fasi presenti a temperatura ambiente:

- per bronzi con stagno inferiore al 13.9% la ricottura di omogeneizzazione consente di eliminare la fase δ ottenendo, a temperatura ambiente, la sola fase α (come previsto dal diagramma di stato). La fase α è molto deformabile e permette di aumentare di molto l'allungamento senza però esercitare un effetto significativo sulla resistenza meccanica.
- per bronzi con stagno superiore al 13.9% la ricottura di omogeneizzazione consente di eliminare la fase δ trasformandola in β . A temperatura ambiente sono presenti la fase α e la fase β , resa stabile dal rapido raffreddamento. La fase β è più deformabile della fase δ ma meno della fase α (rispetto a cui è anche più dura) e permette di aumentare sia l'allungamento che la resistenza meccanica.

Tali considerazioni sono da ritenere valide per i bronzi di interesse industriale, cioè per contenuti di stagno inferiori al 25%.

Anche se quasi del tutto sostituiti dai cupralluminii, i bronzi sono stati utilizzati per la produzione:

- di monete, medaglie, tubi e piastre per l'industria chimica e petrolchimica (contenuto di Sn compreso fra il 3% e il 10%); questi bronzi sono deformabili a freddo e possiedono buone proprietà meccaniche;

- cuscinetti, boccole, apparecchi idraulici per alte pressioni, corpi valvola, giranti di pompe (contenuto di Sn compreso fra il 10% e il 15%); questi bronzi sono poco deformabili a freddo, possiedono un elevato carico di rottura e una buona durezza;
- campane (contenuto di Sn compreso fra il 19% e il 25%); questi bronzi sono duri, fragili e dotati di grande fluidità;

Attualmente l'utilizzo dei bronzi è limitato alla produzione di:

- strumenti musicali come piatti, trombe e sax: il contenuto di stagno è compreso fra il 3% e il 10%;
- sculture: il contenuto di stagno è variabile fra il 2% e il 4% di stagno. Oltre al rame e allo stagno, questi bronzi contengono quasi sempre lo zinco e il piombo.

PREZZO

Il bronzo ha un **prezzo pari a circa 7-8 volte quello di un normale acciaio al carbonio.**

DESIGNAZIONE

I bronzi vengono designati con le sigle:

P-CuSn12-C, P-CuSn12-B, G-CuSn20-B

dove:

- I numeri indicano la percentuale reale dell'elemento di lega a cui seguono (es. Sn12 indica una percentuale di stagno pari al 12%);
- P indica che la lega è da deformazione plastica;
- G indica che la lega è da fonderia;
- C indica che la lega è fornita sottoforma di getti;
- B indica che la lega è fornita sottoforma di lingotti.

CUPRAL- LUMINIO

PROPRIETÀ GENERALI

Se in passato le leghe rame-stagno sono state notevolmente utilizzate sia per la creazione di opere d'arte che in campo industriale, oggi il loro uso è quasi del tutto scomparso; **attualmente il bronzo è stato soppiantato dalle leghe rame-alluminio (CUPRALLUMINIO)**, detto volgarmente bronzo all'alluminio. Tali leghe, sviluppate allo scopo di ottenere un materiale dalle caratteristiche comparabili a quelle del bronzo (senza la necessità di utilizzare lo stagno), sostituirono in breve tempo il bronzo stesso perché, oltre ad avere proprietà meccaniche e di resistenza alla corrosione superiori, presentavano costi di produzione inferiori (l'alluminio ha un costo inferiore allo stagno e forma con il rame soluzioni solide di tipo sostituzionale). Per contenuti di alluminio compresi fra l'4% e il 12%, tipici dei cupralluminii maggiormente utilizzati, la densità è pari a circa $7800 \div 7500 \text{ kg/m}^3$ mentre la temperatura di fusione è compresa fra 980°C e 880°C circa. La colorazione varia a seconda della percentuale di alluminio: il cupralluminio appare rosso dorato in forte presenza di rame, colore che sbiadisce verso pallidi gialli argentati all'aumentare delle percentuali del metallo di alligazione. Oltre al rame e all'alluminio possono essere aggiunti anche altri elementi di lega, quali:

- **ferro (1% ÷ 6%)**: permette di affinare le dimensioni del grano, migliorando le proprietà meccaniche. Unitamente al nichel, consente di inibire la formazione della fase γ_2 , nociva per la resistenza alla corrosione (vedi paragrafo sulle proprietà meccaniche).
- **Nichel (0.5% ÷ 7%)**: consente di aumentare la resistenza alla corrosione in acqua marina, lo snervamento e la solubilità del ferro, per cui viene sempre aggiunto quando il tenore di quest'ultimo supera il 3% (solubilità massima del ferro nel cupralluminio). Unitamente al ferro, consente di inibire la formazione della fase γ_2 , nociva per la resistenza alla corrosione (vedi paragrafo sulle proprietà meccaniche).
- **Manganese (0.5% ÷ 12%)**: è sempre presente in piccoli tenori (0.1% ÷ 0.5%) perché viene aggiunto come disossidante nella fabbricazione della lega; viene aggiunto in tenori fino al 12% quando è necessario migliorare la saldabilità della lega.
- **Piombo (inferiore al 0.5%)**: introdotto al solo scopo di migliorare la truciolabilità.

Le proprietà dei cupralluminii sono:

- **buona malleabilità e duttilità.**
- **Elevata fusibilità, colabilità e saldabilità.** Le leghe rame-alluminio possiedono un ristretto intervallo di solidificazione che:
 - permette di inibire il fenomeno della segregazione, tipico dei bronzi;
 - provoca la formazione di profondi coni di ritiro, per cui è necessario prevedere materozze di adeguata dimensione. Le materozze consentono di evitare che la "pelle" di ossido di alluminio (Al_2O_3) formata dal contatto fra l'ossigeno e la lega fusa penetri all'interno del getto durante il riempimento della forma.
- **Buona resistenza a fatica.**

- **Elevata resistenza alla corrosione in numerosi ambienti corrosivi.** I cupralluminii, infatti, resistono:
 - ottimamente alla corrosione atmosferica di ogni tipo (comprese le atmosfere marine e quelle industriali) anche ad elevata temperatura;
 - ottimamente al contatto con liquidi corrosivi come soluzioni acide, soluzioni saline, petrolio. La notevole resistenza alla corrosione dei bronzi all'alluminio in ambienti acidi, cresce al crescere del tenore di alluminio ed è dovuta alla formazione di un ossido superficiale di allumina Al_2O_3 molto resistente agli acidi, il quale protegge il metallo sottostante dall'ulteriore ossidazione;
 - male alla corrosione in ambienti basici i quali tendono a sciogliere l'ossido protettivo.

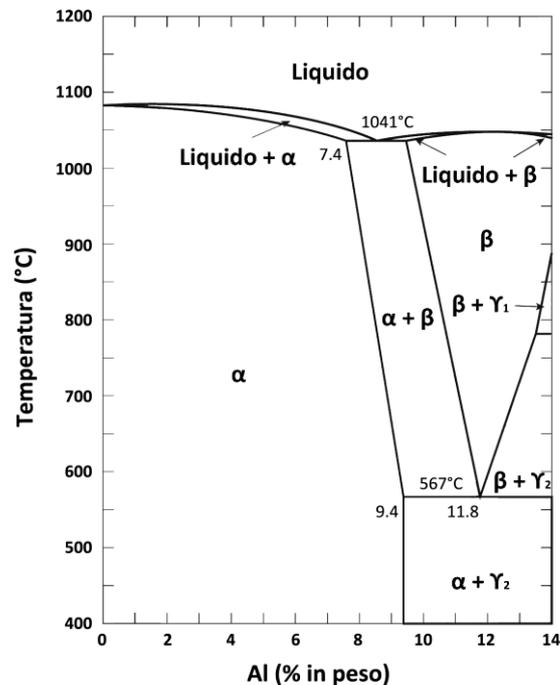


Figura 8: Diagramma di stato rame-alluminio (porzione di interesse per i cupralluminii).

PROPRIETÀ MECCANICHE E TIPOLOGIE UTILIZZATE INDUSTRIALMENTE

Per capire l'influenza dell'alluminio sulle proprietà meccaniche dei cupralluminii è necessario fare riferimento al diagramma di stato rame-alluminio (figura 8). Dalla sua osservazione si nota subito che per tenori di alluminio fino:

- al 7.4%, esiste solo una fase (α) con reticolo cubico a facce centrate. La fase α presenta ottima deformabilità a freddo ed aumenta la sua durezza, diminuendo la propria deformabilità, all'aumentare del contenuto di alluminio.
- Al 9.4%, esistono le fasi α e β per temperature superiori ai 565°C, e la sola fase α per temperature inferiori. La fase β è cubica a corpo centrato e se portata in equilibrio instabile, per rapido raffreddamento a temperatura ambiente, si presenta dura e fragile.
- Al 11.8%, la struttura può essere mono o bifasica in funzione della temperatura a cui viene considerata la lega. Al di sotto dei 565°C compare la fase γ_2 che forma una struttura eutettoidica unitamente alla fase α . Va sottolineato come la fase γ_2 sia indesiderata, perché comporta un drastico abbassamento della resistenza alla corrosione della lega. La sua formazione viene perciò inibita dall'aggiunta di nichel e ferro, sempre presenti nelle leghe con titolo di alluminio superiore al 9,4%. La presenza di nichel e ferro permette la formazione di fase k, ricca di tali elementi, che si sostituisce alla fase γ_2 .

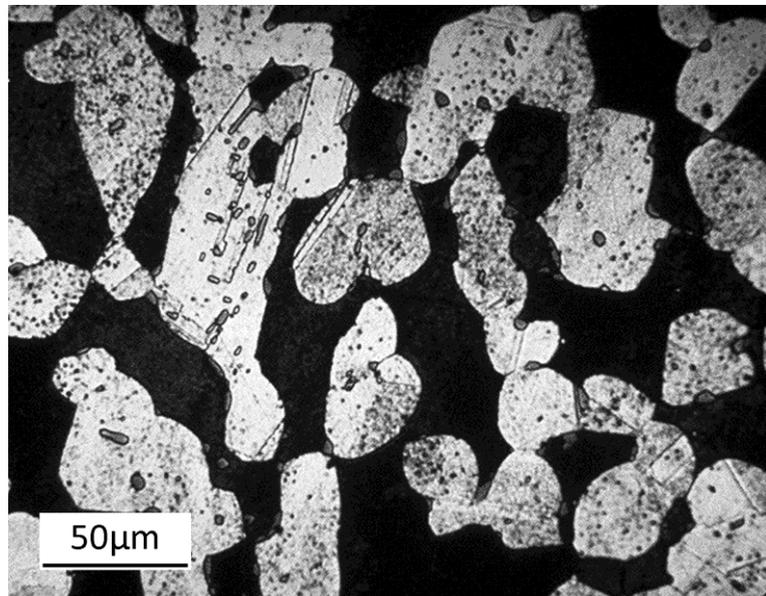


Figura 9: Microstruttura di un cupralluminio all'11% di alluminio colato in sabbia. Si notano i grani di fase α e di eutettoide ($\alpha + k$) di grossa dimensione (fonte: Laboratori University of Florida - <http://www.copper.org/>).

Se il raffreddamento è lento (es. getti colati in sabbia) si ottiene una struttura formata da grani di fase α e di eutettoide ($\alpha + k$) di grossa dimensione (figura 9); man mano che la velocità di raffreddamento aumenta, si ottengono:

- strutture formate da grani di fase α e di eutettoide ($\alpha + k$) di piccola dimensione le cui proprietà meccaniche sono migliori rispetto a quelle a grano grosso. Esempio tipico sono i getti colati in conchiglia metallica (figura 10);

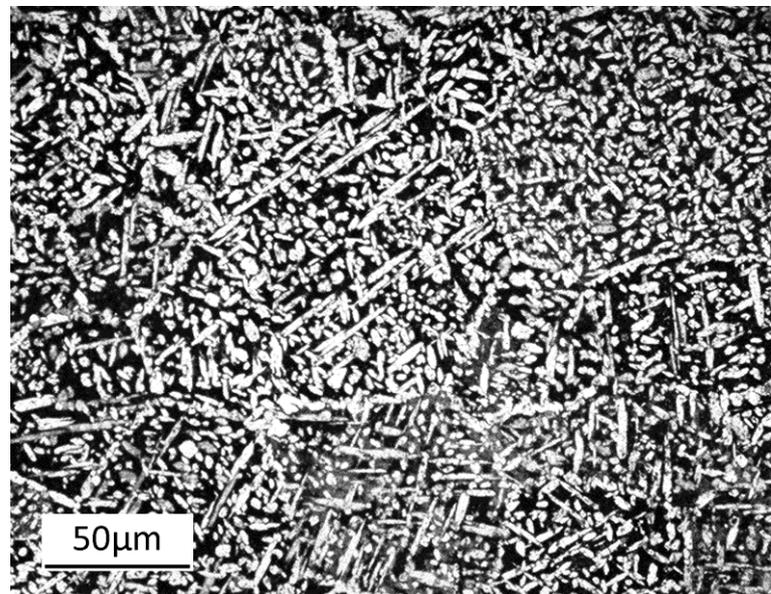


Figura 10: Microstruttura di un cupralluminio all'11% di alluminio colato in conchiglia metallica. Si notano i grani di fase α e di eutettoide ($\alpha + k$) di piccola dimensione (fonte: Laboratori University of Florida - <http://www.copper.org/>).

- fase β in equilibrio instabile a temperatura ambiente. Tale costituente strutturale, dall'aspetto aciculare, è particolarmente duro e fragile e deve essere sempre sottoposto a rinvenimento. Il rinvenimento, effettuato per temperature comprese fra i 500°C e i 600°C, ha il duplice scopo di rilassare le tensioni indotte dal brusco raffreddamento e di far precipitare la fase k sottoforma di particelle finemente disperse all'interno della matrice metallica, in modo da aumentare ulteriormente le proprietà meccaniche. Esempio tipico sono i getti sottoposti a

trattamento termico, che vengono riscaldati oltre i 700°C e raffreddati bruscamente in acqua.

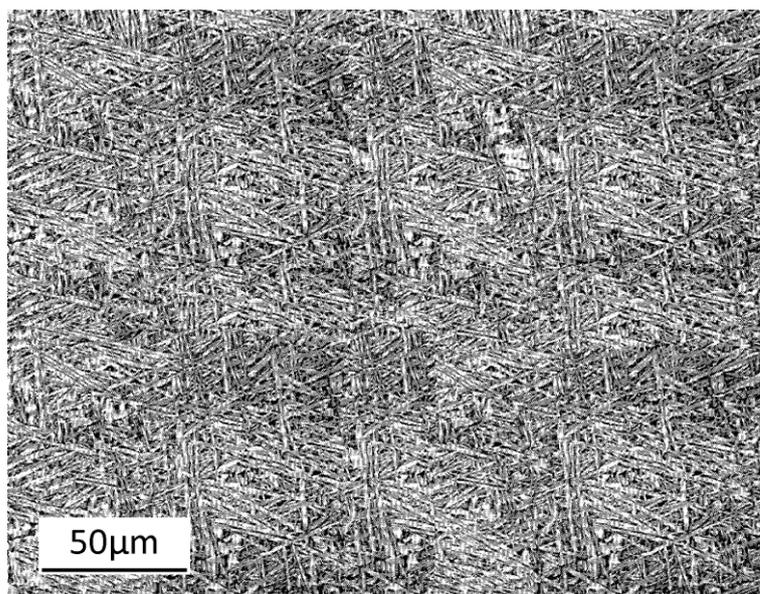


Figura 11: Microstruttura di un cupralluminio all'11% di alluminio riscaldato a 900°C, raffreddato bruscamente in acqua e rinvenuto a 600°C. Si nota la forma aciculare della fase β (fonte: Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

Per quanto sopra indicato **a livello industriale si distinguono due categorie principali di cupralluminio**, distinte in funzione della percentuale di alluminio:

- **cupralluminii con una percentuale di alluminio inferiore al 9.4%**: sono costituiti dalla sola fase α a temperatura ambiente e, allo stato ricotto, presentano discrete proprietà meccaniche e buona deformabilità:
 - carico di rottura (**R**): **350 ÷ 450 MPa**;
 - carico di snervamento (**R_{P0.2}**): **120 ÷ 140 MPa**;
 - durezza: **120HB ÷ 140HB**;
 - modulo elastico (**E**): **120.000 MPa**;
 - allungamento percentuale a rottura (**A%**): **maggiore del 20%**.

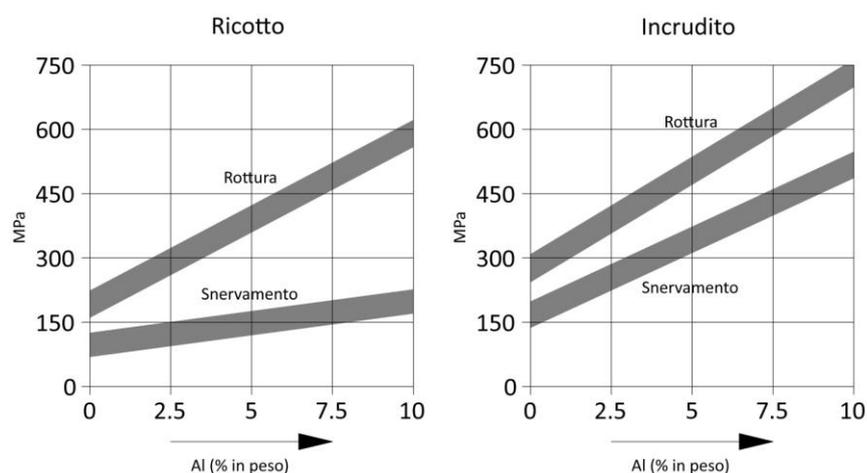


Figura 12: Andamento del carico di rottura (**R**) e del carico di snervamento (**R_{P0.2}**), in funzione del contenuto di alluminio, in cupralluminii costituiti da sola fase α allo stato ricotto o incrudito.

Questo tipo di bronzi sono da deformazione plastica a freddo e sono utilizzati per la produzione di laminati, estrusi, forgiati, stampati e trafilati. Per **incrementare le proprietà meccaniche** è possibile:

- **aumentare il contenuto di alluminio**;
- **aggiungere ferro e nichel in lega**;
- **deformare a freddo il materiale, incrudendolo**.

A dimostrazione di ciò, è possibile osservare la figura 12, che mostra l'andamento del carico di rottura (R) e del carico di snervamento ($R_{p0.2}$), in funzione del contenuto di alluminio, in leghe ricotte o incrudite.

- **Cupralluminii con una percentuale di alluminio superiore al 9.4% (contengono sempre ferro e nichel in lega):** in funzione della velocità di raffreddamento possono presentare a temperatura ambiente:
 - fase α e fase k sottoforma di cristalli omogenei di fase α e cristalli lamellari a lamelle alternate di fase α e fase k;
 - fase β dall'aspetto aciculare e precipitati di fase k (se viene effettuato il rinvenimento).

Queste leghe sono per lo più utilizzate in fonderia per la produzione di getti e presentano ottime proprietà meccaniche, funzione del contenuto di ferro e nichel e della velocità di raffreddamento:

- carico di rottura (R): **600 ÷ 750 MPa**;
- carico di snervamento ($R_{p0.2}$): **150 ÷ 400 MPa**;
- durezza: **150HB ÷ 200HB**;
- modulo elastico (E): **120.000 MPa**;
- allungamento percentuale a rottura (A%): **5%÷15%**.

Cupralluminii con Al < 9.4%

Sono sottoposti solo a ricottura, che può essere effettuata alla temperatura di:

- 800°C ÷ 850°C, se è necessario addolcire il materiale incrudito, provocandone la ricristallizzazione, quando debba essere sottoposto ad un ulteriore ciclo di deformazione plastica a freddo;
- 350°C ÷ 400°C, se è solo necessario diminuire le tensioni residue dovute alla deformazione plastica a freddo.

Il raffreddamento viene di norma eseguito in aria.

Cupralluminii con Al > 9.4%

Possono essere sottoposti a trattamento termico, allo scopo di ottenere fase β , in equilibrio instabile, a temperatura ambiente. Per garantire la completa trasformazione della lega in fase β bisogna porre particolare attenzione alla temperatura di riscaldamento. La linea del solidus è infatti molto inclinata e piccole differenze di composizione chimica possono portare a forti variazioni di temperatura per ottenere la trasformazione totale in β . È perciò di estrema importanza conoscere il contenuto esatto di alluminio, mentre l'effetto degli elementi di lega (ferro, nichel e manganese) sulla posizione della linea del solidus è piuttosto limitato. Generalmente, per le leghe di maggiore utilizzo, il riscaldamento viene effettuato per temperature intorno ai 900°C ed il tempo di permanenza è circa pari a 1 ora per ogni 25mm di spessore del componente. Il raffreddamento viene effettuato in acqua fredda mantenuta a temperature comprese fra 10°C e 30°C.

La fase β in equilibrio instabile a temperatura ambiente è particolarmente dura e fragile e deve essere sottoposta a rinvenimento. Il rinvenimento, effettuato per temperature comprese fra i 500°C e i 600°C, ha il duplice scopo di rilassare le tensioni indotte dal brusco raffreddamento e di far precipitare la fase k sottoforma di particelle finemente disperse all'interno della matrice metallica, in modo da aumentare ulteriormente le proprietà meccaniche.

Il raffreddamento può essere effettuato in acqua se la temperatura raggiunta non ha superato i 565°C, in caso contrario è preferibile un raffreddamento in aria.

APPLICAZIONI INDUSTRIALI

I cupralluminii, hanno sostituito i bronzi in quasi tutte le loro applicazioni industriali. In particolare vengono utilizzati per la produzione di:

- apparecchi idraulici per alte pressioni
- corpi valvola, giranti di pompe e eliche di navi
- tubi, lamiere e profilati per l'industria chimica e petrolchimica
- cuscinetti e boccole

PREZZO

Il cupralluminio ha un **prezzo pari a circa 5-6 volte quello di un normale acciaio al carbonio.**

DESIGNAZIONE

I cupralluminii vengono designati con le sigle:

P-CuAl9-C, P-CuAl9-B, G-CuAl10Fe2-B

dove:

- I numeri indicano la percentuale reale dell'elemento di lega a cui seguono (es. Al10Fe2 indica una percentuale di alluminio pari al 10% e di ferro del 2%);
- P indica che la lega è da deformazione plastica;
- G indica che la lega è da fonderia;
- C indica che la lega è fornita sottoforma di getti;
- B indica che la lega è fornita sottoforma di lingotti.

OTTONE

PROPRIETÀ GENERALI

Gli **OTTONI** sono leghe tra rame e zinco: tali elementi formano tra loro soluzioni solide di tipo sostituzionale. Per contenuti di zinco compresi fra il 33% e il 42%, tipici degli ottoni maggiormente utilizzati, la densità è pari a circa 8700kg/m^3 , mentre la temperatura di fusione è leggermente maggiore di 900°C .

Per lo studio delle strutture degli ottoni occorre esaminare il diagramma di stato rame-zinco (figura 13): il diagramma viene preso in considerazione fino a composizioni intorno al 50%, poiché le leghe con maggiore contenuto di zinco non offrono caratteristiche interessanti da un punto di vista applicativo.

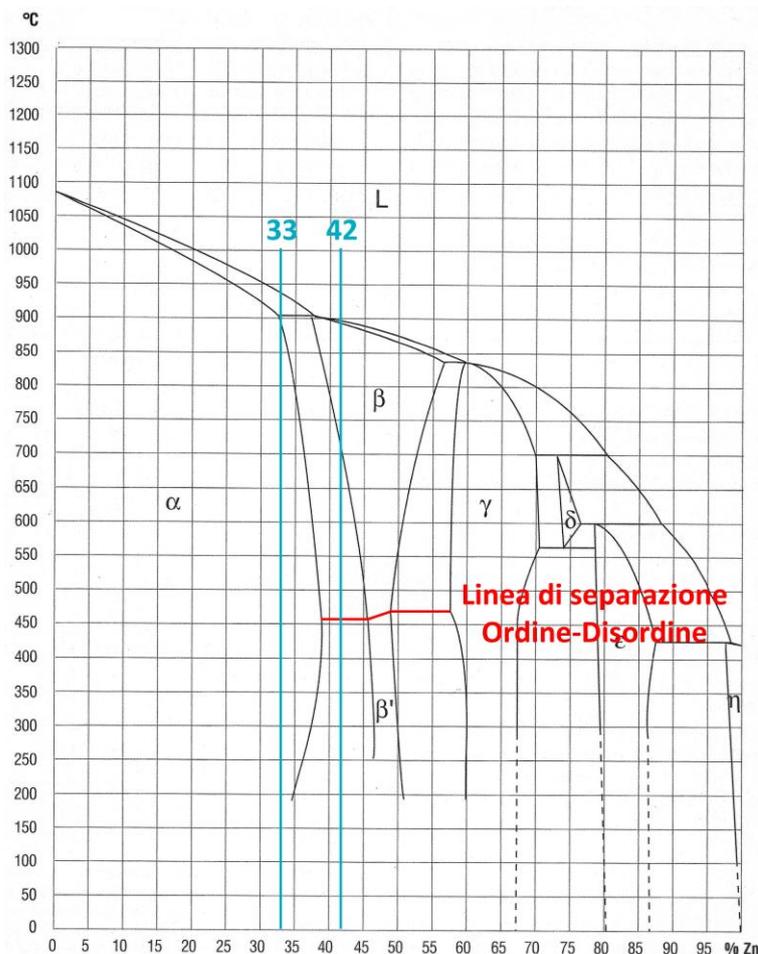


Figura 13: Diagramma di stato rame-zinco. In rosso è indicata la linea di separazione ordine/disordine, in azzurro la percentuale minima e massima di Zn generalmente utilizzata per la fabbricazione degli ottoni.

Nella porzione di interesse del diagramma, i campi monofasici sono quelli del liquido, della fase α e della fase β . A tale proposito è opportuno precisare che:

- **la fase α è cubica a facce centrate (CFC) e presenta notevole deformabilità a freddo**, mentre la capacità di deformazione a caldo è meno favorevole e richiede un particolare controllo del contenuto di impurità della lega. Impurità basso fondenti quali piombo e bismuto si depositano a bordo grano, e a temperatura elevata formano un film liquido che porta al distacco dei cristalli di fase α durante il processo di deformazione plastica a caldo.
- **la fase β è cubica a corpo centrato (CCC) e presenta buona deformabilità a caldo**, mentre è pressoché indeformabile a freddo. La fase β presenta la peculiarità di avere:
 - struttura disordinata alle alte temperature ($>400^\circ\text{C}$);
 - struttura ordinata alle basse temperature ($<400^\circ\text{C}$).

La linea rossa indica la separazione ordine/disordine. La struttura ordinata più regolare e con legami molecolari più forti di quella disordinata, giustifica la scarsa deformabilità a freddo della fase β . La struttura disordinata ad alta temperatura spiega, al contrario la deformabilità a caldo della fase β .

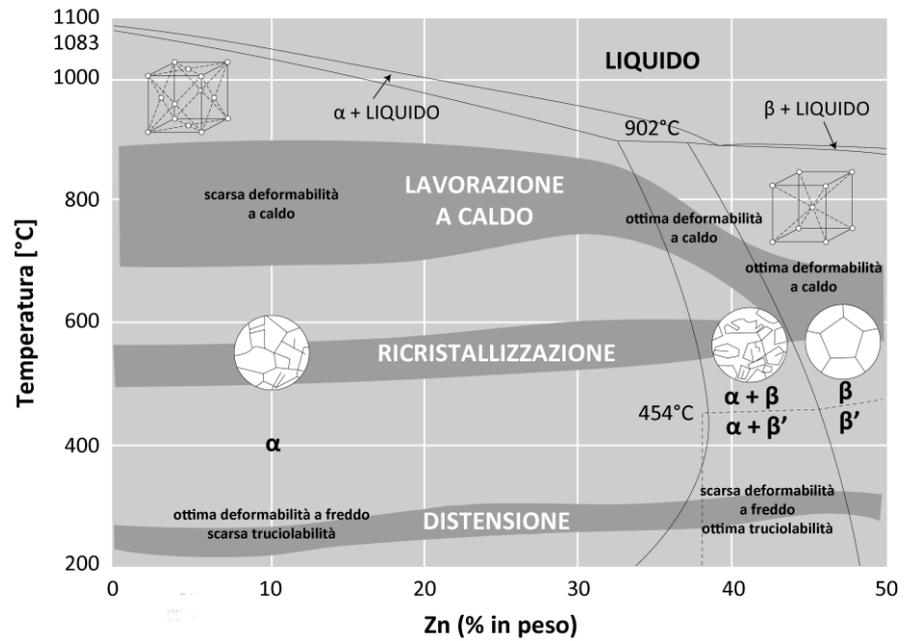


Figura 14: Diagramma di stato rame-zinco. Si nota come la fase α abbia ottima deformabilità a freddo e scarsa a caldo, e come la fase β abbia scarsa deformabilità a freddo e ottima a caldo.

Gli ottone utilizzati industrialmente presentano a temperatura ambiente:

- la **sola fase α** : essi prendono il nome di **ottone rossi**;

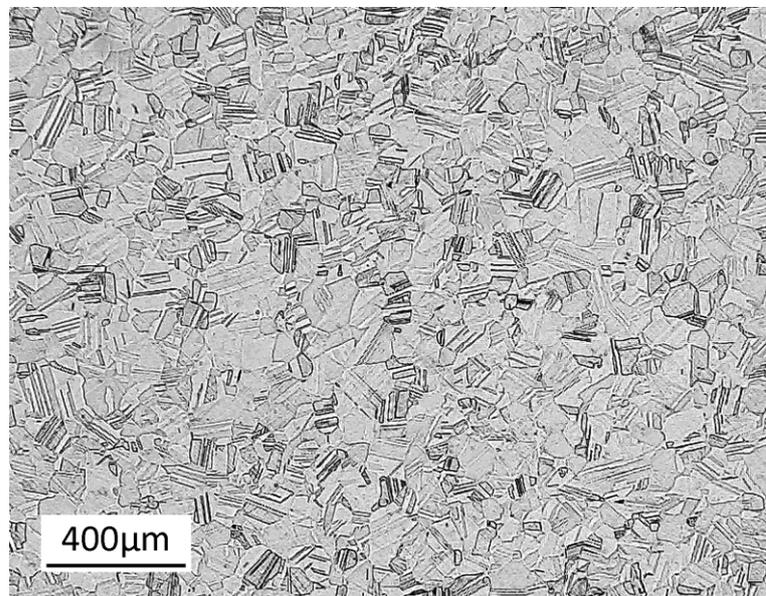


Figura 15: Microstruttura di un ottone al 30% di zinco. Si nota la presenza della sola fase α (fonte: Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

- fase α e β : essi prendono il nome di **ottoni gialli**

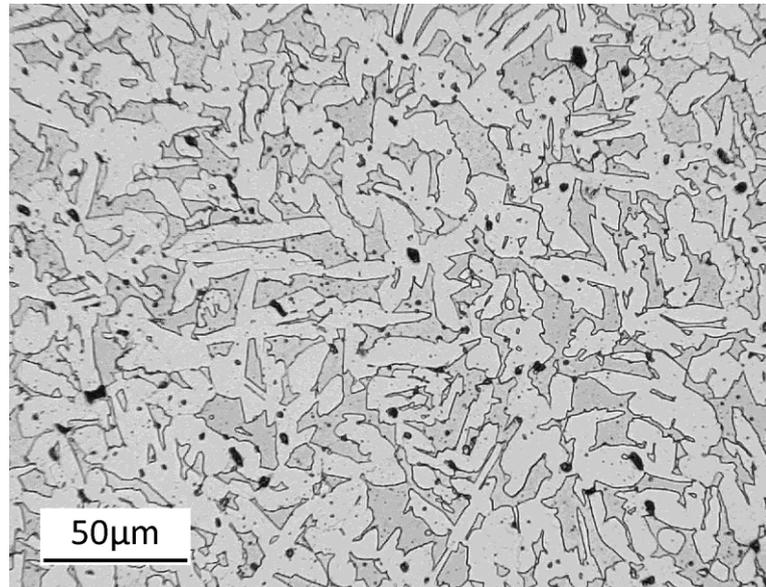


Figura 16: Microstruttura di un ottone al 40% di zinco. Si nota la presenza della fase α (grigio chiaro) e della fase β (grigio scuro) - (fonte: Laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

Agli effetti di un eventuale modificazione strutturale l'aggiunto di un terzo elemento alle leghe Cu - Zn può essere considerata equivalente, all'aggiunta o sottrazione di zinco in quantità proporzionale a quella dell'elemento stesso. La costante di proporzionalità, denominata coefficiente di equivalenza, varia da un elemento all'altro.

Elemento aggiunto	Coefficiente di equivalenza
Mn	0.5
Fe	0.9
Sn	2
Mg	2
Al	6
Si	10
Pb	0
Ni	-1.1 ÷ -1.7

Agli effetti strutturali, si definisce titolo fittizio il titolo in rame o zinco dell'ottone binario equivalente alla composizione dell'ottone con elementi aggiunti. I titoli fittizi di rame (tf_{Cu}) e di zinco (tf_{Zn}), in percentuale, sono dati dalle seguenti espressioni:

$$tf_{Cu} = \frac{Cu\%}{Cu\% + Zn\% + C \cdot El\%} \cdot 100$$

$$tf_{Zn} = \frac{Zn\% + C \cdot El\%}{Cu\% + Zn\% + C \cdot El\%} \cdot 100$$

dove Cu%, Zn% e El% sono le percentuali di Cu, Zn e del terzo elemento aggiunto all'ottone, dove C è il coefficiente di equivalenza. Se i componenti aggiunti sono più di uno, ciascuno di essi partecipa con il suo coefficiente e con la sua percentuale al titolo fittizio di rame e di zinco.

In termini generali le proprietà degli ottoni sono:

- **buona malleabilità e duttilità;**
- **buona fusibilità e colabilità;**
- **buona resistenza alla corrosione.** Gli ottoni, infatti, resistono:
 - bene alla corrosione atmosferica di ogni tipo (compresa l'atmosfera marina e quella industriale) anche ad elevata temperatura;
 - bene al contatto con liquidi corrosivi come soluzioni acide, soluzioni saline, petrolio;
 - male in ambienti basici, in particolar modo di tipo ammoniacale.

Dal punto di vista industriale gli ottoni possono essere divisi in quattro categorie:

- **ottoni binari (o ottoni comuni);**
- **ottoni al piombo (o secchi);**
- **ottoni speciali.**

Ottoni binari

Sono costituiti solo da rame e zinco senza ulteriori elementi di lega. In funzione del tenore di zinco, e quindi delle fasi presenti, gli ottoni binari possono essere suddivisi in:

1) Ottoni con tenore di zinco inferiore al 33%

Hanno interamente struttura α a qualsiasi temperatura inferiore a quella del solidus. Durante il raffreddamento non subiscono nessuna trasformazione, né incontrano curve di saturazione.

Perciò gli unici modi di aumentarne le caratteristiche meccaniche sono:

- aumentare il contenuto di zinco;
- deformare plasticamente il materiale, incrudendolo.

Essendo costituiti dalla sola fase α , **hanno ottima deformabilità a freddo**, mentre la capacità di deformazione a caldo è meno favorevole e richiede un particolare controllo del contenuto di impurità della lega. Impurità basso fondenti quali piombo e bismuto si depositano a bordo grano, e a temperatura elevata formano un film liquido che porta al distacco dei cristalli di fase α durante il processo di deformazione plastica a caldo.

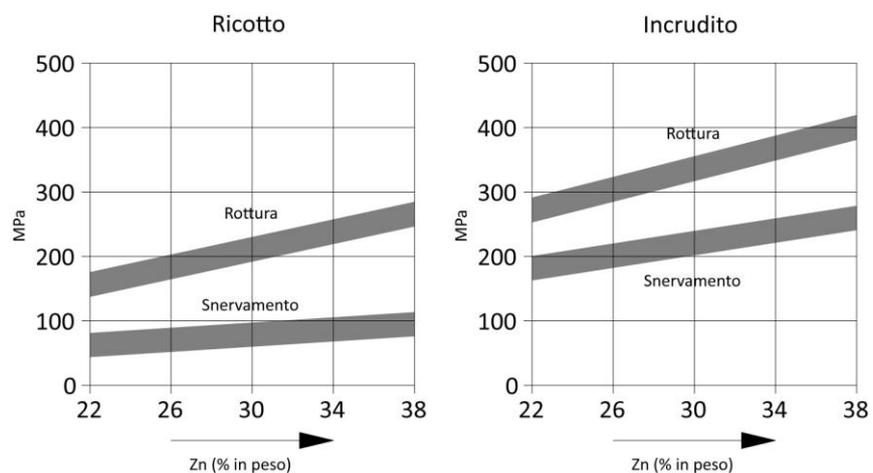


Figura 17: Andamento del carico di rottura (R) e del carico di snervamento ($R_{p0.2}$), in funzione del contenuto di zinco, in leghe ricotte o incrudite.

Le proprietà meccaniche, allo stato ricotto, sono:

- carico di rottura (R): **150 ÷ 250 MPa;**
- carico di snervamento ($R_{p0.2}$): **60 ÷ 100 MPa;**
- durezza: **60HB ÷ 80HB;**

- modulo elastico (E): **105.000 MPa**;
- allungamento percentuale minimo a rottura (A%): **maggiore del 20%**.

Per **incrementare le proprietà meccaniche** è possibile:

- **aumentare il contenuto di zinco (Figura 17)**;
- **deformare plasticamente il materiale, incrudendolo (figura 17)**.

2) Ottoni con tenore di zinco compreso tra 33% e 37%

- ad elevata temperatura (>400°C) sono costituiti dalle fasi α e β , con fase β a struttura disordinata, e sono quindi ben lavorabili a caldo;
- A bassa temperatura (<400°C) sono costituiti dalla sola fase α e ciò gli conferisce ottima lavorabilità a freddo.

Gli ottoni di questo gruppo **offrono il migliore grado di deformabilità**.

Grazie al maggior contenuto di zinco, le proprietà meccaniche allo stato ricotto, sono leggermente superiori a quelle degli ottoni con contenuto di zinco inferiore al 33%. Anche in questo caso per **incrementare le proprietà meccaniche** è possibile:

- **aumentare il contenuto di zinco (Figura 6)**;
- **deformare plasticamente il materiale, incrudendolo (figura 6)**.

In via teorica sarebbe ottenibile un aumento delle proprietà meccanica riscaldando la lega a temperature tali da entrare nel campo $\alpha + \beta$ e raffreddando velocemente in modo da ottenere fase β anche a temperatura ambiente. In realtà questo tipo di trattamento termico non viene mai applicato perché è possibile ottenere lo stesso risultato, in modo più semplice, aggiungendo zinco.

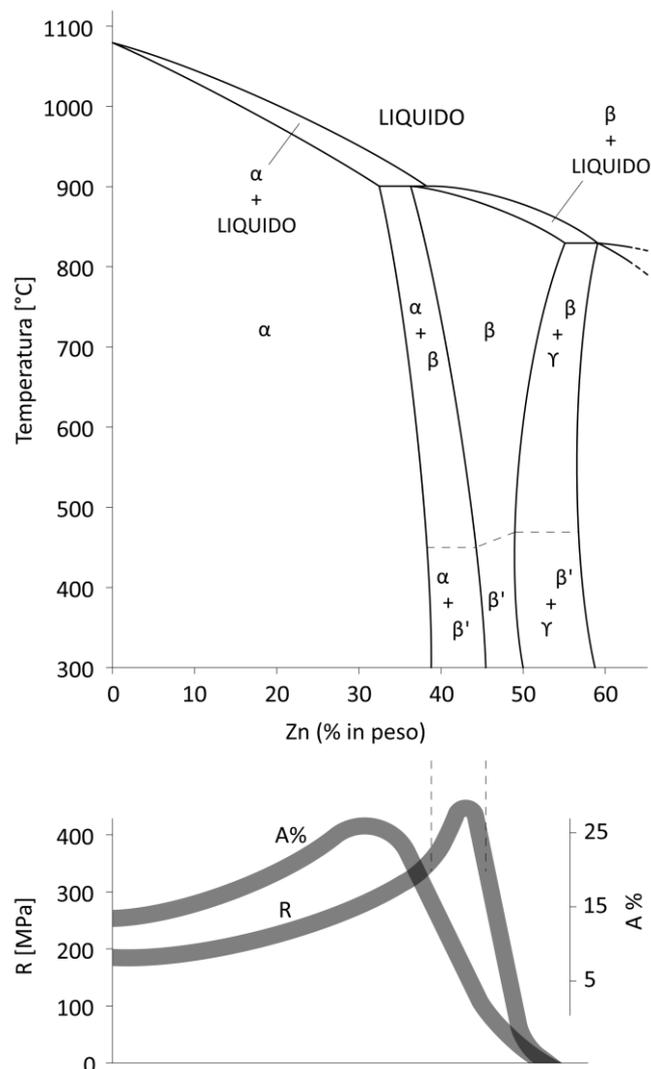


Figura 18: Andamento del carico di rottura (R) e dell'allungamento percentuale a rottura (A%), in funzione del contenuto di zinco in leghe ricotte.

3) Ottoni con tenore di zinco compreso tra 38% e 42%

Solidificano in fase β dalla quale si separa la fase α durante il raffreddamento: a temperatura ambiente presentano sia la fase α che la fase β . **Sono ben deformabili a caldo ma scarsamente deformabili a freddo.**

Grazie al maggior contenuto di zinco ed alla presenza di fase β a temperatura ambiente, le proprietà meccaniche allo stato ricotto, sono superiori a quelle degli ottoni con contenuto di zinco inferiore al 38%:

- carico di rottura (R): **250 ÷ 350 MPa**;
- carico di snervamento ($R_{p0.2}$): **80 ÷ 120 MPa**;
- durezza: **100 HB ÷ 120 HB**;
- modulo elastico (E): **105.000 MPa**;
- allungamento percentuale minimo a rottura (A%): **maggiore del 5%**.

L'unico modo possibile per **incrementare le proprietà meccaniche** è **aumentare il contenuto di zinco** perché la deformazione plastica a freddo è impedita dalla presenza della fase β .

In via teorica sarebbe ottenibile un aumento delle proprietà meccanica riscaldando la lega a temperature tali da entrare nel campo della sola fase β e raffreddando velocemente in modo da ottenere solo fase β anche a temperatura ambiente. In realtà questo tipo di trattamento termico non viene mai applicato, perché la sua buona riuscita è complessa: durante il riscaldamento tutta la fase α deve essere solubilizzata e il raffreddamento deve essere sufficientemente rapido da portare a temperatura ambiente la lega solubilizzata senza precipitazione della fase α . Se tali condizioni non vengono soddisfatte il trattamento può causare il decadimento delle proprietà meccaniche anziché il loro miglioramento.

Gli ottoni con tenore di zinco superiore al 42% non sono di alcun interesse dal punto di vista industriale, perché contengono una percentuale troppo elevata di fase β (per percentuali superiori al 47% sono costituiti dalla sola fase β) e, quindi, sono fragili a freddo.

Ottoni al piombo

Il piombo è un elemento che non è solubile nel rame o nella lega rame-zinco ma rimane completamente separato. A causa della sua bassa temperatura di fusione è l'ultimo elemento a solidificare e si trova perciò distribuito a bordo grano; tale peculiarità viene sfruttata per aumentare la truciolabilità degli ottoni consentendo all'utensile di frammentare agevolmente il truciolo. **Se all'ottone binario si aggiunge il 2 ÷ 3% di piombo, il truciolo risulta molto corto, la lavorazione meccanica diventa più facile ed i pezzi ottenuti hanno una migliore finitura superficiale.**

Molti componenti realizzati in ottone e finiti alle macchine utensili sono realizzati con leghe al piombo; si pensi ad esempio alla grande produzione di rotismi per orologeria, dadi, viti. Questi ottoni sono utilizzati anche per la fabbricazione di pezzi stampati, come ad esempio rubinetteria, scarichi di lavandini, parti di elettrodomestici. Gli ottoni al piombo hanno basso contenuto di rame: le elevate percentuali di fase β riducono la duttilità della lega ma migliorano molto la sua deformabilità a caldo.

Gli ottoni al piombo rappresentano la tipologia più utilizzata (più del 50% del totale degli ottoni): per la loro produzione viene infatti assorbito circa il 15% del rame prodotto. In Italia, grande produttore di valvolame e rubinetteria, tale percentuale sale al 25%.

Le proprietà meccaniche sono comparabili a quelle degli ottoni binari con tenore di zinco compreso tra 38% e 42%. Anche per gli ottoni al piombo l'unico modo per aumentare le proprietà meccaniche è l'aggiunta di zinco.

Ottoni speciali

Si definiscono ottoni speciali le leghe **contenenti oltre a rame e zinco, uno o più elementi in percentuale di alcune unità**. Ciascun componente aggiunto alla lega Cu-Zn ha una sua influenza specifica sulle caratteristiche della lega stessa, per cui si possono ottenere ottoni speciali con proprietà meccaniche e tecnologiche molto diverse tra loro e spesso anche molto superiori a quelle offerte dalle leghe binarie.

- Ferro: è poco solubile nelle leghe rame - zinco (il limite di solubilità è attorno al 0.5%), ha una funzione affinante del grano cristallino e, di conseguenza, aumenta il carico di rottura.
- Manganese: agisce come il ferro affinando il grano cristallino. Viene aggiunto in tenori compresi fra il 2% e il 3%.
- Nichel: migliora la tenacità e la resistenza alla corrosione ed entra in lega anche in percentuale elevata (superiore al 10%).
- Stagno: aumenta sia le caratteristiche meccaniche che la resistenza alla corrosione in acqua di mare. Si ricorda la lega denominata "ottone ammiragliato" che può considerarsi un ottone con il 30% di zinco con l'aggiunta di un 1% di stagno. La lega è utilizzata per la fabbricazione di tubi di condensatori capaci operanti con acqua di mare, a motivo delle sue elevate caratteristiche meccaniche e per il suo favorevole comportamento nei confronti della resistenza a corrosione.
- Alluminio: la sua presenza, attorno al 2% ÷ 3%, provoca un aumento notevole della durezza e della resistenza meccanica, all'usura e alla corrosione in ambienti acidi e marini. I migliori risultati si ottengono con aggiunte contemporanee di ferro. La lega contenente zinco al 22% e alluminio al 2%, è largamente utilizzata per la fabbricazione di tubi di scambiatori di calore per impianti che operino in ambiente marino.
- Silicio: ha effetti analoghi all'alluminio a cui va aggiunto l'aumento della colabilità e della fluidità. Con il 5% di silicio l'ottone aumenta di molto la propria durezza (180HB ÷ 200HB) e può costituire un ottimo materiale, in sostituzione del cupralluminio, per la costruzione di bronze.
- Arsenico e Antimonio: sono presenti in percentuale limitata (0.02% ÷ 0.06%) e fungono da inibitori nei confronti del fenomeno della dezincificazione.

Gli ottoni speciali si possono dividere in due grandi categorie:

- ottoni resistenti alla corrosione, principalmente costituiti dagli ottoni all'alluminio o allo stagno;
- ottoni ad alta resistenza, impropriamente chiamati bronzi al manganese contengono oltre a quest'ultimo anche ferro, alluminio e stagno.

Le proprietà meccaniche sono fortemente dipendenti dal tipo e dalla quantità degli elementi di lega, tanto che è possibile ottenere ottoni speciali con proprietà meccaniche e tecnologiche molto diverse tra loro e spesso superiori a quelle delle leghe binarie.

Ottoni con tenore di zinco inferiore al 33%

Sono sottoposti alla sola ricottura di ricristallizzazione allo scopo di addolcire il materiale incrudito, quando debba essere sottoposto ad un ulteriore ciclo di deformazione plastica a freddo. La figura 19 riporta l'andamento delle proprietà meccaniche di un ottone incrudito e sottoposto a ricottura:

- fino a 300°C non vi sono cambiamenti sensibili delle proprietà meccaniche. In questa fase si manifesta il "recovery" della struttura cristallina che consiste nel riassetto del reticolo cristallino, il quale tende ad assumere le distanze atomiche regolari, e che permette di diminuire le tensioni residue dovute alla deformazione plastica a freddo.

- per temperature superiori ai 300°C cominciano a formarsi i primi nuclei cristallini in corrispondenza dei bordi dei grani deformati. All'aumentare delle temperatura i nuovi grani cristallini aumentano di dimensione a scapito dei grani deformati; l'aumento continua fino a quando la struttura cristallina è completamente rinnovata in corrispondenza di temperature vicine agli 800°C. Oltrepastata tale temperatura le proprietà meccaniche tendono a decadere a causa dell'aumento delle dimensioni dei grani cristallini.

Di norma la ricottura viene eseguita in corrispondenza dei 700°C ed è seguita da raffreddamento in aria o in acqua.

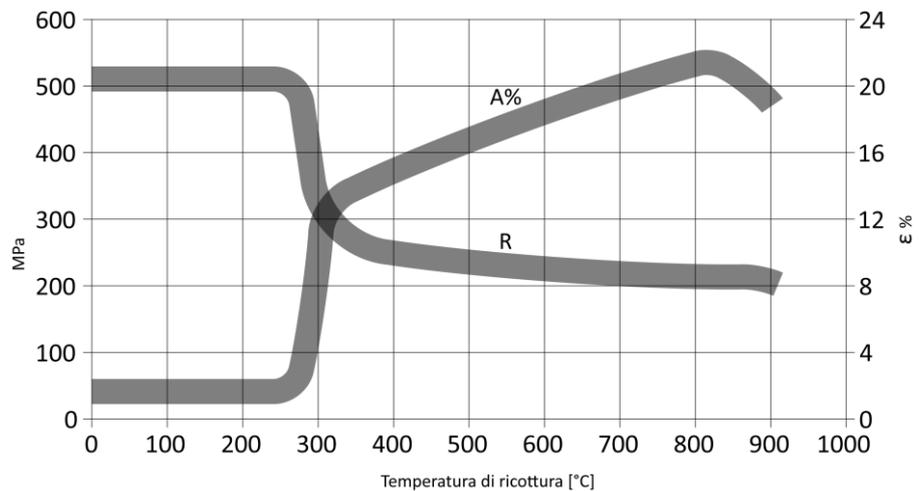


Figura 19: Andamento del carico di rottura (R) e dell'allungamento percentuale a rottura (A%) di ottoni α deformati plasticamente a freddo, in funzione della temperatura di ricottura.

Ottoni con tenore di zinco compreso tra 33% e 37%

Sono sottoposti alla sola ricottura che può essere di:

- omogeneizzazione, se è necessario migliorare la deformabilità a freddo della lega rendendola completamente α ; infatti le velocità di raffreddamento utilizzate in fonderia impediscono la completa trasformazione della fase β , che rimane presente anche a temperatura ambiente. La temperatura di riscaldamento deve essere scelta in modo da rimanere all'interno del campo della sola fase α ed il tempo di mantenimento deve essere tale da permettere la trasformazione completa della fase β . Il raffreddamento può essere eseguito sia in aria che in acqua.
- ricristallizzazione della lega deformata plasticamente a freddo quando questa abbia già subito una ricottura di omogeneizzazione in modo da ottenere la sola fase. La temperatura di riscaldamento può essere bassa (circa 300°C) se è solo necessario diminuire le tensioni residue o elevata se è necessario addolcire il materiale; in questo secondo caso la temperatura deve essere sufficientemente bassa da impedire l'ingresso nella zona di esistenza delle fasi $\alpha + \beta$. Il raffreddamento può essere eseguito sia in aria che in acqua.

In linea teorica sarebbe possibile applicare un ulteriore trattamento termico che prevede il riscaldamento della lega a temperature tali da entrare nel campo $\alpha + \beta$ e il raffreddamento veloce in acqua in modo da ottenere fase β anche a temperatura ambiente. In realtà questo tipo di trattamento termico non viene mai applicato perché è possibile ottenere lo stesso miglioramento delle proprietà meccaniche, in modo più semplice, aggiungendo zinco.

Ottoni con tenore di zinco compreso tra 38% e 42%

Possono essere sottoposti alla sola ricottura eseguita a bassa temperatura (circa 300°C) allo scopo di eliminare le tensioni residue indotte dalle lavorazioni alle macchine utensili.

In linea teorica sarebbe possibile applicare un ulteriore trattamento termico che prevede il riscaldamento della lega a temperature tali da entrare nel campo della sola fase β e il raffreddamento veloce in acqua in modo da ottenere solo fase β anche a temperatura ambiente. In realtà questo tipo di trattamento termico non viene mai applicato, perché la sua buona riuscita è complessa: durante il riscaldamento tutta la fase α deve essere solubilizzata e il raffreddamento deve essere sufficientemente rapido da portare a temperatura ambiente la lega solubilizzata senza precipitazione della fase α . Se tali condizioni non vengono soddisfatte il trattamento può causare il decadimento delle proprietà meccaniche anziché il loro miglioramento.

APPLICAZIONI INDUSTRIALI

Per quanto riguarda le applicazioni, gli ottoni sono largamente utilizzati per:

- bulloneria;
- rotismi per orologeria;
- valvolame, rubinetteria e in generale pezzi stampati a caldo;
- raccorderia per impianti criogenici (solo ottoni α);
- applicazioni per stampaggio profondo (bossoli);
- occhiali;
- strumenti musicali.

PREZZO

L'ottone ha **un prezzo pari a circa 3-4 volte quello di un normale acciaio al carbonio.**

DESIGNAZIONE

Gli ottoni vengono designati con la sigla:

P-CuZn39Pb3-C, G-CuZn33Pb2Si-B

dove:

- I numeri indicano la percentuale reale dell'elemento di lega a cui seguono (ad esempio Pb2 indica una percentuale di piombo del 2%);
- P indica che la lega è da deformazione plastica;
- G indica che la lega è da fonderia;
- C indica che la lega è sottoforma di getti;
- B indica che la lega è sottoforma di lingotti.

CUPRALLUMINIO

vs

OTTONE

	CUPRALLUMINIO	OTTONE
COMPOSIZIONE	Rame - Alluminio	Rame - Zinco
PROPRIETÀ GENERALI	<ul style="list-style-type: none">• basso punto di fusione (circa 900°C)• buona deformabilità• elevata fusibilità• elevata colabilità• elevata saldabilità ↑• buona resistenza a fatica ↑• elevata resistenza alla corrosione ↑	<ul style="list-style-type: none">• basso punto di fusione (circa 900°C)• buona deformabilità• elevata fusibilità• elevata colabilità• scarsa saldabilità ↓• scarsa resistenza a fatica ↓• buona resistenza alla corrosione ↓
PROPRIETÀ MECCANICHE (lega base - stato ricotto)	R: 350 ÷ 450 MPa ↑ R _{PO.2} : 120 ÷ 140 MPa ↑ durezza: 120 ÷ 140 HB ↑ E: 120.000 MPa ↑ A%: maggiore del 20%	R: 150 ÷ 350 MPa ↓ R _{PO.2} : 60 ÷ 120 MPa ↓ Durezza: 60 ÷ 120 HB ↓ E: 105.000 MPa ↓ A%: maggiore del 20%
COSTO	5-6 volte acciaio carbonio ↑	3-4 volte acciaio carbonio ↓
IMPIEGHI	<ul style="list-style-type: none">• apparecchi idraulici per alte pressioni• corpi valvola, giranti di pompe e eliche di navi• tubi, lamiere e profilati per l'industria chimica e petrolchimica• cuscinetti e boccole	<ul style="list-style-type: none">• bulloneria• rotismi per orologeria• valvolame, rubinetteria e pezzi stampati a caldo• raccorderia per impianti criogenici (solo ottoni α)• applicazioni per stampaggio profondo (bossoli)• occhiali• strumenti musicali

BIBLIOGRAFIA

- ASM Handbook Committee, *Metals Handbook - Vol. 2*, ASM International 2001
- J.R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys*, ASM International 2001
- M. Crespi, *I bronzi all'alluminio*, Fonderia Pressofusione, Novembre 2008
- Copper Development Association, *Hot Stampings in Copper Alloys*, CDA Publication 103 1994
- E. Gianotti, *Rame e sue leghe: Classificazioni e trattamenti termici*, Trattamenti termici Ferioli e Gianotti
- W. Nicodemi, *Acciai e leghe non ferrose*, Zanichelli 2000
- W.S. Li, Z.P. Wang, Y. Lu, Y.H. Jin, L.H. Yuan, F. Wang, *Mechanical and tribological properties of a novel aluminum bronze material for drawing dies*, Wear vol. 261 2006
- V. Loconsolo, L. Nobili, *Manuale degli Ottoni*, Consedit 1995
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *Rame e leghe di rame: lingotti e getti (UNI EN 1982)*, UNI 2008



Il rame e le sue leghe

Marco V. Boniardi

Andrea Casaroli

Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano
via La Masa, 1 20156 Milano