RAME E SUE LEGHE
Classificazioni e trattamenti termici
Gianotti Elio. Trattamenti Termici Ferioli & Gianotti S.p.A. Torino

Indice

Caratteristiche fisiche *2*
Caratteristiche meccaniche *3*
Leghe rame alluminio (bronzi all'alluminio) *22*
Leghe rame berillio (bronzi al berillio) e rame cobalto berillio *30*
Leghe rame stagno (bronzi) *16*
Leghe rame zinco (ottoni) *7*
Metallurgia del rame *3*
Qualità commerciali di rame *5*
Ricottura del rame *3*
Tabelle *31*
Trattamenti termici degli ottoni *11*
Trattamenti termici dei bronzi *22*
Trattamenti termici dei bronzi all'alluminio *29*

1) Rame puro

È il metallo più utilizzato dopo il ferro. Ha un colore rosso che tende col tempo a diventare sempre più cupo per effetto dell'ossidazione alla quale è soggetto al contatto con l'ossigeno dell'aria. Si trova, anche se raramente, allo stato nativo alla superficie dei giacimenti dei suoi minerali per cui è uno dei metalli più anticamente noti.

2) Caratteristiche chimiche

Numero atomico 29
Peso atomico 63.57
Valenza 2 e 1
Il rame è solubile in acidi ossidanti ed in ammoniaca. Non è solubile, in assenza di aria, negli acidi organici per cui può essere utilizzato in cucina in quanto il vapore d'acqua che si forma durante la cottura dei cibi non lascia arrivare l'ossigeno a contatto del metallo. Non appena terminata la cottura è però necessario travasare i cibi altrimenti il rame non più protetto dal vapore, vi si scioglierebbe con conseguenze deleterie.

3) Caratteristiche fisiche

Peso specifico (rame elettrolitico) 8.92
Punto di fusione 1083°C
Punto di ebollizione 2310°C
Conduttività elettrica di volume a 20°C = 58.00 m / ohm mm^2.
Questo valore viene assunto come unità di misura della conduttività elettrica del rame commerciale, per cui tale conduttività corrisponde a 100% IACS (Internacional annealed Copper sample = valore campione internazionale per il rame ricotto) a 20°C. In pratica, per rami purissimi si possono anche raggiungere valori di conduttività elettrica pari a 101 – 103% IACS. Il limite massimo teorico è di 103.5% IACS pari a 60.0 m / ohm mm^2 le norme stabiliscono che il rame destinato ad usi elettrici non debba avere conduttività elettrica inferiore di 100% IACS.
La conduttività elettrica del rame è seconda solo all'argento ed è notevolmente influenzata dalle impurità.
Stante la natura elettronica del movimento dell'elettricità all'interno dei materiali metallici, è evidente come le impurezze costituiscano degli ostacoli al movimento della nube elettronica stessa.
Anche l'incrudimento diminuisce la conduttività elettrica anche se non in misura troppo sensibile. Il massimo incrudimento su di un rame commerciale può infatti portare ad una diminuzione del 3% della conduttività rispetto al rame ricotto.
Il rame cristallizza nel sistema monometrico e presenta un reticolo cubico facce centrate. È molto duttile e malleabile, si lascia tirare in fili sottilissimi e riduce in fogli di 0.0026 mm di spessore. Dopo l'oro e l'argento è il miglior conduttore di calore.
Il rame entra facilmente in lega con una grande quantità di metalli in proporzioni molto ampie. Quando le aggiunte sono inferiori al 5% (si parla di rami bassolegati, altrimenti di leghe a titolo elevato.
Il rame puro non è adatto ad essere colato in getti perché poco scorrevole e perché origina facilmente getti spugnosi.
Si lavora invece per deformazione a freddo con molta facilità. Solo pezzi molto grandi vengono lavorati fra 650° – 800°C a temperature inferiori (350° – 650°C) o superiori (800° – 900°C) il metallo diventa fragile.

La lavorazione meccanica provoca incrudimento per cui è necessario farla seguire da una ricottura a 600°C.

4) Caratteristiche meccaniche

Il rame ricotto ha le seguenti caratteristiche meccaniche:
R = 21 ÷ 24 Kg / mm^2 Hd 40 ÷ 60 Kg / mm^2.
A = 38 ÷ 60 %
Strizione = 55 ÷ 65%.
La resistenza può salire fino a 40 Kg / mm^2 per i massimi valori di incrudimento, mentre l'allungamento può diminuire fino al 3%. La ricristallizzazione inizia fra 200° - 300°C secondo la purezza e raggiunge i valori ottimali intorno ai 550°C.

5) Ricottura del rame

È l'unico trattamento termico al quale può essere sottoposto il rame puro ed è applicato sia nel caso che debba essere detensionato in seguito a lavorazione meccanica, che nel caso in cui si debba rigenerare la struttura cristallina incrudita da lavorazioni plastiche a freddo (estrusione laminazione ecc.). Si è già visto che la temperatura migliore è 550°C ed a tale temperatura deve essere tenuto il tempo minimo indispensabile perché si uniformizzi, dopo di che può essere raffreddato sia all'aria, sia, ancor meglio in acqua. Se si desidera conservare la brillantezza del rame è necessario che il ciclo avvenga in atmosfera controllata in forni a tenuta o addirittura sottovuoto. A tale scopo si possono utilizzare gas puri, ad es. azoto o atmosfere ricavate dalla combustione "di idrocarburi" più o meno completa (es. esogas).

6) Metallurgia del rame

I minerali di rame utilizzati per l'estrazione del metallo sono prevalentemente dei solfuri di rame e ferro (piriti cuprifere).
Più raramente, perché meno frequenti in natura, i minerali di partenza sono ossidi di rame.
Si può affermare che circa l'80% del rame viene ottenuto partendo da minerali solforati, mentre solo il 15% viene ottenuto da ossidi.
I minerali di partenza sono sempre molto poveri di rame. Le piriti cuprifere hanno normalmente solo l'1 – 2% di rame.
E' necessario dunque arricchire il minerale prima di passare al processo metallurgico vero e proprio, separando mediante flottazione, il solfuro dal materiale inerte o ganga.
Il processo di flottazione consiste nel frantumare e polverizzare il minerale di partenza, immergendolo poi in soluzioni acquose di sostanze speciali (oli di catrame di pino, la difeniltiourea per i solfuri oppure acidi grassi, saponi per gli ossidi).
In queste soluzioni si insuffla dell'aria che forma una schiuma abbondante nella quale restano inglobati i granuli di minerale metallifero, mentre la ganga va a fondo o resta sospesa nell'acqua.
Asportando continuamente la schiuma e filtrandola si ottengono dei minerali arricchiti e quindi sottoponibili ai processi di elaborazione termica. La separazione mediante flottazione è dovuta alla maggiore o minore capacità di bagnarsi delle diverse sostanze in presenza di specifici tensioattivi.
Ad es. i granuli metallici vengono bagnati dagli oli più facilmente che dall'acqua per cui, ricoperti di una pellicola oleosa aderiscono più facilmente alle bollicine di aria insufflata e vengono portati in superficie nella schiuma.

Ottenuto un minerale a concentrazione sufficiente si passerà al processo metallurgico vero e proprio. Tenendo conto della preminenza dei minerali solforati verrà limitato a questi l'esame dei trattamenti preparatori alla raffinazione.
Lo schema di tali trattamenti può essere così elencato:

- Fusione a metallina che si suddivide in due parti: arrostimento desolforante, fusione susseguente.
- Conversione della metallina in rame nero (blister) che può essere preceduta da una Conversione parziale per arricchire la metallina.
- Raffinazione del rame grezzo che può essere termica od elettrolitica.

L'arrostimento preventivo, che non sempre viene effettuato, si realizza in forni o a griglia mobile o rotativi. Se il tenore di zolfo è inferiore al 40% è necessario scaldare il forno con bruciatori a malta o carbone.
Le piriti arrostite che devono ancora contenere un tenore di zolfo sufficiente vengono successivamente fuse in presenza di silice.
Durante questa funzione l'ossido di ferro scorifica come silicato combinandosi con la silice, mentre il rame meno affine all'ossigeno del ferro resta come solfuro nel bagno. Alla fine di questo processo durante il quale viene insufflata aria per spingere al massimo la scorificazione del ferro come ossido gran parte sarà stato eliminato come silicato, mentre quello restante sarà combinato come solfuro e si troverà mescolato al solfuro di rame.
Questa miscela, che si può indicare chimicamente con la formula $Cu_2S \cdot n\ Fe\ S$ viene chiamata metallina ed ha una concentrazione in Cu del 45 ÷ 50%.
La metallina viene "convertita" in rame greggio o "rame nero" in forni che hanno una analogia con i convertitori Bessumer per acciaio. In questi forni infatti viene insufflata aria nella metallina fusa ad una altezza tale per cui l'aria gorgoglia attraverso la metallina ma non attraverso il rame fuso che si raccoglie al fondo del convertitore. Il ferro viene eliminato come ossido che si combina a silicato con la silice immessa nel ferro, successivamente inizia l'ossidazione dello zolfo del solfuro di rame con sviluppo di gas SO_2 e formazione di rame che si stratifica al fondo.
Il rame così ottenuto ha un titolo compreso fra il 95 e il 97% ed è generalmente impuro per Fe (0.5 ÷ 1.5%) Pb (0.2 ÷ 1.2%) Zn (0.4 ÷ 1.5%) Ni (0.4 ÷ 0.9%) S (0.6 ÷ 0.8%) con piccole quantità di Au e Ag.
Questo rame viene colato in lingottiere a forma di piastre e durante la solidificazione sviluppa bolle di gas SO_2 che restano inglobate dando un aspetto spugnoso alla massa. Questo rame viene chiamato "blister" appunto perché in inglese tale parola ha significato di bolle, vesciche.
Il rame blister non può essere utilizzato perché troppo impuro. E' necessario procedere quindi alla raffinazione.
La raffinazione termica del rame nero viene effettuata mediante rifusione del metallo in ambiente ossidante. Le impurezze in parte si ossidano e scorificano, in parte volatilizzano. Anche parte del rame si ossida a Cu_2O che resta nel metallo. Per eliminarlo è necessario far seguire al periodo ossidante un periodo riducente. Si introducono allora nel bagno dei pali di legno verde che, provocando uno sviluppo di gas riducenti, rimescolano il bagno e riducono il Cu_2O a Cu. L'operazione viene ripetuta più volte fino ad ottenere un titolo di 99 ÷ 99.3% in Cu.
Il rame così ottenuto è chiamato "rame rosetta" per purezze superiori si ricorre in genere alla raffinazione elettrolitica.
Il metallo viene colato in forme che devono fungere da anodi, mentre i catodi sono costituiti da sottili lamine di rame elettrolitico. L'elettrolita è costituito da solfato di rame in acido solforico. Si elettrizza con una differenza di potenziale di 0.25 ÷ 0.45 volt, una densità di corrente di 150 ÷ 250 Amper / mm^2 ad una temperatura di 50°C ÷ 55°C.
Tali parametri vanno accuratamente controllati per evitare che con il rame si depositino al catodo le impurezze.
Il rame così ottenuto ha delle purezze superiori al 99.9%.

Oltre ai processi termici esistono dei processi di estrazione del Cu per via umida. Quasi sempre si parte da ossidi di Cu che vengono portati in soluzione con acqua od acido solforico diluito; a volte questa soluzione viene ottenuta direttamente in miniera. Nella soluzione di solfato di rame comunque ottenuta si immettono dei rottami di ferro. Per la diversa posizione nella serie elettrochimica degli elementi del ferro e del rame si ha una precipitazione del Cu sul ferro ed il ferro entra in soluzione come solfato di ferro. Il rame così ottenuto, impuro per ferro, deve essere sottoposto a raffinazione. Il processo è chiamato "cementazione" ed il rame così ottenuto "cemento di rame".

7) Qualità commerciali di rame

Il rame tecnologico presenta delle impurezze che possono essere addebitate sia a depurazione insufficiente dei minerali usati nella fabbricazione, sia ad elementi aggiunti volontariamente o meno durante l'elaborazione del metallo stesso.
Appartengono alle prime il Fe, Al, Pb, Zn, Ni, S .
Fra le seconde la più importante può essere considerata l'ossigeno combinato sotto forma di ossidulo di rame (Cu_2O).
Il contatto del bagno fuso di rame con l'aria è già sufficiente perché una parte di esso solidifichi originando una ragnatela di eutettico (Cu – Cu_2O) ai bordi dei grani di Cu. Normalmente l'ossigeno che si combina col rame liquido varia dallo 0.05 al 0.11% cui corrisponde una concentrazione di Cu_2O dello 0.5 ÷ 1%. Il Cu_2O in concentrazioni superiori allo 0.9% forma a 1063°C un eutettico col 3.4% di Cu_2O (= 0.39% di ossigeno).
A tale combinazione cominciano a degenerare le proprietà meccaniche del metallo.
In quantità contenute quindi la presenza di O_2 nel rame non genera decadimenti fisici o meccanici sensibili, ma l'O_2 diventa ugualmente nocivo allorché il rame debba subire riscaldi in atmosfera di idrogeno per saldobrasature o ricotture prolungate a temperature superiori a 500°C.
In questo caso l'idrogeno diffondendo nel metallo, si combina con l'ossigeno dell'eutettico formando vapore d'acqua che genera rigonfiamenti ed interrompe la continuità delle giunzioni cristalline. Si genera una struttura fragile che impedisce l'utilizzo del metallo.
Qualora sia necessario utilizzare il rame in ambiente di idrogeno a caldo è quindi indispensabile averlo esente da ossigeno. Vari sono i procedimenti per ottenerlo tale. La colata sotto vuoto è quella che garantisce il prodotto migliore anche implica impianti particolarmente costosi.
Normalmente quindi la disossidazione si effettua con aggiunte al bagno fuso di rame di energici disossidanti quali fosforo, litio, sodio. Questi elementi, avendo una affinità per l'O_2 superiore a quella del rame si combinano ad esso e diventano scoria che viene eliminata. Per ottenere una disossidazione totale è necessario aggiungere un leggero eccesso di disossidante, per cui a fusione ultimata il rame risulterà impuro per questo elemento.
Normalmente, per ragioni di economicità, l'elemento disossidante più usato è il P, che però è anche uno degli elementi più nocivi per la conduttività elettrica. Raramente quindi il rame disossidato al P, viene usato per applicazioni elettriche, infatti la conduttività elettrica anche per tenori molto bassi di P (0.04 – 0.012%) si aggira sul 95% IACS.
In base a queste brevi considerazioni, ed ai metodi di elaborazione del metallo precedentemente visti è possibile suddividere le varie qualità di rame ottenibili industrialmente secondo una classificazione che tenga conto sia dell'elaborazione, sia delle sue caratteristiche chimico – fisiche – meccaniche.
Le qualità di rame puro commercialmente importanti, classificati qui di seguito secondo le sigle americane, sono sei:

Cu – EPT Rame raffinato elettroliticamente; purezza 99.9% dm. Conduttibilità elettrica allo stato ricotto > 100% IACS.
Adatto per usi elettrici Non dissodato.

Cu – FRCH Rame raffinato a fuoco. Conduttività elettrica allo stato ricotto > 100% IACS.
Adatto per usi elettrici. Non dissodato.

Cu – FRTP Rame raffinato a fuoco; purezza 99.8 Cu.
Conduttività elettrica allo stato ricotto 85 – 95% IACS.
Adatto per usi meccanici, non elettrici. Non dissodato.

Cu – EF Rame esente da ossigeno perché colato sottovuoto o in gas inerte. Conduttività elettrica allo stato ricotto >100% IACS. Adatto per applicazioni elettriche anche quando debba essere saldato o debba lavorare a temperature alte in ambiente riducente.

Cu – DLP Rame disossidato a basso tenore di fosforo (P = 0.04 – 0.012%). Purezza 99.9% Cu.
Conduttività elettrica allo stato ricotto > 85 – 98% IACS.
Adatto per usi meccanici, anche quando debba subire saldature. Raramente usato per Applicazioni elettriche.

Cu – DHP Rame disossidato ad alto tenore di fosforo (P = 0.13 – 0.05%). Purezza 99.8% Cu.
Adatto per usi meccanici, anche quando debba subire saldature.
Conduttività elettrica allo stato ricotto 70 – 90% IACS.

Rame bassolegato

Vengono commercialmente definite con questo nome le leghe di rame con alcuni elementi in lega in tenori molto bassi.
Tra le principali si possono elencare le seguenti:

Rame all'argento

Può essere suddiviso in rame a basso contenuto di Ag (0.02 ÷ 0.12%) e rame ad alto contenuto di Ag (0.12 ÷ 0.25%) (vedi tab. UNI 5643 – 73).
Il rame a basso contenuto di Ag può ancora essere suddiviso in rame con ossidulo e rame senza ossidulo.
Il rame all'argento pur conservando ancora elevate conduttività elettrica, essendo l'argento uno dei metalli che influisce meno su di essa, ha il vantaggio rispetto al rame puro di avere un punto di ricristallizzazione più elevato di questo. Infatti se il rame ricristallizza già a 175°C il rame all'argento non inizia il fenomeno che a 300°C, per cui è particolarmente adatto per quelle applicazioni nella quali anche dopo la brasatura dolce il rame debba conservare elevata resistenza meccanica (es. di radiatori per automobili, collettori di dinamo ecc.).
Il tipo di rame all'argento senza ossidulo evita gli inconvenienti della fragilità per saldature in ambiente di idrogeno.

Rame al Cadmio

Con contenuto di Cadmio pari a 0.5 ÷ 1.5%. Si creano le stesse caratteristiche dell'Ag, per cui può essere utilizzato nelle medesime applicazioni. In più il rame al Cd possiede dopo incrudimento una elevata resistenza all'usura ed allo scintillio elettrico che ne fanno un ottimo materiale per linee elettriche tranviarie e ferroviarie.
Anche se il Cd, con l'Ag, influisce molto poco sulla caduta della conduttività, in concentrazione dell'1% questa scende a 80 ÷ 90 IACS.

Rame al Cadmio e Stagno (Bronzo telefonico)
Contenuto di Cd: 0.2 ÷ 1.0% Sn : 0.2 ÷ 1.0%.
L'aggiunta dello Sn oltre al Cd aumenta ancora la resistenza meccanica ed all'usura per cui è un materiale utilizzato largamente nelle linee elettriche e telefoniche.
La resistenza meccanica si aggira sui 50 ÷ 54 Kg/mm^2 mentre l'allungamento su 5 Ø varia dallo 0.5 a 4%.

Rame al cromo
Contenuto di cromo 0.3 ÷ 1.2%.
È una lega da bonifica per riprecipitazione del soluto dopo tempra di soluzione (vedi leghe leggere).
Dopo questo trattamento ha una grande resistenza meccanica che conserva fino a 400 ÷ 500°C.
Oltre alle solite applicazioni (lamelle di collettori per dinamo) questa lega viene utilizzata nella costruzione di elettrodi per macchine di saldature a punti e continua.

Rame allo zirconio
Contenuto di Zr 0.1 ÷ 0.25% .
Come il rame al Cr è una lega da bonifica, ma la resilienza ed una conduttività elettrica superiori a questo.

Rame allo zolfo e rame al tellurio
Con contenuti di S = 0.2 ÷ 0.5% e T = 0.3 ÷ 0.8%.
Utilizzati nella fabbricazione di pezzi destinati alle lavorazioni meccaniche di serie. Infatti il tellurio e lo zolfo finemente dispersi nel Cu hanno la funzione di far rompere i trucioli di rame facilitandone la lavorazione all'utensile.

Rame all'arsenico disossidato al fosforo
Con contenuto di As = 0.15 – 0.50% ; P 0.013 – 0.05%.
L'As e il P abbassano notevolmente la conduttività elettrica, ma l'utilizzazione di questo rame è limitata alle applicazioni in parti soggette al calore che debbano resistere all'ossidazione a caldo (Es. piastre di focolari, bruciatori).

8) Leghe rame zinco (ottoni)

Le leghe rame zinco sono comunemente chiamate ottoni. Quando in lega entrano esclusivamente due elementi si parla di ottoni binari, altrimenti, se entrano anche altri elementi di alligazione, si parla di ottoni speciali.

Ottoni binari
Gli ottoni binari possono avere un numero assai elevato di composizioni. Nell'utilizzo industriale entrano però in pratica tre grandi gruppi:
- ottone 70% Cu, 30% Zn per lavorazioni meccaniche a freddo (tubi di condensazione, cartucce, lamiere da stampaggio profondo, ecc…);
- ottone 67% Cu, 33% Zn per getti in genere;

- ottone 60% Cu, 40% Zn o metallo Muntz per lavorazioni di deformazione plastica a caldo (stampaggio, fucinatura, estrusione).

Con l'aumentare del tenore di Zn aumenta la durezza e la resistenza della lega, per contro diminuisce la plasticità, la conduttività elettrica e termica.

Diagramma di stato

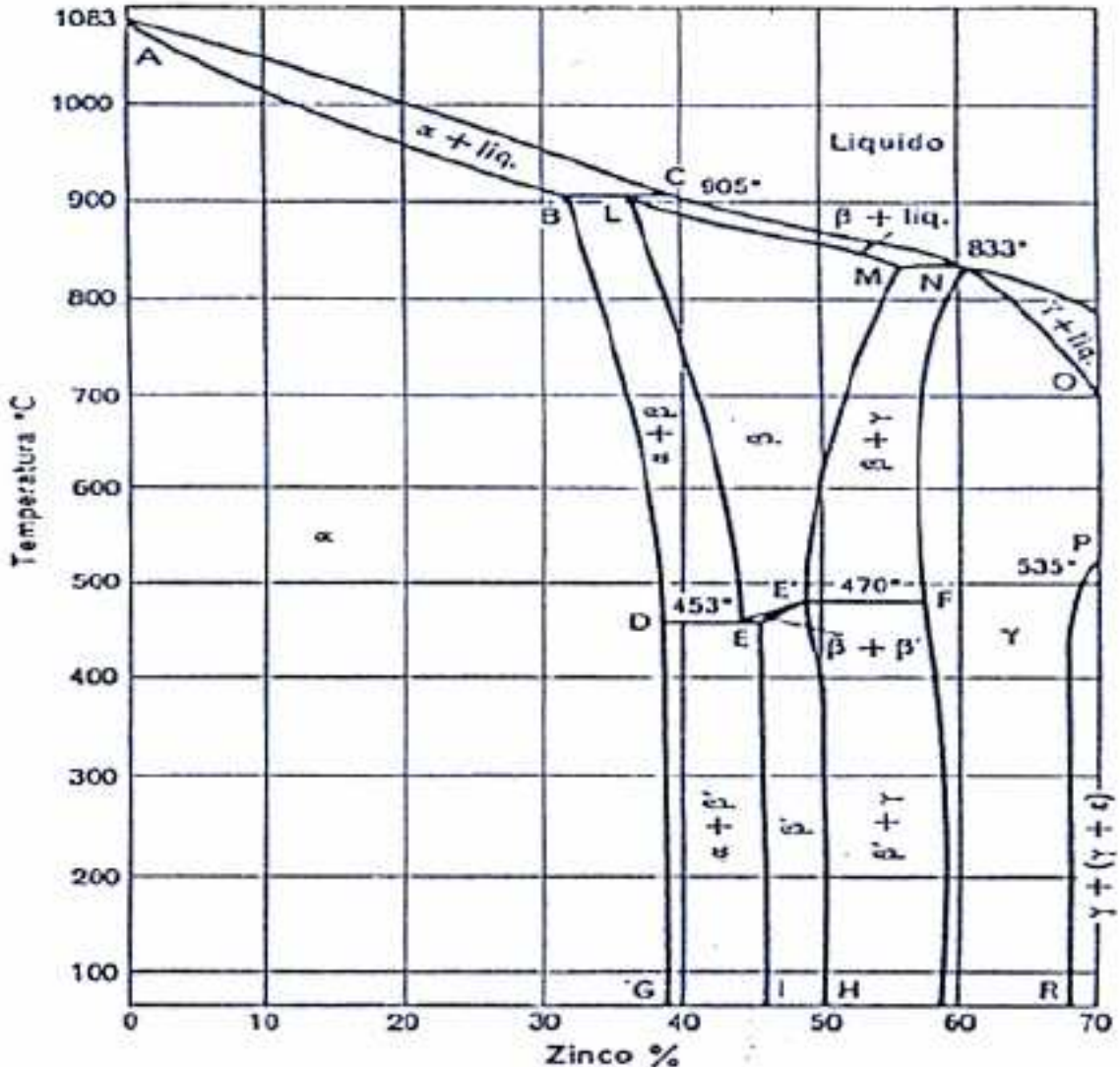

Fig.1 Diagramma di stato rame-zinco.

Il diagramma di stato rivela la presenza nello stato solido di 3 fasi distinte α, β, γ.

La fase α è costituita da soluzione solida di sostituzione. In essa infatti il reticolo cristallino conserva ancora la struttura cubica a facce centrate del rame, nella quale alcuni atomi di rame sono stati sostituiti da altrettanti atomi di Zn. La fase α conserva ancora una buona plasticità a freddo.

La fase β è costituita da una soluzione solida di Zn in Cu nella quale però il reticolo cristallino del Cu si è trasformato da cubico a facce centrate in cubico a corpo centrato per permettere una maggior ricettività di atomi di Zn. La fase β può esistere in due forme: la prima chiamata β', in cui la struttura è ordinata, cioè gli atomi di Zn sono presenti secondo una successione regolare,

ed è stabile da temperatura ambiente fino a valori di circa 450°C. Questa fase è dura e non si presta facilmente a deformazioni plastiche. A 450°C la fase β' si trasforma nella fase β vera e propria che assume una configurazione disordinata degli atomi di Zn e diventa molto plastica e duttile. Gli atomi contenenti la fase β sono quindi essenzialmente ottoni da deformazione plastica a caldo.
La fase γ non presenta alcun interesse pratico per le dannose proprietà meccaniche che induce negli ottoni dove è presente.
Gli ottoni saranno quindi sempre costituiti da fase α o da fase α + β in quantità variabili. Le proprietà meccaniche dei due costituenti a temperatura ambiente sono opposte e complementari. La fase α è duttile e plastica a freddo ma dotata di poca resistenza, mentre la fase β non è duttile a freddo ma con elevata durezza e resistenza meccanica.
Gli ottoni nei quali sono presenti le due fasi avranno quindi proprietà meccaniche variabili in proporzione alla presenza percentuale delle due fasi.
Analizzando il diagramma di stato è possibile verificare le composizioni percentuali delle varie fasi e giustificare la prima suddivisione degli ottoni binari effettuata in precedenza.
Gli ottoni contenenti Zn fino al 30% sono sicuramente nella zona della fase α per cui sono adatti per lavorazioni di imbutitura profonda. In Italia, per motivi economici, fra questi ottoni viene anche compreso l'ottone Cu Zn 33.
Con tenori di Zn oltre 35% si rientra decisamente nel campo delle strutture bifasiche che interessa gli ottoni con Zn fino al 39% circa. Con questa categoria di leghe la struttura si deve ritenere strettamente legata alle temperature ed alle velocità di raffreddamento. Nel raffreddamento di solidificazione infatti la lega, appena al di sotto della linea solidus, vede la presenza delle due fasi α + β. Se il raffreddamento avviene però molto lentamente nel passaggio attraverso la linea BG si ha una trasformazione della fase β in α e lega diventa omogenea. Questo passaggio, per rispettare le condizioni di equilibrio, dovrà essere lentissimo, per cui nella pratica della fonderia, anche col raffreddamento in staffa, si avranno sempre a temperatura ambiente quantità più o meno notevoli di fase β. Se questa lega così ottenuta viene sottoposta ad un successivo riscaldo si possono verificare due situazioni diverse: il riscaldo viene limitato al di sotto della linea BG, ed è il caso della ricottura di ricristallizzazione, oppure viene spinto oltre nell'intento di omogeneizzare la struttura.
Nel primo caso per ottenere la completa trasformazione della residua fase β in α i tempi sono lunghi soprattutto per la temperatura relativamente bassa. Il raffreddamento però può essere veloce, all'aria o nell'acqua, per evitare la trasformazione lungo la linea GK che porterebbe a nuova precipitazione della fase β' fragile.
Nel secondo caso il riscaldo oltre la linea BG dovrà avere lunghe durate, tali da emettere la omogeneizzazione della struttura e la creazione di un equilibrio stabile delle fasi a quella temperatura, dopo di che dovrà seguire un raffreddamento lentissimo, almeno intorno alla temperatura della trasformazione indicata dalla linea BG, per permettere la totale trasformazione della fase β in α.
A temperature più basse, vicino all'equilibrio segnato dalla linea GK il raffreddamento sarà più veloce (aria) al fine di mantenere in equilibrio instabile a temperatura ambiente la struttura completamente costituita dalla fase α.
Con tenori di Zn oltre il 40%, fino al 46%, si entra decisamente nel campo delle fasi α + β'. La presenza della fase β', non eliminabile in questo caso come per gli ottoni sopra visti con accorgimenti termici, fa si che questi ottoni non siano deformabili a freddo. La lavorazione plastica deve avvenire a caldo, oltre la temperatura di trasformazione β – β' che si trova a circa 450°C.
L'ottone Muntz (Cu Zn 40) che è il più conosciuto fra quelli di questa categoria viene normalmente stampato a temperature superiori a 750°C. le caratteristiche meccaniche, specie la durezza, sono assai elevate a temperatura ambiente per la presenza della fase β'.

Aumentando ancora il tenore di Zn si entra nel campo degli ottoni ad unico costituente β'. Essendo queste leghe estremamente fragili, non sono praticamente utilizzate. L'unica applicazione di rilievo è l'utilizzo come lega per brasature visto il suo intervallo di solidificazione abbastanza ristretto e la sua temperatura di fusione piuttosto bassa.

Ottoni speciali

Quando agli ottoni binari si aggiungono altri elementi quali lo Sn, il Mg, il Fe, il Si, il Ni, l'Al, ecc., per conferire loro proprietà particolari di resistenza meccanica o alla corrosione, si parla di ottoni speciali. L'aggiunta di tali elementi, oltre a modificare le caratteristiche chimico-meccaniche della lega, ne modificano l'equilibrio strutturale per cui, a parità di tenore di Zn, alcuni elementi sposteranno la lega verso presenze maggiori di fase β, mentre altri elementi andranno in senso opposto.

È come se, in altre parole, alla lega si aggiungesse o si togliesse dello Zn.

La modificazione della struttura non è uguale per ogni elemento, ne esistono cioè di più o meno attivi, per cui, prendendo come unità di misura la variazione del diagramma di stato che esercita lo Zn, si può affermare ad esempio che ogni 1% di Al influisce come se si fosse aumentato del 6% il tenore dello Zn nella lega, ogni 1% di Ni influisce come se si fosse diminuito dell'1.3% il tenore dello Zn nella lega.

Queste influenze sul diagramma di stato degli elementi aggiunti negli ottoni speciali ha creato il concetto, espresso dal Guillet, del "titolo fittizio" della lega determinato con i "coefficienti di equivalenza" degli elementi aggiunti.

La tabella seguente dà i valori dei "coefficienti di equivalenza" degli elementi che più frequentemente concorrono negli ottoni speciali:

Si	Al	Sn	Mg	Pb	Mn	Fe	Ni
10%	6%	2%	2%	1%	0.9%	0.5%	-1.3%

La struttura di un ottone CuZn28Al2 sarà quindi determinata secondo il rapporto: $(28+2\cdot6)/(70+28+2\cdot6) = 40/110 = 36.4\%$. La lega si œmporta come se avesse un titolo in Zn del 36.4% e di Cu del 63.6%.

Come si nota dalla tabella quasi tutti i coefficienti di equivalenza sono positivi per cui gli ottoni speciali tenderanno ad assumere struttura α + β o addirittura β. Quando l'elemento aggiunto è in quantità tale da superare la sua solubilità nella lega, la parte eccedente resterà indisciolta o formerà dei composti intermetallici. Sono generalmente queste nuove fasi che costituiranno il presupposto per i trattamenti di bonifica in alcuni ottoni speciali. L'aggiunta di elementi speciali nell'ottone non provoca soltanto lo spostamento dell'equilibrio strutturale delle fasi, cosa questa che si potrebbe ottenere assai più comodamente ed economicamente con aggiunta di Zn, ma conferisce alla lega proprietà particolari non altrimenti ottenibili.

Gli elementi più comunemente aggiunti con le specifiche proprietà che conferiscono sono i seguenti:

Ferro: aumenta la durezza e la resistenza dell'ottone affinandone il grano cristallino. Si aggiunge in quantità variabili dallo 0.5 al 2% sottoforma di leghe ferro-rame, ferro-zinco o ferro-stagno in tenori superiori allo 0.5% precipita come fase separata che rende particolarmente corrodibile la lega.

Manganese: agisce come il ferro affinando il grano cristallino. Li aggiunge in tenori del 2÷3% ed ha una energica azione disossidante.

Alluminio: aumenta la resistenza meccanica e la durezza; migliora la resistenza alla corrosione. Si aggiunge in tenori fino al 3%. È un energico disossidante ed aumenta la plasticità a caldo. I migliori risultati si ottengono con aggiunte contemporanee di Fe e Al.

Silicio: ha effetto analogo all'alluminio ma ancora più accentrato. Si aggiunge sottoforma di rame-silicio. Col 5% di silicio l'ottone diventa durissimo (180-200 Brinell) e può costituire un ottimo materiale per costruzione di bronzine in sostituzione del bronzo da cuscinetti al 16% di Sn, più costoso e meno duro e resistente.

Stagno: aumenta la resistenza alla corrosione all'acqua di mare. Gli ottoni con tenore dell'1% circa di stagno sono chiamati "ottoni normali".

Nichel: aumenta la tenacità dell'ottone e ne facilita colabilità. Entra in lega in tutte le percentuali ed aumenta la resistenza alla corrosione chimica.

Arsenio-Antimonio-Bismuto: vanno considerate come impurezze e quindi debilitanti le caratteristiche della lega. Possono essere tollerate solo in tracce negli ottoni di buona qualità.

Piombo: il piombo non entra in lega con le leghe di ottone e ne peggiora, anche se finemente ripartito, le caratteristiche meccaniche. Viene comunemente aggiunto per aumentare la lavorabilità degli ottoni alle macchine utensili in quanto il piombo esplica una duplice azione: favorisce la rottura del truciolo che se finemente sminuzzato non crea difficoltà nella lavorazione alle macchine utensili automatiche, ed esplica una azione lubrificante favorendo velocità di taglio molto elevate.
Si è già detto che il Pb non entra in soluzione, almeno a temperatura ambiente, nell'ottone; a temperature elevate però, quali quelle dello stampaggio a caldo tende a fondere infragilendo la matrice nella quale è contenuto. Per questo motivo gli ottoni da stampaggio a caldo avranno sempre tenori contenuti di Pb.
L'applicazione degli ottoni al Pb è dunque esclusivamente riservata alla lavorazione alle macchine utensili per cui vengono anche chiamati ottoni da torneria.
Quando vengono usati nello stampaggio a caldo è esclusivamente, perché i pezzi dopo tale lavorazione dovranno ancora subire lavorazioni meccaniche.
Gli ottoni da torneria sono generalmente forniti come barre incrudite e distese, mentre gli ottoni da stampaggio a caldo sono forniti come barre estruse.
Gli ottoni al Pb possono subire rivestimenti galvanici (nichelatura, cromatura, ecc.) ma è necessario in questo caso che il tenore di Pb sia basso e soprattutto che sia distribuito uniformemente e finissimamente nella matrice, per evitare fenomeni non accettabili, come le superfici a buccia d'arancio.

Gli ottoni speciali si possono dividere in due grandi classi:
- ottoni resistenti alla corrosione;
- ottoni ad alta resistenza.

Fra i primi gli ottoni all'alluminio ed allo stagno che quando devono resistere a condizioni gravose vendono "stabilizzati" con aggiunte di 0.02-0.06% di As, P o Sb che impediscono la dezinchificazione.
I secondi, contenenti Al, Fe, Sn e Mn sono impropriamente chiamati bronzi al manganese (vedi tabella classificazione ottoni, UNI 6138-68/6139-68).

9) Trattamenti termici degli ottoni

Ottoni α (con Zn fino al 33%)

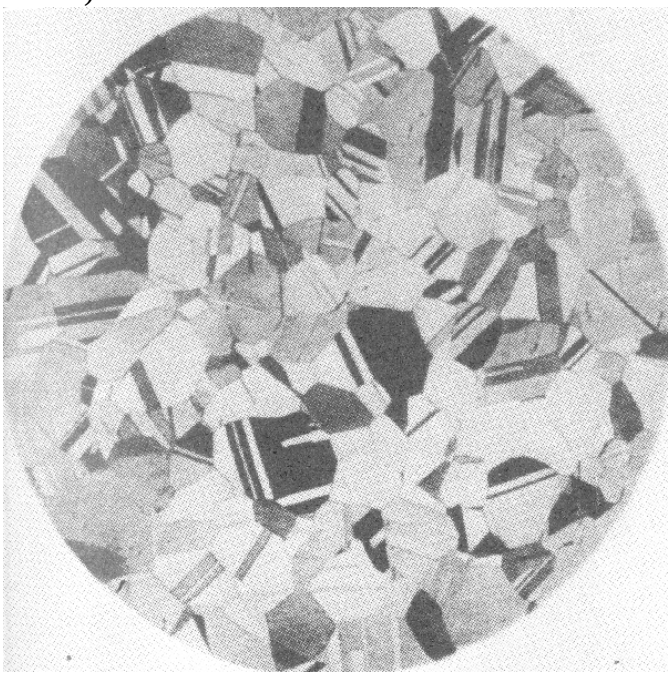

Fig.2 Micrografia di ottone α

Dal diagramma di stato risulta evidente come gli ottoni α non possano subire trasformazioni di fase per variazioni di temperatura, per cui questi tipi di lega non sono assoggettabili ai trattamenti di tempra: né alla tempra di fase, né alla tempra di soluzione.
L'unico trattamento al quale può essere assoggettato l'ottone α è la ricottura di ricristallizzazione sul materiale incrudito. Si tratta in questo caso generalmente di ripristinare la malleabilità a lamiere o barre lavorate a freddo al fine di poter ulteriormente procedere a lavorazioni di deformazione, o di poterle utilizzare detensionate.
Nel diagramma sotto riportato appare l'andamento delle proprietà meccaniche di un ottone incrudito sottoposto a riscaldo di ricottura nella prima fase, fino a 270÷280°C, non si notano variazioni apprezzabili di proprietà, ed è la fase che corrisponde al "recovery" della struttura cristallina. I cristalli deformati subiscono in questo intervallo di temperatura un riassetto del reticolo che tende a riassumere le distanze atomiche regolari e provoca l'eliminazione delle coazioni elastiche di tutta la struttura. È questo un trattamento di grande utilità pratica perché, pur non alterando le caratteristiche meccaniche specifiche del materiale incrudito, sufficiente per impedire il fenomeno delle "cricche di stagionatura" caratteristiche dell'ottone messo in opera incrudito. Si tratta di crepe che si formano, apparentemente in modo spontaneo, ed in modo più o meno profondo ed esteso, fra i grani cristallini della lega originando notevoli inconvenienti (vedi figg. 4 e 5).
Per accertare la tendenza alle cricche di stagionatura sia su ottoni incruditi che su ottoni stabilizzati (per verificarne l'effettivo detensionamento) si esegue la prova al nitrato di mercurio.
Una provetta del materiale semilavorato lunga 152 mm, oppure lunga 2 volte il Φ o la distanza minima fra due lati paralleli (scegliendo la dimensione maggiore) deve poter resistere senza incrinature, dopo la pulizia ad una immersione per 30' in una soluzione acquosa contenente 10 grammi di nitrato di mercurio e 10 cm^3 di acido nitrico (pOH 1.42) per litro di soluzione, usando almeno 10 cm^3 di soluzione per ogni 645 mm^2 dell'area della superficie della provetta.

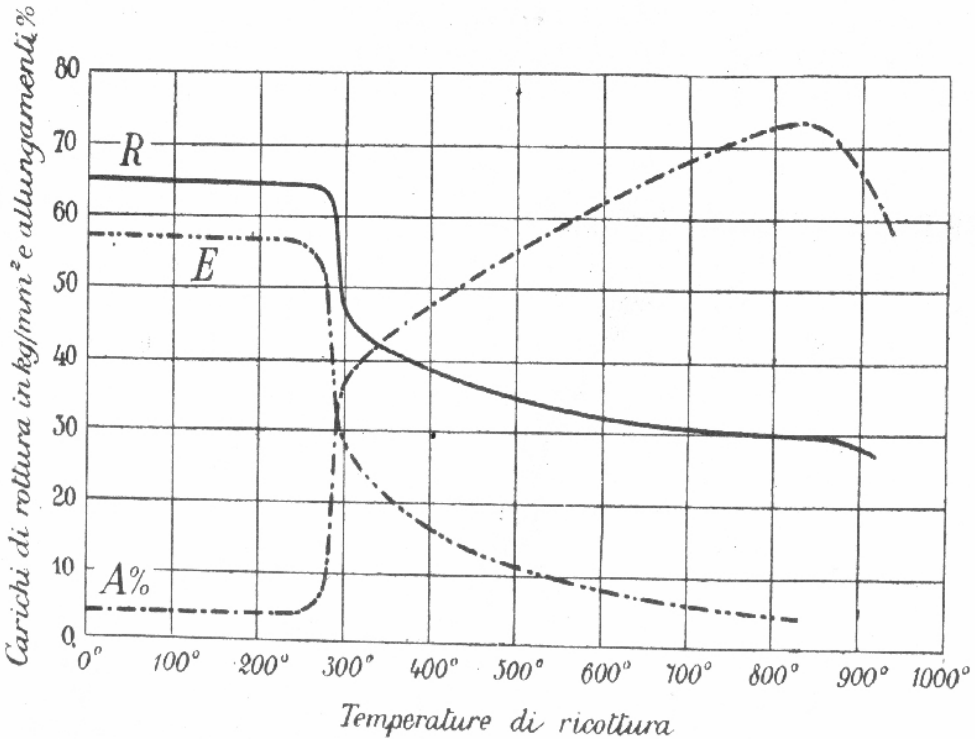

Fig.3 Proprietà meccaniche dell'ottone incrudito in funzione della temperatura di ricottura

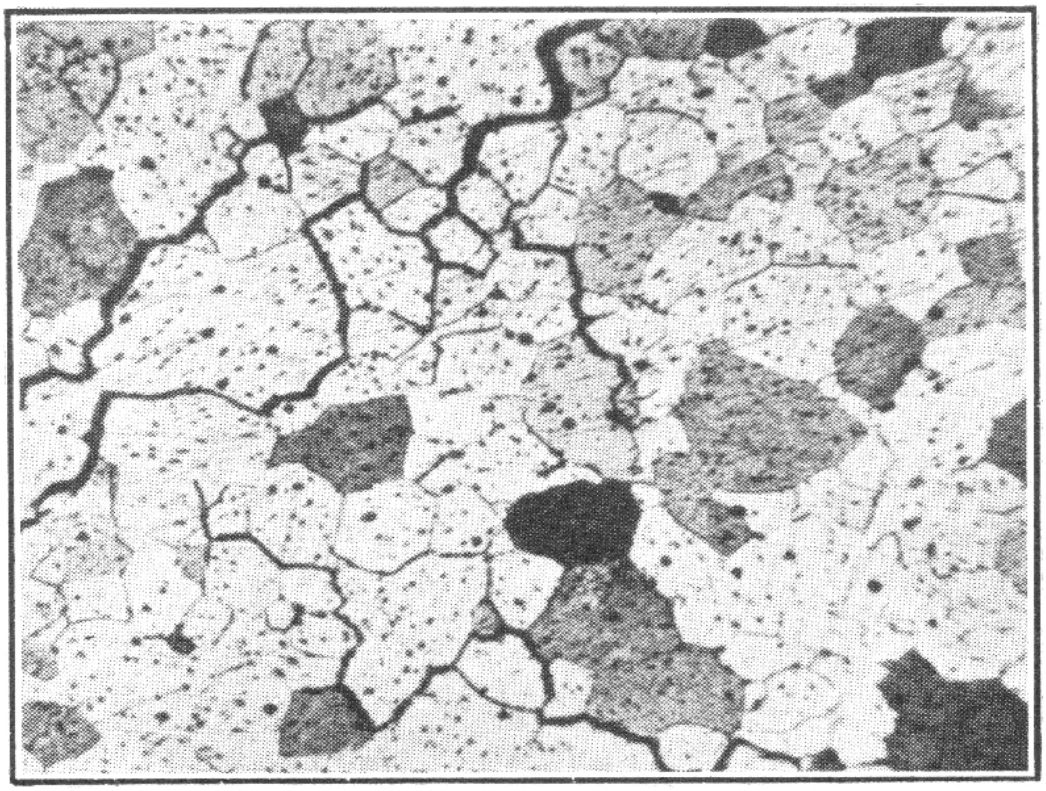

Fig.4 Cricche di stagionatura

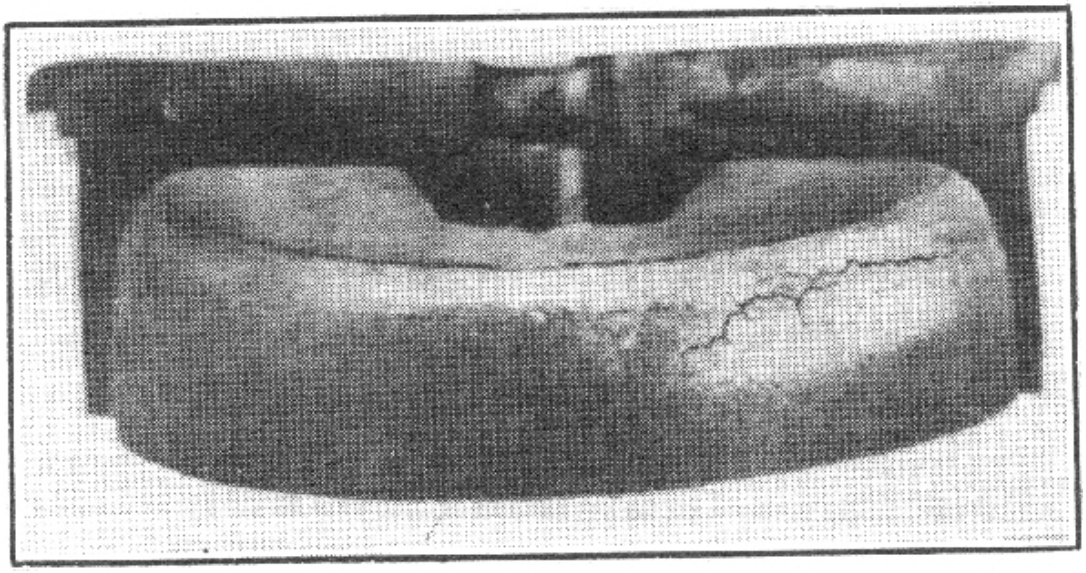

Fig.5 Cricche di stagionatura

Procedendo nel riscaldo di ricottura si nota una diminuzione della resistenza del limite elastico ed un aumento dell'allungamento fino a dei valori limite ottenuti a temperature di circa 800°C. a queste variazioni delle caratteristiche meccaniche corrispondono variazioni della struttura cristallina sempre più notevoli all'aumentare della temperatura. Alla temperatura di 300°C circa infatti inizia la formazione dei primi nuclei cristallini, che si formano prevalentemente ai confini dei grani deformati. Man mano che la temperatura aumenta questi grani cristallini tendono ad accrescersi a spese dei vicini cristalli deformati fino a creare una struttura cristallina completamente rinnovata e totalmente priva di tensioni a temperature prossime agli 800°C. Oltre questa temperatura le proprietà meccaniche tendono a decadere soprattutto per l'aumento delle dimensioni del grano cristallino.
Normalmente la ricottura si effettua a 700°C, temperatura alla quale l'addolcimento è già vicino al limite massimo e l'ossidazione non è però ancora troppo spinta.

<u>Ottoni α+β</u> (con Zn fino al 39% circa)

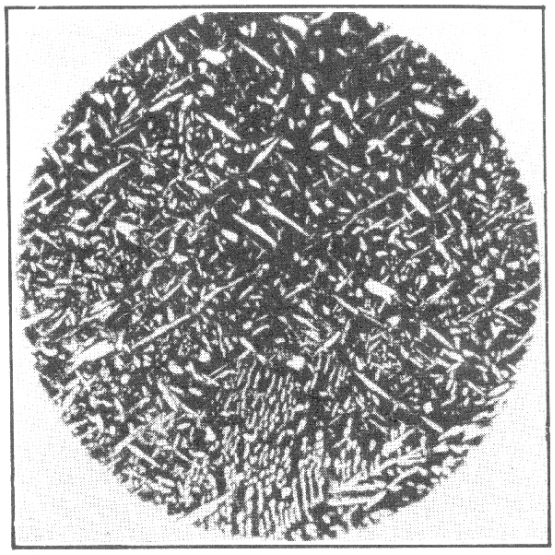

Fig.6 Micrografia di ottone α+β

Dal diagramma di stato appare evidente come per questi ottoni esistano possibilità di variazione di fase in funzione della temperatura e quindi come possano esistere possibilità di trattamenti termici non solo di ricottura, ma anche di tempra.

- Ricottura

  La ricottura per queste leghe può avere una duplice funzione:

  a) ricottura di omogeneizzazione per rendere la lega completamente α e quindi deformabile plasticamente a freddo (trattamento, questo, già visto a livello di diagramma di stato);
  b) ricristallizzazione della lega incrudita per deformazione plastica quando questa sia già stata a suo tempo ricotta fino ad ottenere una fase α omogenea.

  Il trattamento a) comporta un riscaldo della lega a temperatura tale da inserirla completamente nel campo α e un mantenimento a tale temperatura per un tempo sufficiente a permetterne la completa trasformazione. Più la temperatura sarà alta, compatibilmente con la traccia della linea BG, e più la permanenza sarà breve. A questo riscaldo dovrà seguire un rapido raffreddamento, all'aria o anche in acqua, per stabilizzare a temperatura ambiente la fase α. È necessario evitare di portare la lega nel campo α+β perché con il rapido raffreddamento tale struttura verrebbe portata a temperatura ambiente con effetti deleteri sulla plasticità a freddo.
  Il trattamento b) può essere eseguito su leghe che siano state incrudite da lavorazioni plastiche a freddo e può essere limitato a temperature basse (< 300°C) qualora si vogliano solo evitare le cricche di stagionatura. Per addolcimenti più spinti bisogna arrivare a temperature più alte, tali però da non far entrare comunque nel campo α+β la lega. Dopo tale riscaldo la lega sarà sottoposta a raffreddamento rapido e presenterà la sola fase α addolcita notevolmente.

- Tempra

  Si è già accennato a come gli ottoni qui considerati possano essere portati a temperature oltre la linea BG e dopo una permanenza sufficiente per ottenere l'equilibrio strutturale delle due fasi presenti α+β, possano essere temprati, cioè raffreddati rapidamente in acqua, trasferendo tali strutture a temperatura ambiente. La durezza e la resistenza di un ottone così trattato saranno maggiori di quelle dello stesso ottone ricotto, avente la sola fase α, per la presenza contemporanea della fase β.
  Il trattamento di tempra, agli effetti dell'indurimento dell'ottone, non ha grande importanza pratica perché lo stesso risultato lo si ottiene con piccole aggiunte di Zn che sposta l'equilibrio strutturale della lega verso la fase β.

Ottoni α+β (con Zn oltre 39%)

In questi ottoni non è possibile ottenere una struttura unifase di tipo α. Si è già visto inoltre che la deformabilità della lega è limitata alle alte temperature per cui difficilmente sarà allo stato crudo e tensionata.

- Tempra

  Sfruttando la presenza della sola fase β oltre la linea CH è possibile scaldare la lega oltre tale temperatura e mantenerla per il tempo necessario ad ottenere l'equilibrio strutturale e cioè la solubilizzazione della fase α nella fase β. Raffreddamento poi rapidamente la lega fino a temperatura ambiente, cioè temprandola, è possibile ottenere tale struttura in stato instabile con aumento notevole della resistenza e della durezza della lega a scapito della resilienza e della duttilità (vedi fig.7).
  Facendo seguire un rinvenimento si ha, con l'aumento della temperatura, una progressiva diminuzione della durezza fino ad ottenere le proprietà e le caratteristiche della lega prima del trattamento ad una temperatura di circa 600°C. a tale temperatura si ha pure il totale ripristino della due fasi α+β.

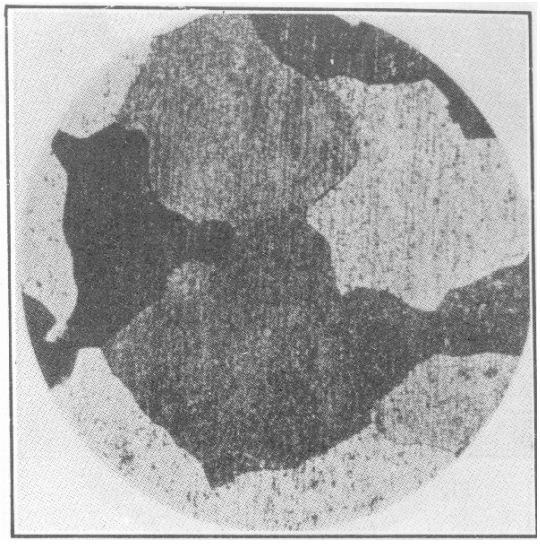

Fig.7 Ottone temprato in acqua da 830°C: soluzione β

Si tratta quindi di dosare opportunamente le temperature di rinvenimento per ottenere le caratteristiche meccaniche desiderate.
Un ottone con la seguente analisi

Cu	Zn	Al	Ni	Fe
60.5%	33.65%	2.8%	2.96%	0.08%

Temprato in acqua da 780°C e rinvenuto a 450°C per 30' con raffreddamento lento in forno ha manifestato un aumento del carico di rottura da 58 a 72 kg/mm^2 e di durezza da 125 a 272 Hd, senza variazione sensibile dell'allungamento e della strizione che si sono mantenute intorno ai valori del 19% e del 21%.
Anche se i risultati sono accattivanti raramente il trattamento di bonifica viene effettuato su queste leghe in quanto le condizioni per la sua riuscita sono difficili. Durante il riscaldo tutta la fase α deve essere solubilizzata, il raffreddamento deve essere rapido tanto da portare a temperatura ambiente la lega solubilizzata senza apprezzabile precipitazione di fase α.
Se queste condizioni non sono rispettate il trattamento può apportare più danni che vantaggi (vedi leghe BIAK2 e BIAK3 della FIAT).

10) <u>Leghe rame stagno</u> (bronzi)

Le leghe rame-stagno, comunemente chiamate bronzi, sono le leghe a base di rame più antiche fabbricate dall'uomo. La loro importanza è fondamentale nello sviluppo della civiltà umana, prima ancora che nella storia della metallurgia.
I bronzi si preparano fondendo prima il rame ed aggiungendo poi lo stagno. Il rame, ma soprattutto lo Sn, si ossidano facilmente e l'SnO_2 insolubile può formare dannose inclusioni nella lega solidificata. Per evitare l'inconveniente si disossida il bagno fuso con aggiunta di leghe di rame-fosforo, a contenuto di P del 9÷14%, in quantità variabili dall'1 a 3%. A fusione ultimata il P residuo si trova allo stato fuso nella lega, ma non deve superare concentrazioni maggiori dello 0.2%, pena la degradazione della tenacità della lega stessa. I bronzi così ottenuti sono chiamati bronzi fosforosi o bronzi al fosforo. Siccome raramente in fonderia si usano bronzi composti solo da Cu-Sn, ma sono generalmente presenti anche altri elementi, mentre i

bronzi binari, con Sn fino a 8%, sono adatti alla lavorazione plastica, i bronzi al fosforo sono anche noti come bronzi da lavorazione plastica.
Il carico di rottura dei bronzi ricotti aumenta con il tenore di Sn fino ad un massimo di 25 Kg/mm^2, per un tenore di Sn del 15%, dopo di che diminuisce per arrivare a 5 KG/mm^2 per un tenore di Sn del 25%. L'allungamento diminuisce progressivamente con l'aumentare dello stagno fino a quasi annullarsi per tenori del 15% di Sn (vedi fig.8).

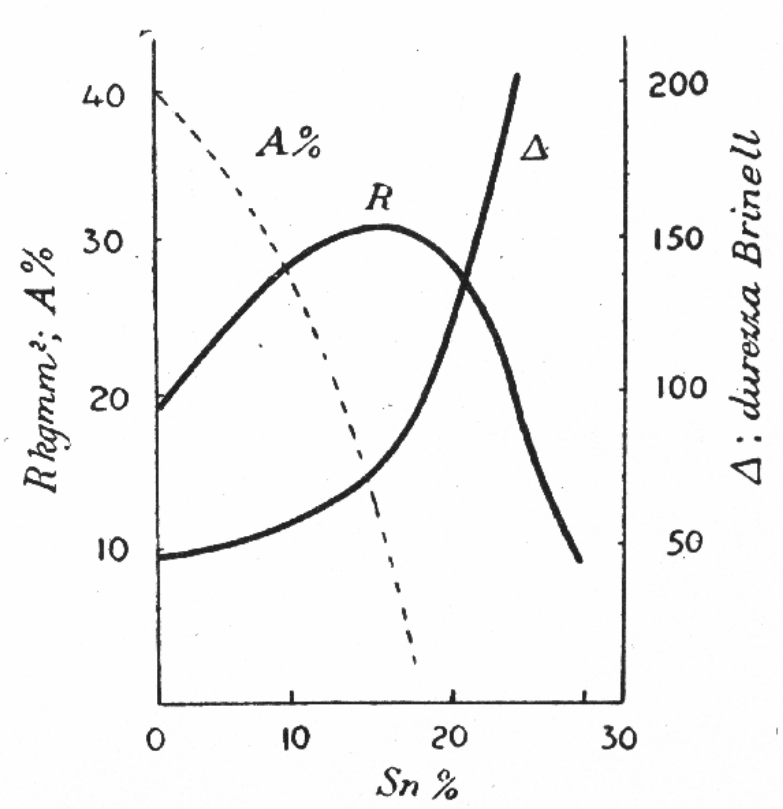

Fig.8 Comportamento del bronzo in funzione della percentuale di Sn della lega.

Il colore del bronzo varia col variare della composizione Cu-Sn. Passando dal rosso rame per contenuti di Sn del 5%, al giallo oro per Sn 5÷10%, al giallo chiaro per Sn 10÷25% fino al bianco per Sn>25%.
Il bronzo contenente il 10% di Sn è malleabile a freddo e possiede buone qualità meccaniche. Viene ancora chiamato bronzo da cannone per l'antica utilizzazione che veniva fatta. Col 16% di Sn il bronzo ha un allungamento pressoché nullo e viene utilizzato industrialmente come bronzo da cuscinetti. Col 20-25% di Sn si hanno bronzi molto duri e fragili a grana grigia assai fina e dotati di grande fluidità. Sono utilizzati per la costruzione delle campane. Col 30÷35% di Sn si hanno bronzi durissimi, di color grigiastro, che acquistano per pulitura una lucentezza inalterabile. Erano utilizzabili un tempo per la costruzione di specchi.

Diagramma di stato

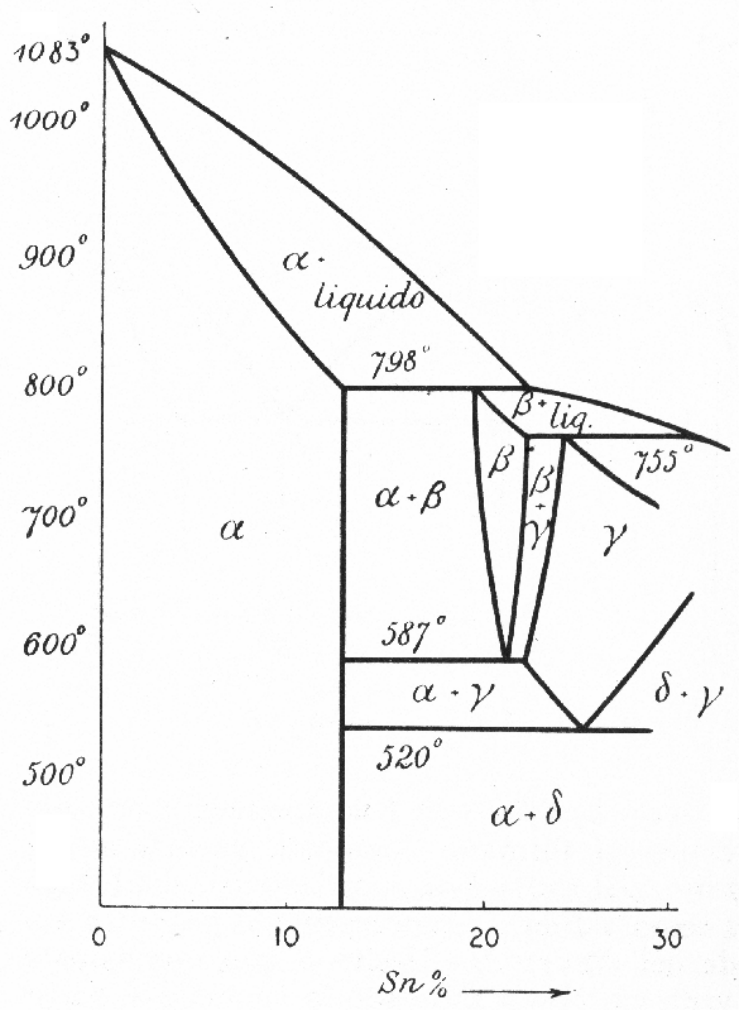

Fig.9 Diagramma di stato rame-stagno.

Il diagramma di stato delle leghe Cu-Sn è molto complesso. Di esso esamina la parte con tenori di Sn fino al 30% anche se in pratica il maggior interesse lo rivestono le leghe con tenori di Sn fino al 15%.
Si ha un composto ben definito Cu-Sn e cinque soluzioni solide, nelle quali sembrano coesistere dei composti corrispondenti alle formule: Cu_3Sn; Cu_5Sn_2; Cu_4Sn; Cu_5Sn.
La soluzione solida α è presente per tenori di Sn fino al 13.9% ed ha come caratteristiche meccaniche una buona malleabilità che permette la lavorazione plastica a freddo delle leghe costituite da questa unica fase.
Alle velocità pratiche di raffreddamento dalla temperatura di fusione le leghe con tenori di Sn inferiori a 13% presentano notevoli fenomeni di liquazione per cui già con tenori di Sn del 5% le dendriti saranno ricche di rame al centro mentre le ultime zone solidificate saranno così di Sn da solidificare come fasi α+δ (che in base al diagramma di stato dovrebbero essere presenti soltanto in leghe con più del 13.9% di Sn). Questa struttura può essere omogeneizzata solo con un lungo trattamento di ricottura consistente in un riscaldo di circa 20 ore a 500°-700°C.

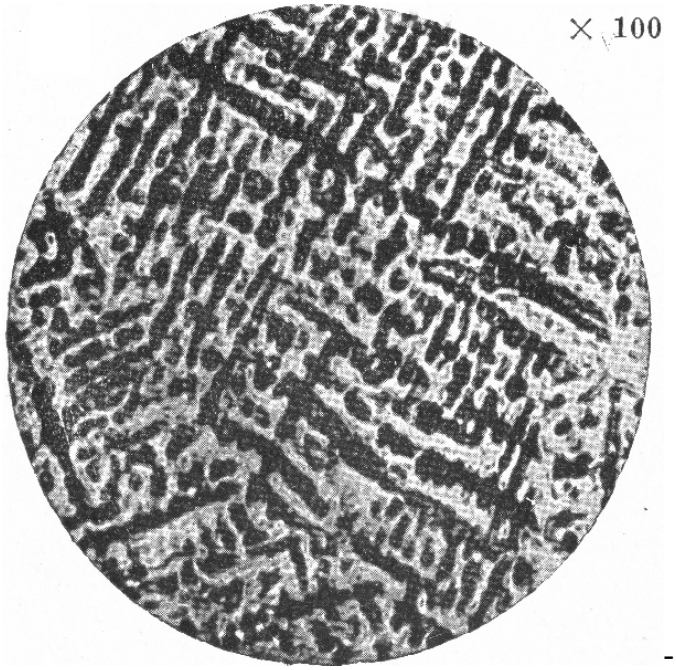

Fig.10 Bronzo greggio di colata

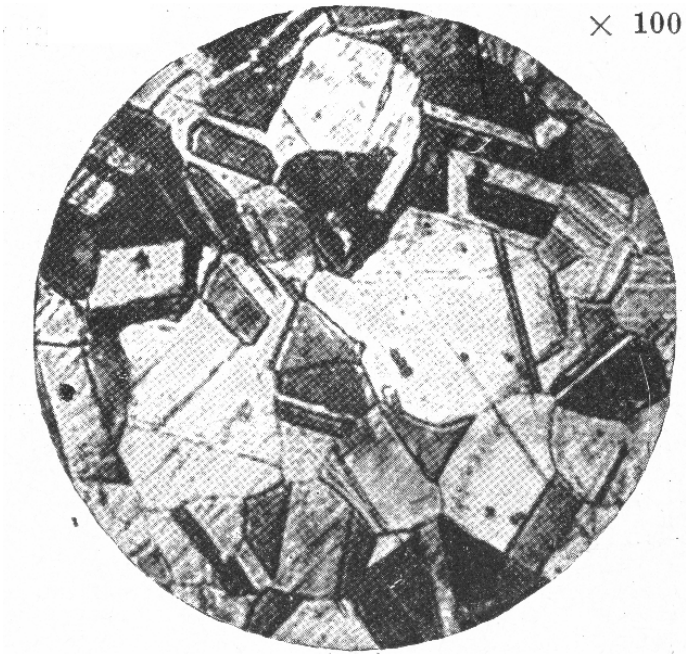

Fig.11 Bronzo di fig.10 ricotto

La fase α aumenta la sua durezza e diminuisce la sua plasticità all'aumentare del tenore di Sn così il bronzo 96-4 ha durezza 60 Hd, il 94-6 Hd 65, il 90-10 Hd 85.
Con tenori di Sn superiori al 13.9% compare, operando in condizioni di equilibrio stabile, una nuova fase β, mentre con tenori maggiori del 26% si origina una terza fase γ che durante il raffreddamento della lega si trasforma a 520°C in un composto bimetallico a formula Cu_4Sn, durissimo e fragile, chiamato fase δ. La lega contenente la fase δ è dura e fragile per cui nei bronzi contenenti Sn oltre il 13% è possibile effettuare un riscaldo oltre 587°C che trasformi tutta la fase δ in β e fissare a temperatura ambiente tale fase con una tempra in acqua, in modo da ottenere una struttura più duttile e malleabile.
Le prove di tempra effettuate su tre tipi di bronzo a tenori di stagno decrescenti danno un idea della validità del trattamento sopraesposto.

LEGA		R (Kg/mm^2)	A %
Cu 79 Sn 21	Prima della tempra	20	3
	Dopo tempra a 600°C	36	3
Cu 87 Sn 13	Prima della tempra	23	3
	Dopo tempra a 600°C	28	10
Cu 91 Sn 9	Prima della tempra	25	16
	Dopo tempra a 600°C	25	24

Tab.1 Bronzi diversi a confronto

Risulta evidente dalla tab.1 come la malleabilità aumenti comunque con un trattamento da 600°C. Nel bronzo contenente Sn 21, quindi composto da fasi α+δ, l'aumento dell'allungamento, indice di maggiore malleabilità è accompagnato da una maggiore resistenza meccanica dovuta alla diminuzione della fragilità per la scomparsa della fase δ nella lega. Nel bronzo con 13% di Sn, ma soprattutto in quello a 9% di Sn il trattamento di tempra assume più che altro il significato di una omogeneizzazione della struttura greggia di colata, e cioè di una ricottura di omogeneizzazione della fase α. Infatti non ne beneficia la resistenza ma l'allungamento assume valori notevoli.
Risulta confermato come nel bronzo α quindi con tenori di Sn fino al 10% la tempra non abbia degli effetti benefici sulla resistenza e come possa essere meglio sostituita da una ricottura di omogeneizzazione, mentre nei bronzi α+δ la tempra dei risultati apprezzabili. Nei bronzi con tenori di Sn maggiori del 25% gli effetti della tempra sono di nuovo poco appariscenti per il gioco diverso delle fasi.

Bronzi da fonderia

Il grande impiego dei bronzi in fonderia è in larga parte dovuto alle buone doti di colabilità (fluidità e scorrevolezza) della lega liquida che riempie bene tutti i dettagli delle forme. Per contro la lega ha un ampio intervallo di solidificazione che favorisce i fenomeni di liquazione, segregazioni e porosità da ritiro.
Quest'ultimo inconveniente può essere superato aggiungendo elementi in lega, come il nichelio, che restringono l'intervallo di solidificazione senza danneggiare le doti di colabilità.
Si è già detto come quasi sempre i bronzi da fonderia contengano altri elementi oltre Cu e Sn, e lo Sn raramente supera il tenore del 15%.
Fra gli elementi più comunemente aggiunti ci sono:

Zinco: che aumenta la fluidità, diminuisce le soffiature ed attenua le liquazioni del bronzo. L'aggiunta di Zn nelle leghe binarie Cu-Sn ha per effetto di spostare la posizione della lega nel diagramma di stato Cu-Sn verso la posizione del Cu; per cui una lega Cu-Sn contenente la fase δ verrà spostata via via verso la fase α fino alla completa scomparsa della fase δ per tenori di Zn particolarmente elevati. In questo caso lo Zn ha l'effetto di migliorare la duttilità della lega fino ad arrivare alla possibilità di renderla forgiabile a freddo. Per contro ne diminuisce la durezza e la resistenza all'usura.
Se il bronzo contiene solo la fase α, l'aggiunta di Zn ha ugualmente la capacità di diminuire la già bassa durezza di questa fase in modo all'incirca proporzionale alla percentuale di Zn aggiunta. Un bronzo contenente il 6% di Sn e quindi decisamente α presenta le seguenti variazioni di durezza se al Cu si sostituisce lo Zn nelle proporzioni segnate:
3% di Zn dà una durezza pari a 70 Hd;

10% di Zn dà una durezza pari a 56 Hd;
28% di Zn dà una durezza pari a 38 Hd.
Le aggiunte più comuni che si adottano nelle leghe di fonderia non superano normalmente il 10%.

Piombo: il Pb non entra in lega con il rame o con lo stagno, anzi tende per il suo punto di fusione basso e per la sua alta densità a raccogliersi sul fondo delle staffe nelle quali è colata la lega. Per questo motivo è consigliabile rovesciare le staffe appena colate al fine di contrastare il movimento discendente del Pb.
I bronzi ad alto tenore di Pb (dal 10 al 20%) sono utilizzati per la fabbricazione di cuscinetti ad alto carico specifico e bassa velocità di esercizio nei quali sembra che il Pb eserciti un'azione autolubrificante.
In bassi tenori (< 2%) viene utilizzato per leghe destinate alle lavorazioni meccaniche alle macchine utensili. In questo caso il Pb esercita le ben note proprietà lubrificanti e rompi truciolo già elencate a proposito degli ottoni al Pb, anche se contemporaneamente peggiora le qualità meccaniche della lega.
Unitamente allo Zn origina, in tenori del 5-7%, i bronzi allo Zn e Pb utilizzati nella costruzione di pezzi impegnativi.

Ferro: può essere usato come disossidante. Aumenta la resistenza della lega ma ne diminuisce la duttilità.

Manganese: è anche disossidante e contemporaneamente migliora sia la duttilità sia la resistenza della lega.

Fosforo: si è già visto che il P viene usato come disossidante. La sua presenza nella lega ha una azione indurente che viene sfruttata per la costruzione di cuscinetti, ruote dentate, viti senza fine. A questo scopo il tenore più adatto si aggira sullo 0.2-0.3%.

Bronzi da fonderia artistica

L'alto costo del bronzo rispetto all'acciaio che offre con facilità caratteristiche meccaniche assai migliori, fa si che la maggiore utilizzazione di questa lega sia ormai demandata alle applicazioni artistiche.
Oltre al Cu ed allo Sn questi bronzi questi bronzi contengono quasi sempre del Pb e anche dello Zn.
Alcuni bronzi statuari contengono 92% di Cu, 6% di Zn, 2% di Sn. Altri contengono 82.5% di Cu, 10.5% di Zn, 4% di Sn, 3% di Pb. Altri ancora 78.5% di cu, 17.2% di Zn, 2.9% di Sn, 1.4% di Pb. Particolarmente adatti per la doratura sono i bronzi col 25% di Zn.

Bronzi per deformazione plastica

È già stato detto a proposito del diagramma di stato come l'unica fase malleabile a temperatura ambiente è la fase α.
È evidente quindi che i bronzi da deformazione plastica avranno contenuti di Sn inferiori al 10%. Si è già anche visto come le caratteristiche meccaniche della fase α aumentino col tenore di Sn, per contro la conduttività termica ed elettrica diminuiscono.
I laminati di bronzo vengono utilizzati per la fabbricazione di reti metalliche, molle, ecc., sia per applicazioni elettrotecniche sia per ambienti corrosivi di carattere acido, basico o salino.

11) Trattamenti termici dei bronzi

Bronzi α (Sn < 13.9%)

Si è visto come i bronzi contenenti Sn in tenore inferiore al 10% (teoricamente 13.9%), siano utilizzati in fonderia, ma soprattutto per la lavorazione plastica. Non presentando possibilità di cambiamenti di fase, l'unico trattamento al quale possono essere sottoposti è la ricottura che può essere semplicemente di omogeneizzazione per le fusioni, e di omogeneizzazione e ricristallizzazione per i lavorati plastici.

A proposito del diagramma di stato era già stato detto come il bronzo abbia dei vistosi fenomeni di liquazione per cui a temperatura ambiente è facile ritrovare anche in questi bronzi, alle normali velocità di raffreddamento in staffa, la fase δ che infragilisce la struttura. In questo caso una lunga ricottura a 600°C, seguita da raffreddamento, anche rapido, ricrea le condizioni di equilibrio strutturale con grandi vantaggi per la malleabilità della lega. Nel caso di leghe contenenti tenori di Sn vicino al 13% è necessario che il raffreddamento sia invece il più veloce possibile (acqua) al fine di evitare la parziale trasformazione lungo la linea JL della fase α in δ.

Per i bronzi da lavorazione plastica può assumere a volte notevole importanza la ricottura di ricristallizzazione, sia per ripristinare la possibilità di ulteriori deformazioni, sia per ridare malleabilità al prodotto finito.

Già a basse temperature (300°C) inizia il fenomeno di "recovery" del reticolo cristallino e via via che la temperatura si innalza l'addolcimento sarà più completo. La temperatura di 250-300°C sarà quindi utilizzata per detensionare i pezzi senza che ne venga diminuita la durezza, mentre la temperatura di 600°C è da considerarsi la più adatta per conseguire il massimo addolcimento. Il raffreddamento seguente terrà conto dei criteri esaminati in precedenza.

Temperature intermedie potranno essere utilizzate per lasciare alla lega un certo grado di indurimento che garantisca determinate durezze.

Bronzi con Sn da 13.9 a 25%

Il diagramma di stato evidenzia come questi bronzi a temperatura ambiente, per raffreddamenti normali in staffa, presentino tutti nella fase α quantità più o meno elevate di fase δ. La fase δ, costituita dal composto intermetallico Cu_4Sn, è fragilissima e durissima tanto da impedire la lavorazione plastica di queste leghe.

Un trattamento di omogeneizzazione è possibile riscaldando la lega oltre 600°C. a tale temperatura, oltre ad attenuare le eterogeneità dovute ai fenomeni di liquazione, si ottiene la trasformazione della fase δ in β meno dura e fragile.

Raffreddando quindi rapidamente la lega da tale temperatura è possibile fissare tale struttura a temperatura ambiente con vantaggi per la sua malleabilità e resistenza meccanica.

12) Leghe rame alluminio (bronzi all'alluminio)

Le leghe rame-alluminio sono relativamente recenti in quanto recente è la produzione dell'alluminio su scala industriale.

Il campo di applicazione che presenta interessi pratici varia dal 5 al 15% di Al. Altri elementi possono essere aggiunti a questa lega binaria per migliorarne le caratteristiche meccaniche o per adattarne meglio la resistenza alla corrosione al variare degli ambienti in cui deve operare. Si potranno così addizionare Ni (0.5÷7%), Mn (0.5÷12%), Fe (1÷6%).

Tutte le leghe di questo genere possono considerarsi derivate dalla lega base classica 90/10 che è ancora oggi largamente usata per getti di colata in pressione o in conchiglia.

L'alluminio esercita un'influenza benefica sotto vari aspetti; dal punto di vista meccanico aumenta la resistenza e la durezza della lega all'aumentare del suo tenore anche se per contro

provoca una diminuzione dell'allungamento. I valori di queste caratteristiche sono così alti che il bronzo all'alluminio può essere con tranquillità impiegato nella costruzione di pezzi altamente sollecitati (es. viti senza fine).

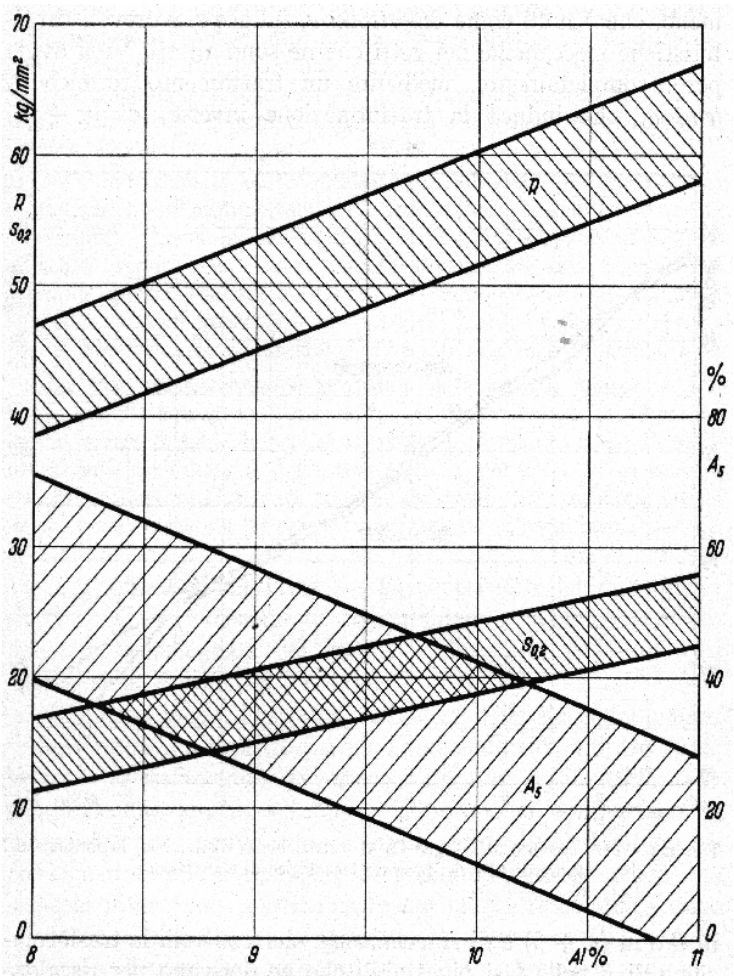

Fig.12 Caratteristiche meccaniche dei bronzi binari d'alluminio, colati in conchiglia.

Dal punto di vista della resistenza alla corrosione è da notare come l'alluminio crei uno strato di ossido di alluminio sulla superficie dei pezzi che ha ottime caratteristiche di aderenza, di protezione, ed è prontamente rigenerabile. La funzione protettiva della "pelle" di ossido di alluminio si esplica fino a temperature relativamente alte (850°C).
Il fenomeno di ossidazione dell'alluminio ha anche un aspetto riguardante la fusione e la colata della lega. È infatti necessario che la "pelle" di ossido di Al che si forma sulla superficie del bagno fuso non venga intrappolata durante la colata nel getto, per cui è necessario operare con cautela sia sul bagno evitando dei rimescolamenti che non farebbero che introdurre ossigeno nella lega e soprattutto predisponendo colatoi e materozze in modo da evitare che la "pelle" resti all'interno del getto durante il riempimento della forma.
La lega Cu-Al dal punto di vista fusorio ha un comportamento assai simile a quello dei metalli puri. Possiede cioè un intervallo di fusione assai ristretto. Se questo aspetto è positivo in quanto non si verificano le dannose liquazioni che si hanno invece coi bronzi comuni, è negativo dal punto di vista del ritiro, perché vi è la tendenza alla formazione di profondi coni di ritiro. È necessario quindi prevedere adeguate materozze.

Diagramma di stato

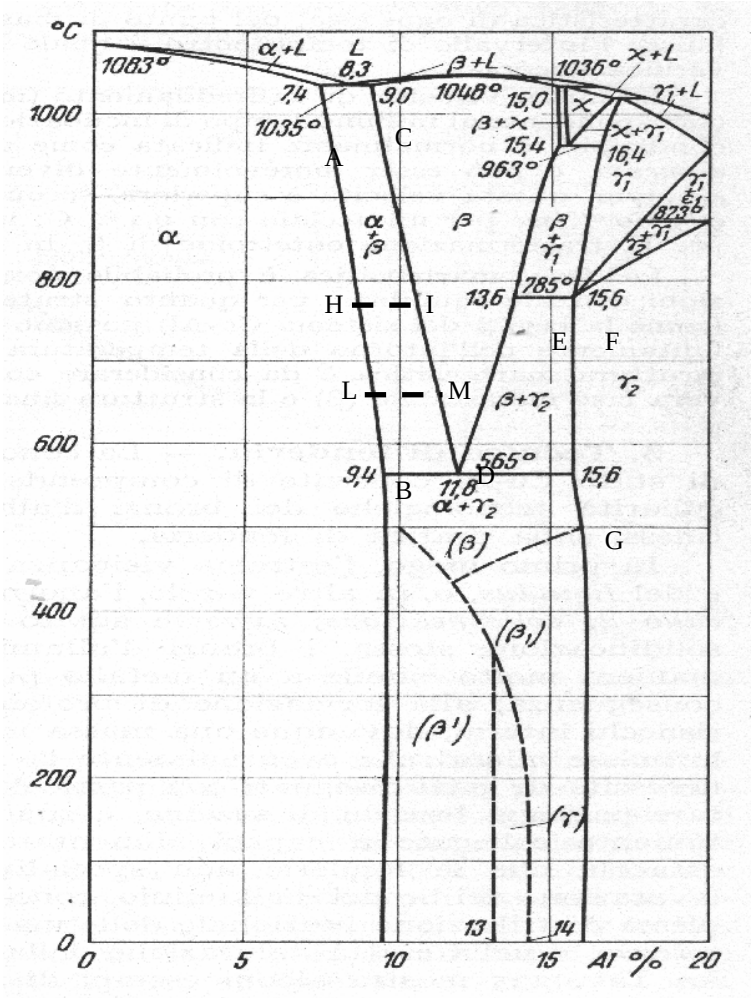

Fig.13 Diagramma di stato rame-alluminio.

Dall'esame del diagramma di stato appare come tenori fino al 7.4% di Al esiste solo una fase, con reticolo cristallino cubico a facce centrate, chiamata α. Per tenori di Al fino al 9.4% invece può esistere o la sola fase α oppure la fase α+β a seconda della temperatura alla quale si considera la lega.

La fase α è relativamente duttile a temperatura ambiente per cui tutti i cupralluminii da deformazione plastica non superano il 10% di Al. Per tenori di Al compresi tra il 9 e il 16% la struttura può essere mono o bifasica a seconda della temperatura alla quale viene considerata la lega. Inoltre a temperature relativamente basse compare la fase γ_2.

La fase β è cubica corpo centrata (a = 2.94 Å) e quando viene portata a temperatura ambiente, in equilibrio instabile per rapido raffreddamento, si presenta dura e fragile. La fase γ_2 è invece cubica a facce centrate (a = 8.7 Å) come la fase α. Quest'ultima però non ha distanza reticolare costante perché variabile in relazione al grado di saturazione in alcuni Al.

Caratteristica peculiare di questa lega è l'esistenza di un eutettoide a temperatura di 565°C e ad una concentrazione di 11.8% di Al, che può ricordare nel suo comportamento ai cicli termici, molto da vicino l'acciaio.

Prendiamo, a tale scopo, in esame il comportamento di una lega contenente il 10% di Al, che è considerata la lega base classica dei cupralluminii, agli effetti del raffreddamento da temperature che l'abbiano resa con struttura totalmente β.

All'incontro, durante il raffreddamento, con la linea CD, cominceranno a separarsi nelle lega dei nuclei di cristalli α, che avranno composizione determinata dall'incontro dell'orizzontale

che passa dalla temperatura presa in considerazione con la linea AB. La fase β restante si arricchirà così di Al perché la fase α che si separa ne sarà più povera. La composizione della fase β restante sarà data dall'incontro della stessa orizzontale con la linea CD.
Giunti alla temperatura di 565°C la fase β non ancora trasformata avrà la composizione dell'eutettoide per cui si separeranno, a temperatura costante, due fasi finemente suddivise: $\alpha+\gamma_2$. Se il raffreddamento è stato molto lento avremo quindi come risultato finale una struttura con grosse isole di fase α ed un reticolo finemente suddiviso di eutettoide (vedi fig.14).

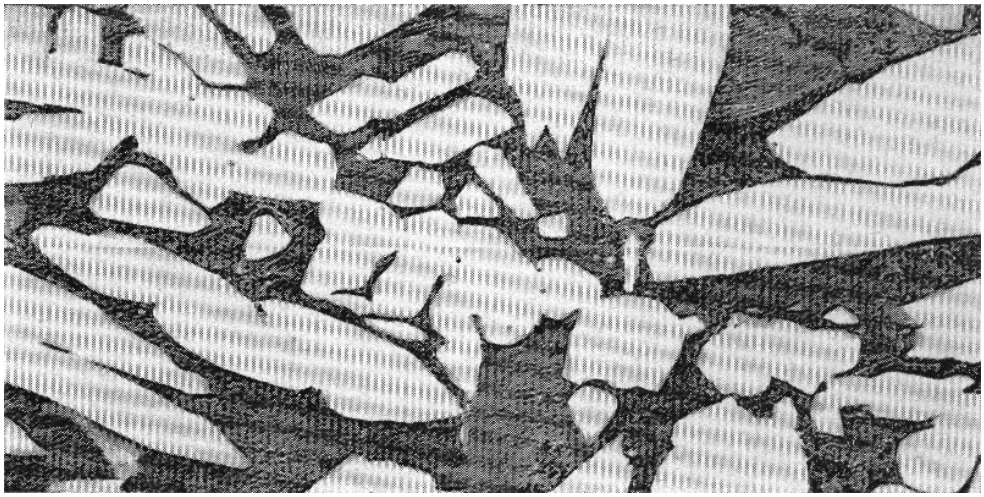

Fig.13 Eutettoide $\alpha+\gamma_2$.

Se la velocità di raffreddamento è più veloce di quella dell'equilibrio stabile, come accade ad esempio nei getti colati in conchiglia, le isole di ferrite saranno molto piccole e quindi la struttura più omogenea con conseguenti migliori caratteristiche meccaniche (vedi fig.14).

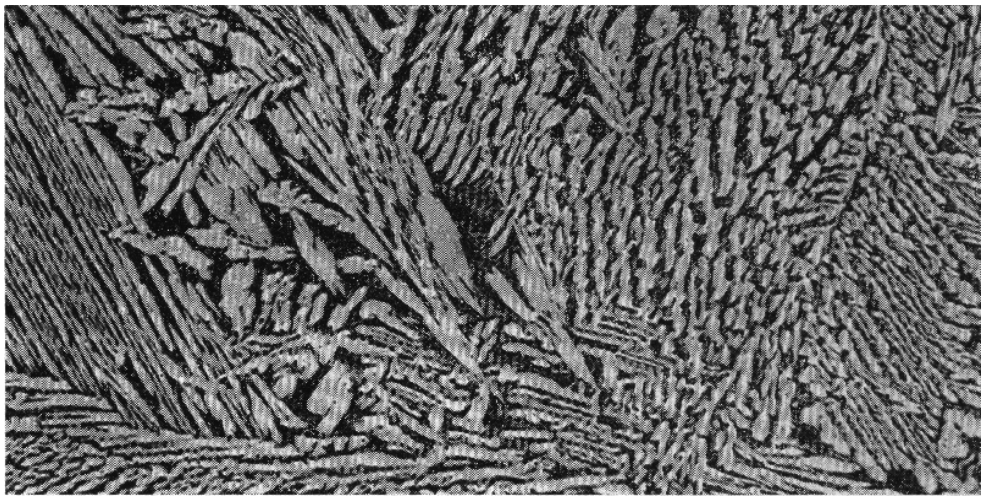

Fig.14 Eutettoide $\alpha+\gamma_2$.

Da questa prima osservazione è subito chiaro come siano da evitare raffreddamenti lenti di questa lega durante il raffreddamento dei getti, a meno che gli stessi non siano da sottoporre successivamente a trattamento termico. I getti colati in sabbia andranno quindi possibilmente

distaffati ancora molto caldi e lasciati raffreddare all'aria. Qualora questo non sia possibile un analogo risultato di affinamento della struttura si può ottenere con aggiunte di ferro (1.5÷4%).
Se il raffreddamento avviene invece ad una velocità superiore a quella chiamata velocità critica di tempra è possibile ottenere a temperatura ambiente la fase β. L'aspetto di questa fase è quello aciculare, caratteristico anche delle strutture di tempra degli acciai. La sua durezza e fragilità sono elevate per cui è necessario fare sempre seguire un rinvenimento alla tempra di queste leghe (vedi fig.15).

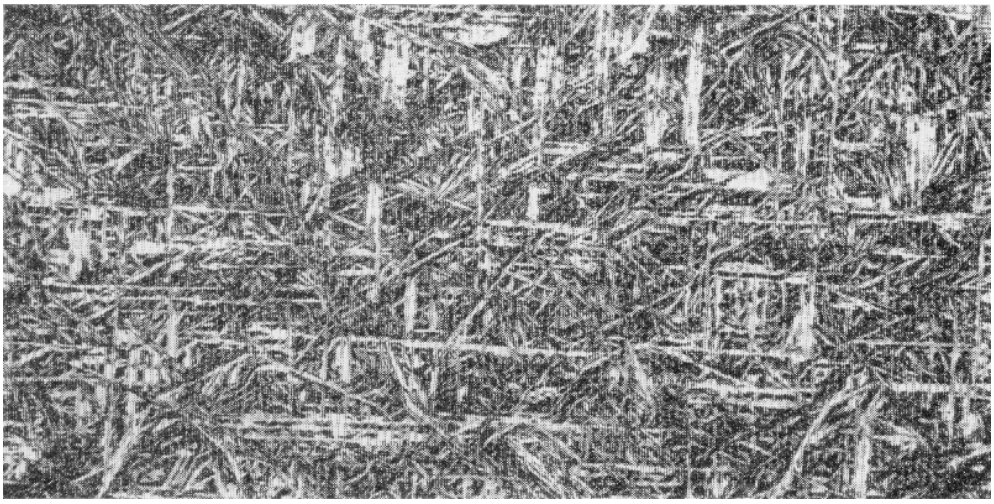

Fig.15 Fase β di getto temprato a 900°C in acqua fredda.

Se il cristallo precedente la tempra non arriva alla temperatura di completa trasformazione in fase β della lega e cioè oltre la linea CD, oppure la permanenza del pezzo in temperatura non è sufficiente per permetterne l'equilibrio strutturale, alla tempra successiva la struttura rivelerà la presenza di zone di fase α non trasformate durante il riscaldo.
Queste isole di fase α oltre a diminuire la durezza del pezzo temprato ne impedisce l'omogeneità e quindi l'esplicarsi totale delle qualità meccaniche nel successivo ciclo di rinvenimento (vedi fig.16).
È possibile, anche per queste leghe, in analogia con quanto avviene normalmente per l'acciaio, la costruzione di diagrammi riportanti le curve di trasformazione strutturale a temperatura costante. Si tratta cioè delle famose curve T.T.T. che anche in questo caso presentano il caratteristico andamento ad S, e posso indicare fra l'altro la velocità critica di tempra della lega.
Si è già detto come la fase β ottenuta per tempra dalle leghe CuAl sia fragile e necessiti di un rinvenimento successivo. Dal diagramma di stato è facile rilevare che in linea teorica la temperatura di rinvenimento non dovrebbe superare i 565°C altrimenti si corre il pericolo di entrare in uno dei due campi che contengono la fase β e nel successivo raffreddamento di ricreare isole di lega temprata, oppure, se il raffreddamento avviene molto lentamente, isole di composizione strutturale α (vedi fig.17). in pratica la temperatura di rinvenimento si mantiene sui 580-600°C. temperature inferiori o superiori possono essere adottate solo per soddisfare a particolari esigenze (vedi fig.18).

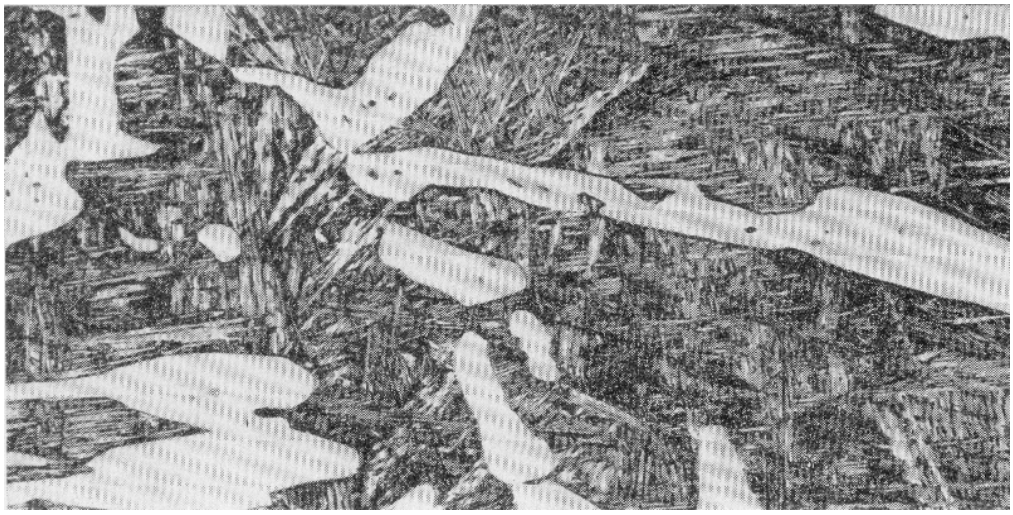

Fig.16 Fase α+β di getto temprato a 750°C in acqua fredda.

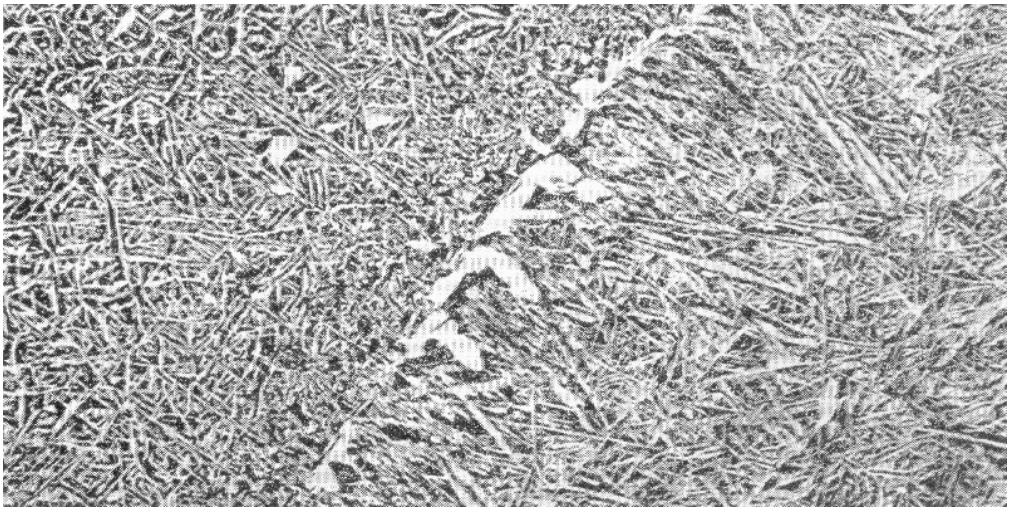

Fig.17 Getto di fig.15 rivenuto a 750°C.

Fig.18 Getto di fig.15 rivenuto a 600°C.

Effetto degli altri elementi sulla lega

Ferro: si è già detto come abbia potere affinante sulla struttura della lega. Viene aggiunto in tenori che vanno dal 2.5 al 6% e nelle leghe più pregiate viene accompagnato da tenori di ni variabili dal 3 al 5.5%.

Manganese: è sempre presente in piccoli tenori (0.1÷0.5%) perché viene aggiunto come disossidante nella fabbricazione della lega. In tenori superiori esplica una funzione correttiva ed in certe leghe può raggiungere concentrazioni fino al 12% associato con Ni e Fe.
Nichel: aumenta la solubilità del Fe per cui viene sempre aggiunto quando il tenore del Fe supera il 3% (solubilità massima) altrimenti si formano dei punti preferenziali di corrosione.
Il Ni aumenta la resistenza alla corrosione in acqua marina ed il limite di snervamento.

Piombo: può essere introdotto per facilitare la lavorazione meccanica. Non deve superare tenori dello 0.5% altrimenti può avere effetti nocivi sulla corrodibilità.

13) Trattamenti termici dei bronzi all'alluminio

Bonifica
Dall'esame del diagramma di stato sono apparse, almeno in linea teorica, le trasformazioni strutturali che presiedono alla pratica dei trattamenti termici.
Le leghe classificate come cupralluminii dovranno essere riscaldate ad una temperatura tale da garantire la completa trasformazione della lega in fase β. Considerando la forte inclinazione della linea di cambiamento di fase CD appare evidente come piccole variazioni di composizione della lega possano portare a forti variazioni di temperatura per ottenere la totale trasformazione in β. Così ad es. una lega col 10% di Al è già completamente trasformata a 860°C, mentre se l'Al è solo in tenori del 9.5% tale trasformazione avviene a temperature dell'ordine dei 950°C. è evidente quindi come sia importante l'esatta composizione in % di Al della lega ai fini del trattamento di tempra. Molto meno sensibile è invece la variazione dei punti di trasformazione al variare del tenore degli altri elementi aggiunti come il Fe, il Ni e il Mn.

In pratica il riscaldo delle leghe binarie contenenti il 10% circa di Al verrà effettuato alla temperatura di circa 900°C, con una permanenza in temperatura di circa 1 ora per ogni 25 mm di spessore. Il successivo raffreddamento sarà effettuato in acqua fredda (10÷30°C). È evidente che tutte le norme atte a garantire l'omogeneità di temperatura e una permanenza minima a regime di tutti i pezzi costituenti i lotti che si caricheranno nel forno andranno rispettate. Così saranno da evitare cariche eccessivamente costipate, riscaldi troppo veloci, forni non omogenei nella temperatura e senza circolazione forzata dell'atmosfera.
Nel raffreddamento di tempra andrà posta particolare cura perché l'acqua circola liberamente fra i pezzi della carica al fine di garantire un raffreddamento veloce ed omogeneo. Pezzi particolarmente complicati e delicati potranno essere raffreddati in acqua a 56-60°C.
La temperatura di rinvenimento oscillerà intorno ai 600°C a seconda delle caratteristiche meccaniche desiderate. È preferibile adottare rinvenimenti lunghi a temperature più basse di qualche grado del richiesto, al fine di garantire una buona omogeneità di temperatura nella carica del forno. Il raffreddamento successivo può essere effettuato nell'acqua se la temperatura raggiunta non ha superato i 565°C, altrimenti è preferibile un raffreddamento più lungo all'aria.
Per le leghe contenenti altri elementi leganti oltre l'Al, fermo restando le considerazioni fin qui fatte, le temperature di trattamento potranno variare leggermente in funzione della composizione chimica (vedi tabelle).

Ricottura e stabilizzazione

Sono due trattamenti che hanno significato esclusivamente per le leghe destinate alla lavorazione plastica.
La prima ha funzione di addolcire il materiale incrudito per lavorazione plastica quando debba essere di nuovo sottoposto a trafilatura. Svolge la duplice funzione di addolcimento e di ricristallizzazione e si effettua a temperatura dell'ordine di 800-850°C con raffreddamento successivo all'aria. La stabilizzazione si compie invece a temperature di 350-400°C ed ha essenzialmente lo scopo di detensionare i materiali che hanno subito forti incrudimenti per trafilatura e che quindi sono soggetti alle cricche di stagionatura. Anche in questo caso il materiale prima di essere utilizzato può essere sottoposto alla prova del nitrato di mercurio per accertare l'assenza di tensioni che potrebbero provocare cricche (vedi pag.11, trattamenti termici degli ottoni α).

14) Leghe rame berillio (bronzi al berillio) e rame cobalto berillio

Il berillio allo stato puro non offre interesse nell'utilizzazione industriale per la sua elevata fragilità. Può essere classificato nei metalli ultraleggeri per la sua bassa densità (1.848 g/cm^3), ma per contro presenta una durezza molto elevata (350-400 HB) ed un punto di fusione corrispondente ad una temperatura di 1280°C.
In lega col rame può essere accettato fino a tenori del 2.50%, oltre ai quali genera nella lega dei costituenti duri che ne ostacolano la lavorazione a freddo.
A partire da tenori dello 0.8% il Be conferisce al Cu la proprietà di poter indurire per invecchiamento dopo opportuna tempra di solubilizzazione in modo analogo alle leghe leggere da bonifica.
La lega più usata a questo scopo è quella corrispondente ad un tenore di Be compreso fra 1.8÷2.05%; Ni + Co ≥ 0.20%; Ni + Co + Fe ≤ 0.6%; Cu = il resto (sigle corrispondenti CuBe1.7CoNi; CuBe2CoNi).
Punto di fusione della lega: 864°C.
Struttura: α.
La tempra di solubilizzazione avviene per riscaldo a 790°C ± 10 con permanenza a regime per circa un'ora seguita da raffreddamento rapido in acqua.

L’invecchiamento si effettua riscaldamento la lega solubilizzata a 315°C ± 10°C per circa 2 ore a regime se la lega è stata incrudita dopo solubilizzazione, oppure per circa 3 ore se la lega non è stata incrudita. Permanenze maggiori danno durezze e resistenze più elevate ma i valori di allungamento diminuiscono drasticamente.
Nel caso di pezzi ottenuti per fusione la durezza è influenzata solo dalla durata dell’invecchiamento e può raggiungere valori di R = 120 Kg/mm^2.
Le leghe da lavorazione plastica possono invece essere soggette ad incrudimento dopo tempra di solubilizzazione, fino ad un valore di H40 (40% di riduzione dello spessore iniziale), che permette di ottenere resistenze e durezze ben più elevate e limiti di snervamento paragonabili a quelli dell’acciaio.
Le leghe da lavorazione plastica, sotto forma di lamiere, nastri, rondelle, laminati vengono utilizzate soprattutto per particolari richiedenti alta resistenza allo scorrimento viscoso a caldo, allo snervamento, a fatica, nonché buona resistenza alla corrosione e all’usura (es. molle, contatti elettrici, membrane, ecc.).
I tenori di Co, Ni, Fe presenti hanno sostanzialmente la funzione di affinare il grano cristallino ed impedire il suo ingrossamento durante i trattamenti termici di solubilizzazione.
La lega, qualora venga fornita allo stato semilavorato (lamiere, rondelle, ecc.), è solitamente ricotta e temprata di soluzione (sigla RT) in modo da essere facilmente assoggettabile a deformazioni di formatura. Successivamente, a lavorazione ultimata, il trattamento d’invecchiamento completa il ciclo termico conferendo la durezza desiderata ai particolari.
Eventuali ricotture intermedie durante la lavorazione di deformazione andranno eseguite portando i pezzi alla temperatura di tempra di soluzione.

CLASSIFICAZIONE DEGLI OTTONI SIMBOLOGIE USATE PER DISTINGUERE LE LEGHE

STRUTTURA	Designazione UNI	Tab. UNI	Designazione FIAT	Ricottura	Stabilizzazione	Bonifica	Caratteristiche meccaniche				Note
							S 0,2 Kg/mm^2	R Kg/mm^2	A% 5	N d Kg/mm	
FONDERIA	G Cu Zn 40	5033									
	G Cu Zn 36	5034									
	G Cu Zn 38 Pb 2	5035									
	G Cu Zn 34 Pb 2	5036									
	G Cu Zn 39 Si 1	5037									
	G Cu Zn 36 Si Pb1	5038									
	G Cu Zn 38 Al 1 Fe1 Mn 1	6138-68									
	G Cu Zn 39 Al 2 Mn 2 Fe 1	6139-68									
	G Cu Zn 37 Sn 1	6345-68									

OTTONI DA LAVORAZIONE PLASTICA

STRUTTURA	Designazione UNI	Tab. UNI	Designazione FIAT	Ricottura	Stabilizzazione	Bonifica	Caratteristiche meccaniche				Note
							S 0,2 Kg/mm^2	R Kg/mm^2	A% 5	N d Kg/mm	
OTTONE Mn …. + B	P Cu Zn 40	4891									Ottone di
	P Cu Zn 37 P Cu Zn 35	4892 4893		425°-725° 1-2 ore raff. Aria calma	- -	- -	- -	30 – 38 36 - 42	50 26	55 – 80 75 - 115	Ricotto . Incrudito H 10 e stabilizzato
	P Cu Zn 33	4894	P. OT 67		250°-350° 1-2 ore raff. Aria calma	-	-	40-52	10	105 - 160	Incrudito H 20 e stabilizzato
	P Cu Zn 30	4895									
	P Cu Zn 28	4896									
	P Cu Zn 20	4897	P – OT 80	Stabilizz. E ricotto come UNI 4894		-	-	28 –35	52	50 - 70	Ricotto

OTTONI DA LAVORAZIONE PLASTICA

STRUTTURA	Designazione UNI	Tab. UNI	Designazione FIAT	Ricottura	Stabilizzazione	Bonifica	Caratteristiche meccaniche				Note
							S 0,2 Kg/mm^2	R Kg/mm^2	A% 5	N d Kg/mm	
	P Cu Zn 15	4898	P – OT 85	Come sopra			-	26 - 32	45	50 - 70	Ricotto
	P Cu Zn 10	4899									
…. + B	P Cu Zn 40 Pb 2	5705-65	P – OT 58 Pb	Ricottura 425° -725°	Stabilizzazione 250° - 350°	800° - 850° acqua rinveniment 600°	-	36 - 44	> 25	75 - 105	Ricotto
	P Cu Zn 39 Pb 2	5706-65	P –OT 59 Pb	Come sopra	Come sopra	Come sopra	-	36 - 44	> 25	75 - 105	Ricotto
	P Cu Zn 35 Pb 2	5707-65	-	-	-	-	-				
….. + B	P Cu Zn 39 Al 1 Fe Mn	6398 - 68									
	P Cu Zn 39 Sn 1	6399 - 68									
	P Cu Zn 28 Sn 1	6400 - 68									
	P Cu Zn 21 Al 2	6401 - 68									
….. + B	P Cu Zn 39 Al 1 Fe 1 Mn 1	6896 - 71	BIAK 2	Ricottura 450°- 600 1 ora raff. Aria calma	250° - 350° 1 ora raff. Aria calma	Non consigliata) tempra da 800/820 1 ora acqua rinvenim. Da 200-600°	15 20 30	42 48 55	25 15 10	100 120 140	Ricotto Incrudito H10 e stab. Incrudito H20 Estab.
….. + B	P Cu Zn 32 Mn 3 Al 2 Fe Ni	6897 - 71	BIAK 3 - 71	Come sopra	Come sopra	Come sopra	28	60	15	120	Ricotto Incrudito H10 e stab. Incrudito H20 Estab.