



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

Tesi di Laurea

Le leghe Rame-Berillio : caratteristiche ed applicazioni

Relatore: Ch.mo Prof. Franco Bonollo

Laureando : Busato Gianluca

Anno Accademico 2010-2011

Ai miei genitori, Gianni e Rosanna

Al termine di questo mio lungo percorso accademico sono molte le persone che sento il dovere di ringraziare per il loro affetto , il loro supporto nei momenti di difficoltà e la loro preziosa amicizia:

questo mio traguardo è anche vostro. Grazie a

mio padre Gianni

mia madre Rosanna per la sua pazienza

mio fratello Antonio , mia cognata Antonella

le mie nipotine, Chiara ed Annalisa , il più bel regalo

don Agostino col suo modo di dire “ dai Gianlu ”

don Fabio , monsignore ed amico da tempo immemore

don Dino sacerdote e ciclista mai domo

Simone Maculan, un amico nel momento del bisogno quindi sempre

Alessandro Besco , il mio acquisito fratello minore

dottor Fernando Ceron

Manuela , la prima cavia dei miei risotti

Marilena, l 'angelo della mia scheda Isee e non solo

Francesca, quando la psicologia fa rima con dolcezza

la signora Anna e la signora Bertilla, i due angeli del focolare di San Giorgio

Fabio e Cristina, Agnese e Nazareno

Gianni e gli amici del verde , perché hanno fatto risultare utile anche il sottoscritto

Enrico , Gabriella e Alessandro

la signora Fernanda e nonno Marcello

Laura , Francesco e Giacomo

Valentino, Filippo, Alessandro e Andrea

Andrea Covati , Alessandro Soldà , Enrico Berto

Grazie in modo particolare a tutta la comunità parrocchiale di San Giorgio in Gogna che mi ha fatto sentire amato : a ciascuno di voi il mio grazie , il mio affetto , la mia amicizia .

Indice

Cap.1	Le leghe Rame-Berillio: introduzione e principali applicazioni.	1
Cap.2	Le leghe Rame-Berillio: dalla composizione alla microstruttura.	5
	La composizione delle leghe Rame-Berillio e relativa denominazione.	5
	Il diagramma di fase delle leghe Rame-Berillio.	9
Cap.3	I trattamenti termici di ricottura ed invecchiamento.	13
	La ricottura in soluzione.	13
	L'invecchiamento.	15
	Trattamenti di sottoinvecchiamento, di picco di invecchiamento e di sovrainvecchiamento.	19
	Il trattamento di decapaggio.	21
Cap.4	Le proprietà fisiche delle leghe Rame-Berillio.	23
Cap.5	Le proprietà meccaniche.	27
Cap.6	Le caratteristiche di fabbricazione.	41
	La formabilità.	41
	Il ritorno elastico.	42
	Il cambiamento dimensionale e l'invecchiamento.	43
	La pulizia dei prodotti lavorati.	46
Cap.7	La produzione metallurgica.	49
	La fusione e la colata delle leghe Rame-Berillio.	49
	Cast products (i prodotti di fonderia).	51
	Le lavorazioni a freddo.	53
	Lavorazioni a caldo.	60
	Lavorazioni per asportazione di materiale.	65
Cap.8	Le diverse modalità di giunzione.	67
	La saldobrasatura (saldatura dolce).	69
	La brasatura.	70
	La saldatura (welding).	71
	L'incollaggio (adesive bonding).	72
Cap.9	Problemi di sicurezza e rischi per la salute.	73
Cap.10	Le molteplici applicazioni delle leghe Rame-Berillio.	75
	I diversi impieghi delle leghe Rame-Berillio nell'industria elettrica ed elettronica.	76
	La produzione dei contatti elettronici a molla.	77
	La produzione di molle meccaniche, di switch elettrici e controllori termostatici.	84
	Le custodie per sensori di rilevazione di campi magnetici.	86
	Gli avvolgimenti e bobine magnetiche.	87
	I diversi impieghi delle leghe Rame-Berillio nelle industrie meccanica e siderurgica.	88

L'importanza delle leghe Rame-Berillio nell'industria della plastica.....	90
Nell'industria petrolifera, nelle miniere, negli aeroporti e nelle industrie di esplosivi.	91
In particolari settori industriali in cui è necessaria una elevata resistenza alla corrosione.....	93
Cap.11 Analisi dei più recenti studi sulle leghe Rame-Berillio.....	97
Analisi della tecnica sperimentale di elettroerosione e lucidatura su lega Cu-Be H.S.....	99
Analisi dei più recenti studi sul comportamento a corrosione.....	105
Meccanismi di ossidazione delle leghe Rame-Berillio in ambiente alcalino.	105
Analisi sulla resistenza alla corrosione delle leghe Cu-Be in ambiente acido.....	107
La cella di combustione all'idrogeno e la resistenza alla corrosione delle leghe CuBe.	110
La resistenza a frattura e l'influenza del sovrainvecchiamento.	117
L'effetto del sovrainvecchiamento sulla resistenza a frattura delle leghe Rame-Berillio.....	117
L'influenza dei trattamenti termici sulle leghe CuBe saldate con fascio laser.	124
Applicazioni industriali particolari delle leghe Rame-Berillio invecchiate.....	130
Le spazzole in fibra metallica in CuBe per contatti elettrici scorrevoli.....	130
L'invecchiamento ed il sovrainvecchiamento indotti dalla temperatura di taglio.	134
La resistenza alla fatica termica : la realizzazione di modelli di assemblati pressati.....	137
Bibliografia.....	138

Capitolo 1 Le leghe Rame-Berillio: introduzione e principali applicazioni.

La presente tesi ha come argomento di studio le leghe Rame-Berillio, materiale metallico che nel corso degli ultimi anni ha visto crescere sempre di più la propria importanza tecnologica, nonché il proprio utilizzo, dati i molteplici settori in cui possono essere impiegate. Cercheremo dunque di descrivere in questo elaborato le particolari caratteristiche e funzionalità di tale materiale, definendo da quali condizioni fisiche esse dipendano e grazie a quali trattamenti termici esse possano essere attenuate o amplificate al fine di rispondere alle richieste di produzione.

Per prima cosa è essenziale ricordare che una lega è una combinazione di due o più elementi, di cui almeno uno è un metallo e dove il materiale risultante ha proprietà differenti da quelle dei relativi componenti: nel nostro caso il Rame costituirà la matrice in cui verrà introdotto il Berillio quale elemento alligante e che fornirà al nostro materiale quell'insieme di peculiarità che in seguito andremo ad analizzare. E' necessario perciò richiamare alcune delle caratteristiche fisiche e chimiche di tale elemento riportate anche nella tabella nr.1.

Il berillio è l'elemento chimico della tavola periodica che ha come simbolo Be e come numero atomico il 4. E' un elemento bivalente tossico, grigio acciaio, forte, leggero, principalmente usato appunto come agente indurente nelle leghe e che presenta uno dei punti di fusione più alti di tutti i metalli leggeri. Ha una eccellente conduttività termica, è non magnetico e presenta un fattore di elasticità di 1/3 superiore a quello dell'acciaio.

E' resistente agli attacchi dell'acido nitrico concentrato, è altamente permeabile ai raggi X e rilascia neutroni se viene colpito da particelle α , emesse per esempio dal Radio e dal Polonio (circa 30 neutroni per milione di particelle α). A temperatura e pressione standard il Berillio resiste all'ossidazione se esposto all'aria (anche se la sua capacità di scalfire il vetro è, come vedremo, dovuta alla formazione di un sottile strato di ossido).

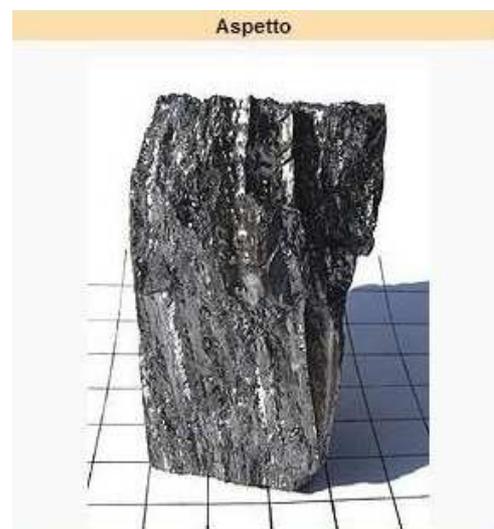
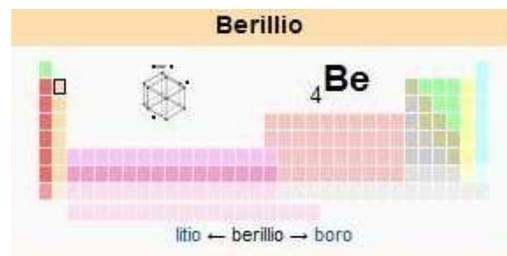


Tabella 1.1: le proprietà del Berillio

Proprietà atomiche		Proprietà fisiche		Altre proprietà	
Peso atomico	9,01218 amu	Stato della materia	solido	Elettronegatività	1,57
Raggio atomico	112 pm	Punto di fusione	1278 °C	Calore specifico	1852 J/(Kg K)
Raggio covalente	90 pm	Punto di ebollizione	2961 °C	Conducibilità elettrica	31,3 · 10 ⁻⁶ /m ohm
Configurazione elettronica	He2s ²	Volume molare	4,85 10 ⁻³ m ³ /mol	Conducibilità termica	201 W/ (mK)
e ⁻ per livello energetico	2,2	Entalpia di vaporizzazione	292,4 KJ/mol	Energia di prima ionizzazione	899,5 KJ/mol
Stati di ossidazione	2	Calore di fusione	12,2 KJ/mol	Energia di seconda ionizzazione	1757,1 KJ/mol
Struttura cristallina	esagonale	Tensione di vapore	4180 Pa	Energia di terza ionizzazione	14848,7 KJ/mol

Tale elemento riesce ad influenzare non solo il Rame, ma diversi altri materiali in cui viene inoculato, così ad esempio, le aggiunte di Berillio al di sopra al 2 % pond. producono rilevanti effetti in diversi metalli

- Effetto di rafforzamento, grazie ad indurimento per precipitazione, nel Rame e nel Nichel.
- Effetto di resistenza all'ossidazione, incremento di colabilità e della lavorabilità della lega nelle leghe di Alluminio.
- Altri vantaggi sono procurati nel Magnesio, nell'Oro ed in altri metalli.

Le leghe contenenti Berillio di gran lunga più usate sono comunque quelle Rame-Berillio. Esse occupano un posto di rilievo tra le leghe del Rame per quanto riguarda la resistenza ottenibile, pur mantenendo livelli utili di conducibilità elettrica e termica: pochi degli altri materiali non ferrosi la eguagliano in queste caratteristiche, facendola risultare simile a molte leghe di acciaio di alta qualità.

Anche comparandola con l'acciaio essa presenta diversi vantaggi caratteristici tra i quali può essere menzionata la sua migliore resistenza alla corrosione, la sua considerevolmente più alta conduttività elettrica e termica, la sua peculiarità di non dare vita a scintille che la rendono, come vedremo, idonea alla produzione di strumenti per lavori in ambienti in cui ci sia il rischio di esplosioni. Non solo, il suo basso modulo di elasticità la rende adatta alla costruzione di molle che possono essere formate a partire da nastri, fili, facilmente lavorabili data la loro dolcezza e che susseguentemente vengono induriti tramite trattamento termico a conveniente bassa temperatura. Rispetto ad una molla in acciaio, come già anticipato, quella in Rame-Berillio non è magnetica e può quindi essere utilizzata negli strumenti per i quali l'utilizzo dell'acciaio è inammissibile per questo motivo.

Riassumendo, data la molteplicità di positive caratteristiche chimico fisiche, tale famiglia di leghe viene utilizzata:

- Nei **componenti elettronici** dove la resistenza, la formabilità e moduli elastici favorevoli la rendono idonea nei contatti per connettori elettronici.
- Nei **dispositivi elettrici** grazie alla sua resistenza alla fatica, alla sua conduttività elettrica e ed alla sua resistenza al rilassamento, fattori determinanti nella fabbricazione di interruttori switch e relay.
- Nei **cuscinetti dei dispositivi di frenata** dove risultano importanti le sue caratteristiche di anti-stiramento.
- Nelle **custodie per dispositivi di rilevazione magnetica** per i quali è cruciale una bassa suscettibilità magnetica.
- Nei **sistemi di saldatura a resistenza** dove la durezza ad alta temperatura e la conduttività termica permettono di preservare gli elementi strutturali del dispositivo con un'ottima gestione del calore.
- Nell'**industria aerospaziale e militare** come materiali strutturali leggeri per la costruzione di aerei supersonici, missili e satelliti per le telecomunicazioni grazie alla loro rigidità, leggerezza e stabilità dimensionale in un ampio range di temperature.

Come si può notare dunque tale lega trova oggi utilizzo in svariati settori industriali di notevole importanza. Va ricordato per completezza che altri composti contenenti Berillio trovano un largo impiego: ad esempio le leghe madri (master alloys) del Berillio nel Rame, nel Nichel e nell'Alluminio sono adatte all'uso in fonderia nella preparazione di leghe da colata (casting alloys) o ancora nel trattamento di metalli puri per le leghe.

Ancora, la polvere atomizzata di Rame-Berillio viene utilizzata in svariate applicazioni, in modo particolare come matrice conduttiva nelle strumentazioni per tagliare metalli ed nei contatti elettrici permeabili.

Capitolo 2 Le leghe Rame-Berillio: dalla composizione alla microstruttura.

Le leghe Rame-Berillio sono disponibili in tutte le comuni forme industriali commercializzate, comprese le strisce, nastri, fili, barre, tubi, lamine, lingotti e billette. Sono fornite principalmente sotto forma di strisce, barre e lingotti anche se altre forme lavorate sono pur sempre ottenibili.

Hanno inoltre la capacità di rispondere prontamente ai convenzionali processi di formatura, placcatura e di giunzione-saldatura. In funzione della forma industriale e della condizione di tempra, i materiali lavorati (wrought materials) possono essere stampati, formati a freddo da una varietà di processi convenzionali od anche rettificati (machined).

Le billette di colata (cast billet) possono essere forgiate a caldo, estruse e lavorate e i pezzi, i getti, possono essere prodotti attraverso diverse tecniche di fonderia.

I componenti finiti sono sottoponibili a placcatura con stagno, nichel, metalli semipreziosi o metalli preziosi. Alternativamente, le strisce possono essere placcate o lavorate ad intarsi con altri metalli. Le superfici possono anche essere modificate tramite varie tecniche per aumentare caratteristiche funzionali o di aspetto.

Le leghe Rame-Berillio sono inoltre saldabili con fondenti standard e se il trattamento è finalizzato a preservare le proprietà acquisite attraverso trattamento termico, possono venire uniti attraverso normale brasatura e molti processi di saldatura per fusione.

La composizione delle leghe Rame-Berillio e relativa denominazione

La denominazione delle leghe Rame-Berillio ha subito nel corso degli anni una certa evoluzione pur rifacendosi sempre nella classificazione alle medesime variabili, ossia

- la composizione della lega, in modo particolare la concentrazione del Berillio
- i trattamenti subiti dal materiale per l'acquisizione di specifiche proprietà metallurgiche

divenendo negli anni molto più dettagliata e puntuale. Fino ad almeno la metà degli anni '50 le leghe Rame-Berillio venivano suddivise in virtù della concentrazione dell'elemento alligante in due gruppi:

1. le **leghe Rame-Berillio a normale concentrazione di Berillio** con un contenuto di Berillio tra il 1,5% - 2,7% pond. ed un piccolo quantitativo di Cobalto o Nichel utilizzati per lo più per incrementare la risposta della lega al trattamento termico;
2. le **leghe Rame-Berillio a bassa concentrazione di Berillio** con un minore contenuto di Berillio nell'intorno dello 0,4% pond. ed un elevato contenuto di Cobalto pari al 2,6% e che si caratterizzavano per una minore durezza e resistenza rispetto alle normali ma una migliore conduttività elettrica e termica;
3. vi era poi un terzo gruppo di leghe caratterizzate da una concentrazione dell'1% pond. Be e che rappresentavano un compromesso tra le leghe a normale ed a basso contenuto di Berillio, presentando proprietà intermedie rispetto a quelle delle classi appena menzionate.

Ai nostri giorni si usa una denominazione leggermente modificata. Andando a considerare la concentrazione dell'elemento soluto è possibile suddividere la famiglia delle leghe Rame-Berillio in due gruppi:

- le **leghe ad alto contenuto di Rame** che presentano la seguente composizione:

0,2 % -2,0 % pond. di Berillio
 0,2 % -2,7 % pond. di Cobalto o 2,2 % pond. di Nichel
 95 % - 99,6 % pond. in Rame

- le **leghe di Rame di fonderia** che presentano una composizione più ricca in Berillio:

2,0 % - 2,85 % pond. di Berillio
 0,2 % - 2,70 % pond. di Cobalto o 2,2 % di Nichel
 94 % - 97,8 % pond. di Rame

Con questo quadro di composizioni, le leghe ad alto contenuto di Rame, che costituiscono una larga parte delle leghe Rame-Berillio prodotte, sono state ulteriormente suddivise in due distinte classi commerciali in virtù delle diverse caratteristiche tecniche che possiedono in funzione appunto della più alta o più bassa concentrazione di Berillio.

- Le **leghe Rame-Berillio ad alta resistenza** che manifestano ottime caratteristiche meccaniche e composizione

> 1 % pond. di Berillio

Fanno parte di questo gruppo diverse leghe Rame-Berillio che, pur accomunate dalle buone qualità meccaniche, date le diverse lavorazioni subite, dovranno essere identificate con diversi codici viste le differenti caratteristiche che tali trattamenti hanno loro procurato.

Tra le leghe ad alta resistenza possiamo ricordare ad esempio:

- le leghe Rame-Berillio lavorate ad alta resistenza classificate come C17000 e C17200

1,60 % - 2,00 % pond. di Berillio

0,25 % pond. di Cobalto

Anche la C17300 è una lega ad alta resistenza, quale versione “ non lavorata ” della C17200

- le leghe Rame-Berillio di fonderia ad alta resistenza identificate come C82400, C82500, C82600 e C82800

1,60% - 2,85 % pond. di Berillio

0,50 % pond. di Cobalto e tracce di Silicio

e tra queste anche la C82510 in cui l'affinamento della grana viene procurato spingendo la concentrazione del Cobalto fino ed oltre all'1% o altresì con aggiunta di Titanio.

- Le **leghe Rame-Berillio ad alta conduttività** che manifestano alta conduttività elettrica e termica e composizione

< 1% pond. di Berillio

Anche questo gruppo presenta diverse tipologie di leghe Rame-Berillio che, pur essendo tutte accomunate dalle medesime ottime caratteristiche di conduttività, si differenziano per altre qualità derivanti dalle lavorazioni subite. Tra queste possiamo ricordare:

- Le leghe Rame-Berillio lavorate ad alta conduttività, C17500, C17510, con

0,20 % - 0,70 % pond. di Berillio

2,50 % pond. di Cobalto o 2,00 % pond. di Nichel

Di tale classe fa parte anche la C17410 che si distingue per un ancor minor contenuto di alligante: 0,4 % pond. di Berillio e 0,6 % pond. di Cobalto

- Le leghe Rame-Berillio lavorate ad alta conduttività, C82000, C82100, C82200, con

>0,80 % pond. di Berillio

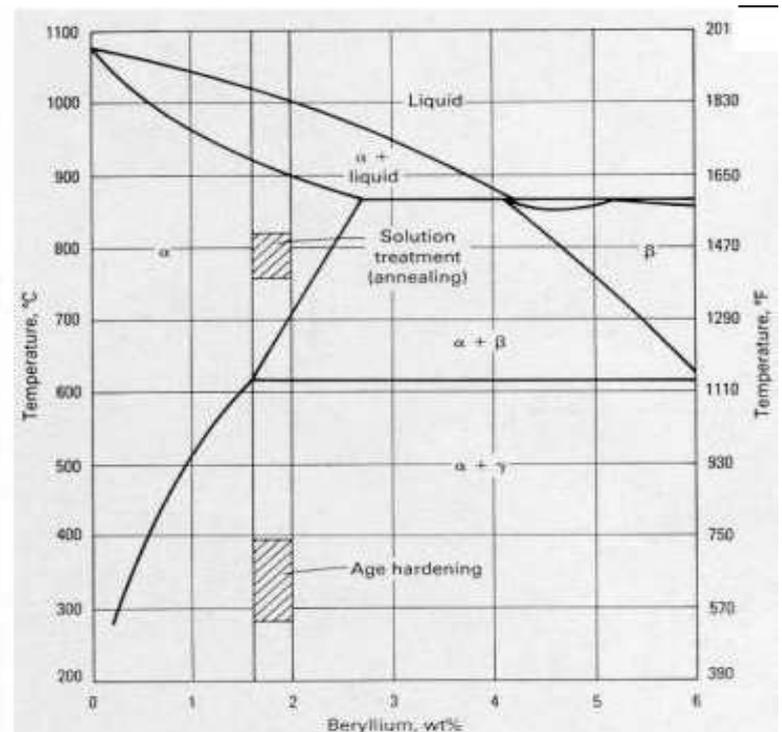
Tabella 2.1: la classificazione delle leghe Rame-Berillio

Nome	% Be	% Co	% Ni	Co+Ni	Co+Ni+Fe	% Si	% Pb	% Cu
C17200	1,80-2,00	-----	-----	Min 0,20	Max 0,60	-----	-----	Il resto
C17300	1,80-2,00	-----	-----	Min 0,20	Max 0,60	-----	0,20-0,60	Il resto
C17000	1,60-1,79	-----	-----	Min 0,20	Max 0,60	-----	-----	Il resto
C82400	1,60-1,85	-----	-----	0,20-0,65	-----	-----	-----	Il resto
C82500	1,90-2,25	-----	-----	0,35-0,70	-----	0,20-0,35	-----	Il resto
C82510	1,90-2,15	-----	-----	1,00-1,20	-----	0,20-0,35	-----	Il resto
C82600	2,25-2,55	-----	-----	0,35-0,65	-----	0,20-0,35	-----	Il resto
C82800	2,50-2,85	-----	-----	0,35-0,70	-----	0,20-0,35	-----	Il resto
C17510	0,20-0,60	-----	1,40-2,20	-----	-----	-----	-----	Il resto
C17500	0,40-0,70	2,40-2,70	-----	-----	-----	-----	-----	Il resto
C17410	0,15-0,50	0,35-0,60	-----	-----	-----	-----	-----	Il resto
C82000	0,45-0,80	-----	-----	2,40-2,70	-----	-----	-----	Il resto
C82200	0,35-0,80	-----	1,00-2,00	-----	-----	-----	-----	Il resto

Il diagramma di fase delle leghe Rame-Berillio

Il rafforzamento delle leghe Rame-Berillio è dovuto all'applicazione di un trattamento termico chiamato rafforzamento per precipitazione (precipitation hardening) o anche detto rafforzamento per invecchiamento (age hardening). Il rafforzamento per precipitazione è infatti conseguente alla precipitazione od espulsione di una fase contenente Berillio dalla soluzione solida supersatura costituita per la maggior parte dal Rame puro che costituisce il solvente della nostra lega. La precipitazione si origina solitamente per l'attuazione di un lento raffreddamento a carico della lega ed è dovuto alla diminuzione della solubilità del Berillio nella matrice di Rame in fase α al diminuire della temperatura. Generalmente le leghe vengono raffreddate rapidamente con l'esecuzione di un trattamento di ricottura, in modo tale che il Berillio rimanga in soluzione solida con il Rame. Di seguito la lega viene sottoposta ad un trattamento di invecchiamento per un'ora o più ad una temperatura tra i 200 °C e i 460 °C. A seguito di tempra le fasi contenenti Berillio, chiamate Berillidi, vengono espulsi dalla soluzione solida del Rame α .

Fig. 2.1: il diagramma di fase delle leghe Rame-Berillio.



Il rafforzamento è dunque conseguenza della giusta applicazione di due trattamenti termici

1. il trattamento di **ricottura in soluzione (solution annealing)**
2. il trattamento di **invecchiamento (age hardening)**

Va comunque ricordato che molto spesso, soprattutto per quanto concerne i prodotti lavorati, tra il trattamento termico di ricottura e quello di invecchiamento può essere eseguita una lavorazione a freddo che è in grado di amplificare la risposta all'invecchiamento.

Il primo passo del fenomeno di precipitazione consiste nella nucleazione omogenea di zone Guinier Preston (GP zones). Le zone Guinier Preston sono piccoli agglomerati di precipitati in una soluzione solida supersatura di Rame α . Le zone di Guinier Preston non sono caratterizzate da una struttura cristallina ben definita e contengono al loro interno, in questo caso, un'alta concentrazione di atomi di Berillio. La formazione di tali zone di solito coincide anche con un cambiamento delle proprietà del materiale: nel caso delle leghe Rame-Berillio, il cambiamento delle proprietà consiste in un miglioramento della resistenza e durezza del materiale.

Al proseguire dell'invecchiamento si avrà dapprima la comparsa dei precipitati coerenti metastabili γ'' e susseguentemente dei precipitati γ' che derivano sempre dalle zone Guinier Preston. Il rafforzamento che si sviluppa in questo momento è diretta conseguenza delle tensioni e deformazioni interne che mirano a mantenere una coerenza reticolare e che si sviluppano all'interfaccia tra la matrice e i precipitati che man mano crescono: la matrice di Rame tenta infatti di ospitare questi precipitati submicroscopici.

E' necessario in ogni caso evitare il sovrainvecchiamento delle leghe Rame-Berillio dal momento che esso comporta la formazione di una fase γ in equilibrio e di conseguenza senza tensioni e deformazioni interne di natura reticolare, causando perciò una diminuzione del livello di rafforzamento della lega comparata a quella sviluppata dalla formazione dei precipitati metastabili.

Come abbiamo visto in precedenza descrivendo la classificazione, le leghe commerciali di rame-Berillio sono solite contenere anche un terzo elemento, quale ad esempio il Nichel od il Cobalto. Tale ulteriore elemento alligante nel Rame svolge l'importante funzione di limitare la crescita della grana durante il trattamento di ricottura attraverso la formazione di una dispersione di particelle di berillide nella matrice. Il Nichel ed il Cobalto hanno inoltre la capacità di amplificare la risposta all'invecchiamento del materiale, di limitare la tendenza al sovrainvecchiamento o il ricorso a prolungati tempi o a più alte temperature per tale trattamento.

Il rafforzamento della lega Cu-Be scaturisce dunque da un adeguato utilizzo del trattamento di ricottura in soluzione per favorire il processo diffusivo delle particelle di composti intermetallici di Berillio all'interno della matrice di Rame in fase α e dalla successiva applicazione di un trattamento di invecchiamento per far sì che la fase β trasformata e decomposta in fase α e fase γ possa dar vita ad

agglomerati γ in grado di attuare un ostacolo al movimento delle dislocazioni e di conseguenza un idoneo rafforzamento del materiale.

Per quanto concerne le caratteristiche microstrutturali proprie di ciascuna fase presente nel diagramma riportato, esse sono facilmente rilevabili dalle convenzionali tecniche metallografiche e dall'utilizzo del microscopio a scansione elettronica. Per rilevare la presenza dei composti intermetallici a base di Berillio ed altre caratteristiche di interesse è necessario invece utilizzare campioni preparati in laboratorio attraverso l'uso di idonei agenti chimici-corrosivi.

Le leghe Rame-Berillio di fonderia presentano una struttura dendritica costituita da Rame α e particelle di composti intermetallici di Berillio di colore grigio-blu di lunghezza massima dell'ordine di 10 μm , le cui caratteristiche microstrutturali sono le medesime sia nei materiali per le colate (tipo cast), sia per i materiali che saranno sottoposti a lavorazione meccanica (tipo wrought). Questi composti di tipo primario che si formano durante il processo di solidificazione hanno una particolare morfologia simile agli ideogrammi cinesi "Chinese script". Una volta ultimata la solidificazione, iniziano invece a formarsi i cosiddetti berilluri di tipo secondario che presentano una morfologia astiforme, con orientamento preferenziale. Come si può evincere dal diagramma, mentre per leghe Cu-Be con concentrazioni di Berillio minori al 2,7 %, tali composti intermetallici si originano dalla fase α del rame al diminuire della temperatura ed alla conseguente incapacità del reticolo di inglobare in sé l'alligante, per leghe con concentrazioni superiori, la fase β ha origine per trasformazione peritettica dal liquido a circa 870 °C: si presenta come una rete interdendritica attorno alla fase α ricca di rame ed è facilmente osservabile nelle leghe di fonderia ad alta resistenza.

Ultimo passaggio di trasformazione è quello che dà origine alla fase γ . Anche in questo caso la sua modalità di formazione sarà differente in virtù della concentrazione di soluto che caratterizza il nostro materiale: per leghe Cu-Be con concentrazione di Berillio inferiori all'1,7 % circa, si originerà dalla fase α per ulteriore diminuzione della capacità di accogliere l'alligante al decrescere della temperatura.

Nelle leghe con percentuali superiori, la fase β si decomporrà attraverso trasformazione eutettoidica, a circa 620 °C, nelle fasi α e γ , fase β trasformata, presentando una microstruttura costituita da macchie angolari color bianco latte circondate da una sottile linea scura. Nei prodotti lavorati, successivi processi termomeccanici andranno ad affinare i berillidi di tipo primario in una dispersione di particelle più piccole, di colore grigio-blu e di forma quasi sferica.

Sia nelle leghe ad alta conduttività, che nelle leghe ad alta resistenza, i precipitati coerenti che sono responsabili dell'invecchiamento sono troppo piccoli per essere risolti con metodi ottici e possono essere individuati solamente attraverso l'uso di un microscopio a trasmissione elettronica.

Le microstrutture dovute all'invecchiamento proprie delle leghe ad alta resistenza sono distinguibili dai materiali non invecchiati data la presenza di striature di colore molto scuro che appaiono ai bordi grano in risposta all'attacco chimico che colpisce le particelle di precipitato promotrici del rafforzamento.

Le medesime leghe ad alta resistenza sovrainvecchiate o non sufficientemente invecchiate presentano invece colonie di fase γ in equilibrio ai bordi grano caratterizzate da una ben definita struttura lamellare che può essere osservata con un microscopio a trasmissione elettronica o un microscopio a scansione elettronica su campioni metallografici opportunamente preparati con agenti chimici.

Le microstrutture proprie dell'invecchiamento delle leghe ad alta conduttività sono indistinguibili al microscopio ottico dalle microstrutture dei medesimi materiali non invecchiati. Ciò è principalmente dovuto al fatto che le tensioni e deformazioni interne associate alla presenza dei precipitati metastabili sono troppo modeste per poter dare una risposta scura all'usuale attacco chimico utilizzato per l'analisi strutturale dei campioni metallurgici.

Capitolo 3 I trattamenti termici di ricottura ed invecchiamento.

La ricottura in soluzione

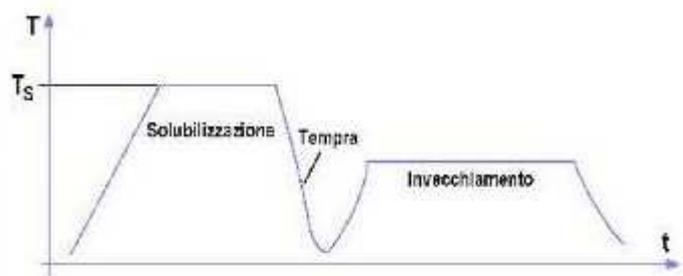
Il trattamento termico di ricottura viene applicato alle leghe Rame-Berillio per dare vita ad una singola fase α in soluzione solida in modo tale che il composto risulti allo stesso tempo dolce e duttile: per tale motivo tale processo viene anche chiamato **omogeneizzazione**, data la sua finalità di disperdere in maniera uniforme il Berillio nella matrice di Rame.

Con il termine ricottura in soluzione si è soliti indicare il medesimo trattamento applicato però ad un materiale che sia stato precedentemente sottoposto ad una lavorazione a freddo.

Il trattamento di ricottura è costituito da tre passaggi fondamentali:

1. la fase di **riscaldamento** ad una temperatura leggermente inferiore alla temperatura della linea del solidus in modo da sciogliere e diffondere la massima quantità di Berillio. Per le leghe ad alta resistenza si adotta una temperatura tra i 760 °C e gli 800 °C, mentre per le leghe ad alta conduttività il range di temperatura sarà 900 °C - 950 °C;
2. il **mantenimento alla temperatura di omogeneizzazione** per un tempo strettamente correlato alla natura del materiale ed alla forma del pezzo sottoposto al processo;
3. il **raffreddamento rapido a temperatura ambiente** in modo tale da bloccare il Berillio in soluzione solida supersatura.

Fig. 3.1: il diagramma temperatura-tempo dei trattamenti di ricottura ed invecchiamento.



Per la riuscita dell'operazione è necessario osservare un attento controllo di tre fattori.

- a. La **temperatura di riscaldamento**: l'utilizzo di temperature inferiori a quelle indicate possono dare vita ad una ricristallizzazione incompleta conseguente al mancato apporto energetico e comportare inoltre una diffusione insufficiente del soluto per soddisfare la seguente operazione di invecchiamento.
L'utilizzo di temperature troppo elevate determina invece una eccessiva crescita della grana od indurre una incipiente fusione nel materiale.
- b. Il **tempo di mantenimento a temperatura costante**: una volta che la temperatura di ricottura è stata raggiunta non è necessario mantenere il metallo a tale temperatura per periodi troppo prolungati. In genere fili o strisce sottili possono essere ricotti in meno di due minuti e prodotti a sezione maggiore possono essere mantenuti a temperatura di ricottura anche per trenta minuti. Durante questa procedura è importante essere sicuri di aver raggiunto la temperatura stabilita e normalmente il tempo di ricottura è di un'ora per pollice di spessore. Un prolungamento del tempo a temperatura costante non comporta un incremento della dispersione del Berillio, ma anzi può avere un effetto deteriorante andando a promuovere una eccessiva crescita della grana.
- c. La **velocità di raffreddamento**: raffreddamenti troppo lenti andrebbero evitati dal momento che consentono la precipitazione del Berillio durante questo trattamento e ciò causa una durezza troppo elevata e scarsi risultati in termini di risposta ad eventuali trattamenti di invecchiamento successivi.

E' quindi necessario poter disporre di adeguati sistemi per la misurazione ed il controllo della temperatura, nonché l'utilizzo di forni con atmosfera inerte leggermente riducente, libera da composti dello zolfo che potrebbero causare decolorazione nei pezzi trattati. E' necessario pulire con estrema attenzione lo stock di pezzi prima di sottoporli al trattamento: ossidi superficiali, lubrificanti carbonizzati ed altri film abrasivi possono comportare una seria usura degli utensili nelle susseguenti operazioni di formatura. Se fosse impossibile poter disporre di un'atmosfera inerte, la durata del processo dovrebbe essere ridotta al minimo ed il film di ossido che inevitabilmente si formerà dovrà essere rimosso attraverso decapaggio.

Un tipo di trattamento termico essenzialmente differente, conosciuto come **ricottura incompleta** è anch'esso utilizzato. Riscaldando per 8 ore a circa 550 °C la lega Rame-Berillio si causa la ricristallizzazione della fase α con una piccola crescita del grano. Allo stesso tempo una considerevole parte del Berillio precipita sotto forma di fase γ e sferoidizza. Il materiale in questa condizione ha una buona capacità di lavorazione a freddo, anche se la sua risposta ad un eventuale trattamento di raf-

forzamento per precipitazione risulta essere trascurabile: la fase γ agglomerandosi non induce più un impedimento al moto dei piani cristallini nella stessa entità attuata da un precipitato finemente disperso. L'indurimento conseguente alla lavorazione meccanica a freddo gli permette di essere formato direttamente in molle ed articoli simili e non richiede l'applicazione di ulteriori trattamenti termici oltre che il riscaldamento a 150 °C con durata dai 15 ai 30 minuti al fine di ottenere lo scarico delle tensioni interne (stress relief). In questo modo si possono raggiungere valori di resistenza alla trazione che variano da 900 a 1150 MPa.

L'invecchiamento

Con il termine invecchiamento, indurimento per precipitazione od anche invecchiamento per precipitazione si identifica un trattamento termico in cui una lega, già sottoposta a tempra di soluzione (o solubilizzazione) per congelare a bassa temperatura una struttura che compete a temperatura maggiore, paralizzando la diffusione del soluto in essa presente, viene riscaldata per alcune ore ad una temperatura detta temperatura di invecchiamento in modo da provocare la nucleazione e l'accrescimento delle particelle, coerenti o semicoerenti, di una nuova fase così da portarla ad assumere un nuovo assetto termodinamico stabile. Tali particelle costituiranno un ostacolo al moto delle dislocazioni, che possono superarle con il meccanismo di taglio od il meccanismo di Orowan (quest'ultimo è l'unico possibile se le particelle sono incoerenti).

Nel nostro caso la lega di Rame-Berillio, già sottoposta a trattamento di ricottura, verrà riscaldata fino ad una temperatura leggermente inferiore alla temperatura di equilibrio in modo da generare la nucleazione e la crescita dei precipitati di Berillio che sono responsabili dell'indurimento del materiale. La temperatura ed il tempo del processo sono anche in questo caso correlate alla tipologia di lega Rame-Berillio:

- per le Leghe ad alta resistenza avremo $T_{in} = 260 - 400$ °C e Durata = 0,1 - 4 h
- per le Leghe ad alta conduttività $T_{in} = 425 - 565$ °C e Durata = 0,5 - 8 h

Anche tale trattamento deve essere condotto con estrema attenzione in relazione

- alla composizione del materiale
- alla intensità della pregressa lavorazione a freddo effettuata.

La **lavorazione a freddo (cold work)** che può essere applicata tra il trattamento di ricottura in soluzione ed il trattamento di invecchiamento ha infatti la capacità, se condotto mantenendosi

all'interno di certi limiti, di incrementare sia la velocità che l'intensità di risposta all'invecchiamento stesso. La variabile di riferimento è la percentuale di riduzione della sezione trasversale del pezzo sottoposto a lavorazione a freddo:

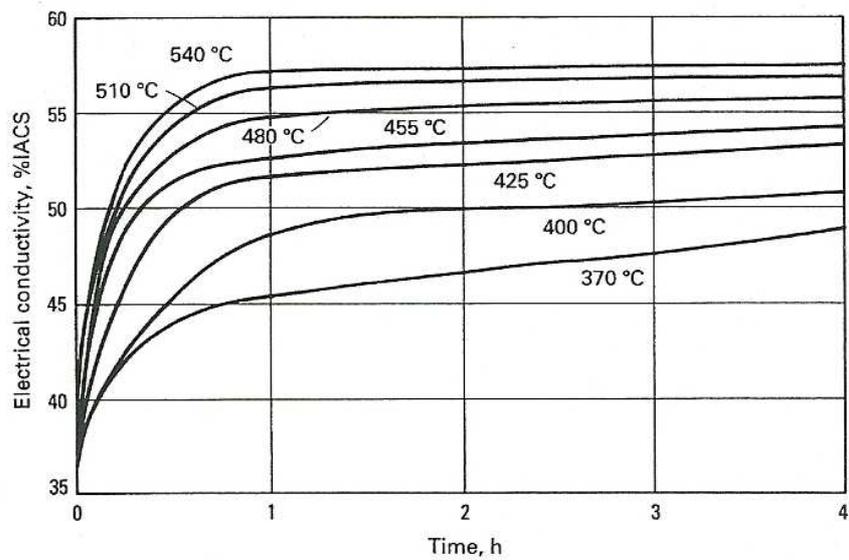
- per riduzioni di sezione trasversale pari al 40 %, avremo il picco di risposta all'invecchiamento ed otterremo dunque il massimo effetto di rafforzamento e durezza del materiale;
- per riduzioni di sezione trasversale superiori al 40 % otterremo una diminuzione del rafforzamento della lega dopo invecchiamento ed una perdita di duttilità anche senza procedere nell'applicazione del trattamento.

Per questa ragione a livello industriale si è soliti imporre per la realizzazione delle leghe commerciali un limite di sicurezza del 37 % circa sia per quanto riguarda la lavorazione a freddo delle strisce che dei fili.

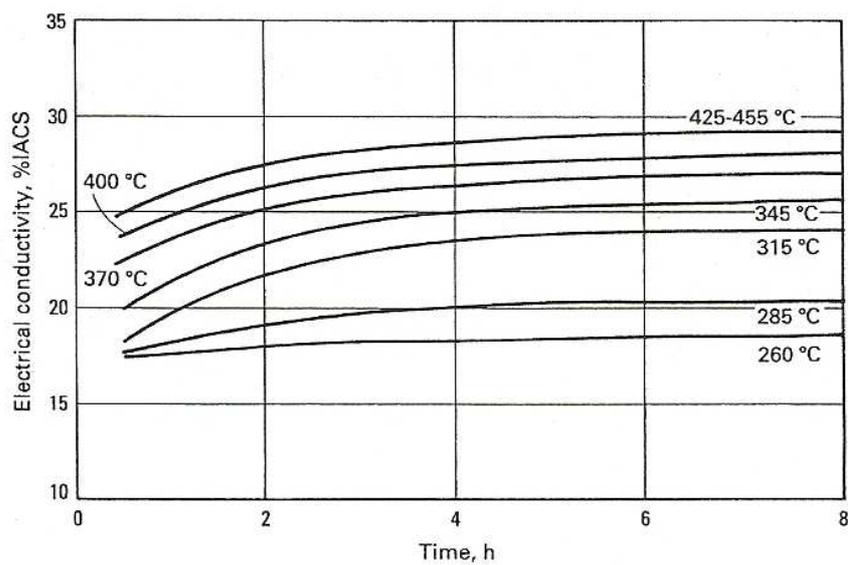
Altra caratteristica che viene influenzata dall'applicazione di un rafforzamento per precipitazione è la **conduttività elettrica**. Sottoponendo la lega Rame-Berillio ad una ricottura in soluzione, si incrementa la diffusione del soluto all'interno della matrice di Rame comportando di conseguenza una diminuzione della conduttività elettrica del materiale. Durante l'invecchiamento la conduttività elettrica aumenta quando il Berillio precipita dalla soluzione solida: la conduttività elettrica aumenta in funzione sia della temperatura che del tempo di invecchiamento, ma sicuramente, dei due fattori, la temperatura è molto più incisiva. Avremo dunque che ad esempio:

- nelle leghe ad alta conduttività la conduttività elettrica passa dal range di valori 20 % - 30% IACS in condizioni di sottoinvecchiamento, ad un incremento del range fino a 45 % - 60 % IACS dopo il rafforzamento da precipitazione;
- nelle leghe ad alta resistenza i valori di conduttività elettrica partono da 15 % - 19 % IACS in condizione di sottoinvecchiamento, per arrivare a 22 % - 28 % IACS come picco di invecchiamento.

Fig. 3.2: L'effetto della temperatura e della durata del trattamento di invecchiamento sulla conduttività elettrica della lega Rame-Berillio. (a) C17510 rafforzata tramite laminazione (roll-hardened); (b) Dati relativi alla lega C17200 nelle condizioni: ricotta, incrudite $\frac{1}{4}$, incrudimento $\frac{1}{2}$, e completamente incrudite (classificate come TB00 e TD04).



(a)



(b)

Altro fenomeno che è necessario tenere in considerazione è il **sovrainvecchiamento**, ossia una particolare condizione in cui viene a trovarsi il materiale qualora la combinazione dei fattori tempo di processo e temperatura di invecchiamento non siano stati attentamente calibrati in funzione della tipologia e delle pregresse lavorazioni a cui è stata sottoposta la nostra lega in Rame-Berillio.

Avremo ad esempio che

- per le leghe lavorate ad alta resistenza il picco di invecchiamento si avrà

$T_{inv} = 315\text{ °C} - 335\text{ °C}$, tempo_{inv} = 3 h per materiali ricotti in soluzione

$T_{inv} = 315\text{ °C} - 335\text{ °C}$, tempo_{inv} = 2 h per materiale lavorati a freddo

Se si desidera ottenere il massimo rafforzamento utilizzando temperature minori, saranno necessari tempi di processo più lunghi che rendono di fatto poco economico il trattamento dal punto di vista della produzione industriale. Si ha infatti un allungamento del tempo di ciclo produttivo a temperature elevate con un conseguente incremento dei costi per unità di prodotto.

A temperature superiori ai 340 °C, per pezzi sottoposti a costante lavorazione a freddo il tempo di accadimento del massimo relativo della curva di rafforzamento-indurimento si accorcia al crescere della temperatura a cui viene eseguito il trattamento. Lo stesso effetto si ha se si mantiene costante la temperatura, sempre superiore ai 340 °C, e si incrementa la lavorazione a freddo, incrementando la riduzione della sezione trasversale: avremo un aumento del massimo relativo nel rafforzamento ed un accorciamento dei tempi di attuazione. Per temperature inferiori ai 330 °C il rafforzamento dovuto ad invecchiamento è dovuto alla formazione di precipitati coerenti metastabili. Alla medesima temperatura si formano anche precipitati in equilibrio che vanno però a concentrarsi ai bordi grano.

- per le leghe lavorate ad alta conduttività avremo invece

$T_{inv} = 450\text{ °C} - 480\text{ °C}$, tempo_{inv} = 2 h – 3h per entrambe le tipologie.

Il sovrainvecchiamento è in questo caso meno pronunciato e può essere sfruttato a vantaggio dato che l'apprezzabile contenuto di Nichel e Cobalto aumenta la stabilità termica dei precipitati da invecchiamento.

Trattamenti di sottoinvecchiamento, di picco di invecchiamento e di sovrainvecchiamento.

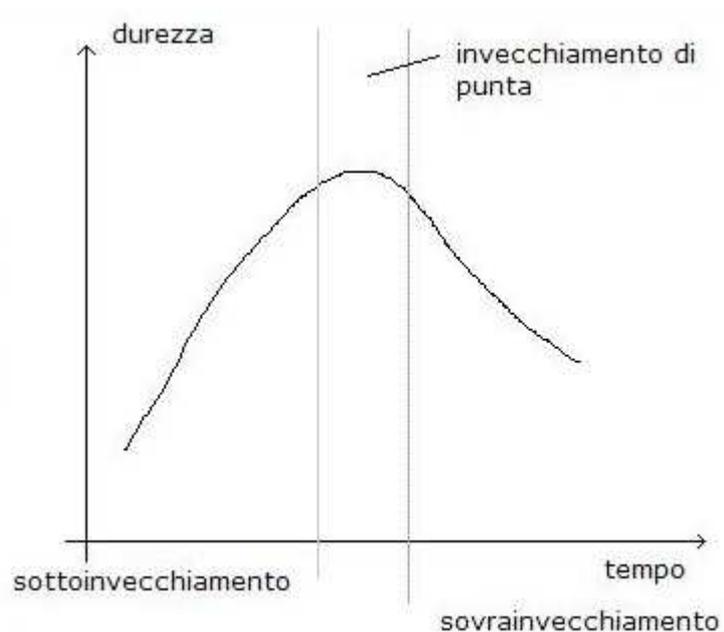
Con queste tre differenti terminologie si vanno ad identificare tre diversi risultati che si possono ottenere sottoponendo un materiale al trattamento termico di invecchiamento e a determinare ciascuno di questi esiti concorrono almeno quattro variabili : la composizione della lega Rame-Berillio (e quindi la sua denominazione), la temperatura di invecchiamento correlata alla durata e l'intensità delle pregresse lavorazioni a freddo, avvenute o meno. Per

sottoinvecchiamento: si intende un processo in cui i materiali sono stati invecchiati per un tempo insufficiente per ottenere la massima durezza possibile ad una data temperatura;

picco di invecchiamento: è il massimo risultato ottenibile in termini di rafforzamento, durezza, grazie all'utilizzo delle giuste combinazioni di temperatura e tempo;

sovrainvecchiamento: termine che indica un processo di rafforzamento per precipitazione sviluppato con valori di temperatura e tempo superiori a quelli che determinano il risultato massimale.

Fig. 3.3: diagramma relativo al livello di invecchiamento subito dal materiale in funzione della durata di trattamento subito.



Va ricordato che i materiali sottoinvecchiati mantengono la capacità di incrementare la propria durezza sottoponendosi ad un invecchiamento ulteriore, mentre ciò è precluso al materiale sovrainvecchiato. Il produttore, in relazione ai livelli di durezza o duttilità che vuole fare acquisire alla lega, è chiamato a scegliere la giusta combinazione di temperatura e di intensità della lavo-

razione a freddo da impartire: se vorrà dunque ottenere un livello di durezza non eccessiva, al fine di privilegiare la duttilità e quindi la formabilità del materiale, dovrà ridurre il cold working e impartire condizioni di trattamento termico più prossime a quelle del sottoinvecchiamento (alta temperatura, breve durata; bassa temperatura, lunga durata) o del sovrainvecchiamento (alta temperatura, lunga durata).

Qualora, attuando tali procedure, si pervenga a livelli di durezza troppo bassi, sarà necessario ricorrere ad una nuova ricottura che permetterà alla lega di essere sottoposta ad un nuovo trattamento di invecchiamento, ma che allo stesso tempo annullerà ogni contributo di rafforzamento derivante da una precedente lavorazione a freddo impartita al materiale.

Per quanto riguarda il controllo di processo, è necessario prestare molta più attenzione nel selezionare temperatura e tempo di trattamento quando si intendono usare il sottoinvecchiamento od il sovrainvecchiamento per ottenere il giusto livello di durezza o duttilità: l'invecchiamento mirato ad ottenere il picco di durezza risente infatti in maniera minore di piccole fluttuazioni di temperatura, né di allungamenti di tempo una volta che questo massimo sia stato raggiunto ed acquisito dal materiale.

Essendo l'invecchiamento un trattamento termico, particolare importanza riveste la fase di riscaldamento della lega Rame-Berillio, la tipologia di fornace che viene utilizzata e la procedura seguita nell'eseguire tale processo. Per quanto concerne quest'ultimo elemento, è buona norma distribuire i carichi dei pezzi da lavorare in maniera il più possibile uniforme all'interno del forno in modo tale da assicurarsi un uniforme livello di riscaldamento ed uguali tempi di omogeneizzazione a tutti i componenti: otterremo così una coerente risposta di invecchiamento su ogni pezzo del medesimo carico.

Il sistema di riscaldamento usato è altresì importante:

- ✓ **i forni a muffola** sono al confronto i più economici ma tendono ad essere lenti nell'operazione di riscaldamento, venendo per lo più usati per studi di campionatura in laboratorio;
- ✓ **i forni con circolazione d'aria** sono invece operativamente più rapidi, garantendo inoltre una maggiore uniformità di temperatura in tutta la zona riscaldata. Va detto che pur essendo la temperatura richiesta per l'invecchiamento non così elevata da causare una seria ossidazione superficiale, sarebbe più idoneo utilizzare forni con atmosfere protette, moderatamente riducenti e libere da composti dello zolfo che, come già accennato, provocano colorazioni (è necessaria una attenta pulizia che liberi la superficie dei pezzi da ogni traccia di sporco e di lubrificanti, dato che in molti casi questi ultimi contengono appunto dello zolfo);
- ✓ **i bagni di sale:** danno un veloce riscaldamento, garantendo una buona uniformità di temperatura. Se si utilizza tale tecnica è bene ricordarsi di riporre molta attenzione nel lavare a

fondo i pezzi, dal momento che sali residuali possono essere la causa di successivi fenomeni di corrosione;

- ✓ **i forni sottovuoto:** l'utilizzo di forni sottovuoto necessita della schermatura dei pezzi dalle radiazioni dirette. E' necessario comunque, prima dell'uso, riempire il forno con un gas inerte in modo da garantire sul carico un più uniforme trasferimento di calore per convezione.

Dal momento che gli strumenti a molla ed altri prodotti devono essere realizzati attenendosi a strette tolleranze dimensionali, nella loro lavorazione, specialmente durante i trattamenti termici quali la ricottura e l'invecchiamento, è bene avvalersi dell'utilizzo di adeguati sistemi di serraggio. Infatti l'indurimento da precipitazione, specialmente nell'intervallo di sovrainvecchiamento, tende ad eliminare le tensioni interne del materiale ed a produrre di conseguenza un aumento dimensionale dei singoli pezzi: l'utilizzo dei fissatori permette di eliminare tale problema preservando l'accuratezza dimensionale fissata in fase di progettazione. A causa della maggiore massa di metallo che si viene ad inserire nel forno per la presenza dei sistemi di fissaggio, il tempo totale di riscaldamento risulterà più lungo e, per tal motivo inoltre, i produttori di una certa esperienza tendono ad adottare temperature leggermente più alte, pratica che accresce lo scarico delle tensioni interne.

Il trattamento di decapaggio.

Il decapaggio è una operazione effettuata per eliminare tramite soluzione di acido (cloridrico in Italia, solforico negli Stati Uniti) l'incrostazione ossida che viene a formarsi sulla superficie dei pezzi in lega di Rame-Berillio (ma anche di altre leghe) a seguito dei trattamenti termici subiti. Viene inoltre utilizzato per eliminare tensioattivi (sapone che aumentano la bagnabilità), inibitori di corrosione o altre sostanze chimiche, come anche scaglie di laminazione o residui di ruggine dai prodotti siderurgici laminati a caldo. E' uno dei metodi comunemente impiegati per la preparazione delle superfici di acciaio su cui si deve applicare il rivestimento protettivo anticorrosivo.

Per quanto concerne, nello specifico, lo strato di ossido provocato da invecchiamento, si è soliti procedere attuando un decapaggio in una soluzione costituita da 1 volume di acido solforico e da 4 volumi di acqua. La superficie può essere susseguentemente resa più brillante sia in acido nitrico al 30 % o attraverso una veloce immersione in un bagno di acido solforico concentrato, dicromato di sodio e acqua. Come regola di base è indispensabile che gli articoli poi siano lavati profondamente in modo tale da rimuovere ogni traccia di acido prima di venire asciugati. Un sovradecapaggio può provocare un irruvidimento della superficie che andrà a danneggiare le proprietà meccaniche.

Capitolo 4 Le proprietà fisiche delle leghe Rame-Berillio.

Le leghe rame-Berillio vengono influenzate nelle loro proprietà fisiche da un insieme di fattori quali ad esempio il **contenuto di Berillio**, cruciale anche nella classificazione delle stesse leghe e quindi nel complesso delle loro caratteristiche, ed anche dalla presenza di **elementi terzi** come il Nichel ed il Cobalto. In molti casi comunque il peso di queste due variabili non produrrà effetti così drastici come invece vedremo accadrà nel caso delle proprietà meccaniche. Diverso è il discorso da farsi sui **trattamenti termici** che riescono ad essere incisivi anche nella variazione delle proprietà fisiche delle leghe Rame-Berillio.

Tabella 4.1: dati relativi alle proprietà fisiche delle leghe Rame-Berillio.

Cu-Be	Densità	Modulo Elastico	Coefficiente di espansione termica 20-200 °C	Conduttività termica	Intervallo delle temperature di fusione
	g/cm ³	GPa	10 ⁻⁶ /°C	W / m °C	°C
Leghe lavorate plasticamente					
C17200 (a) HS	8,36	131	17	105	870-980
C17300 (a) HS	8,36	131	17	105	870-980
C17000 (a) HS	8,41	131	17	105	890-1000
C17510 (b) HC	8,83	138	18	240	1000-1070
C17500 (b) HC	8,83	138	18	200	1000-1070
C17410 HC	8,80	138	18	230	1020-1070
Leghe colate					
C82000 HC	8,83	140	18	195	.....
C82200 HC	8,83	140	18	250	.....
C82400 HS	8,41	130	18	100	.....
C82500 HS	8,30	130	18	97	.....
C82510 HS	8,30	130	18	97	.....
C82600 HS	8,22	130	18	93	.....
C82800 HS	8,14	130	18	90	.....

(a) Densità prima dell'invecchiamento:= 8,25 g / cm³

(b) Densità prima dell'invecchiamento:= 8,75 g / cm³

Come si può dedurre dall'osservazione dei valori riportati da tale tabella, l'incremento progressivo della concentrazione di Berillio provoca una riduzione della densità della lega ed un conseguente abbassamento delle relative temperature di liquidus e solidus, mentre risulta ininfluenza in relazione al coefficiente di espansione termica che mantiene un valore costante di $17 \div 18 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Sia la conduttività elettrica, che la conduttività termica risentono della quantità di Berillio presente in lega e, come già evidenziato in precedenza definendo la classificazione di tali leghe, tali caratteristiche vengono ridotte in proporzione al crescere della quantità del soluto: le leghe ad alta conduttività sono infatti quelle a minor contenuto di Berillio.

Si può inoltre notare che i dati per ciascuna delle proprietà fisiche riportate acquisiscano valori per lo più identici od almeno interni ad uno stretto range in funzione del fatto che la lega sia appartenente al gruppo delle leghe Cu-Be ad alta conduttività od invece delle leghe ad alta resistenza: le due classi di leghe si differenziano nettamente per quanto riguarda i valori relativi alla densità, alla conduttività termica, alla temperatura di fusione, mentre presentano dati simili rispetto al coefficiente di espansione termica, evidenziando un comportamento di risposta alla temperatura del tutto simile ed analogo a quello dell'acciaio. Proprio per questa ragione le leghe Rame-Berillio sono compatibili all'acciaio nella produzione di assemblati per ampi intervalli di temperature.

Le due classi di leghe presentano ulteriori elementi di comunanza se si considerano altre variabili fisiche, quali ad esempio il calore specifico, la permeabilità magnetica ed il coefficiente di Poisson.

Il calore specifico passa dal valore di $375 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ a temperatura ambiente, a $420 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$ alla temperatura di $90 ^\circ\text{C}$. Il coefficiente di permeabilità magnetica è invece molto prossimo all'unità e ciò rende idonee le nostre leghe alla costruzione delle custodie dei dispositivi per la rilevazione di campi magnetici e per altre applicazioni in cui è essenziale che il materiale usato sia trasparente a tali campi. Inoltre tutte le leghe Rame-Berillio presentano un coefficiente di Poisson di 0,3 (il Rame, suo costituente principale, presenta un valore di 0,3: la concentrazione di soluto non influenza tale modulo).

In conclusione è bene ricordare come i **trattamenti termici** risultino essere un elemento di influenza solamente per quanto concerne i valori assunti dalla conduttività elettrica, sia nel caso delle leghe Rame-Berillio ad alta resistenza che in quelle ad alta conduttività. Per quanto riguarda le prime, esse presentano, una volta che siano state trattate termicamente, una conduttività elettrica migliore di quella di altri materiali con comparabili proprietà meccaniche. Le condizioni di invecchiamento che procurano i massimi livelli di rafforzamento non corrispondono a quelle che determinano i massimi valori di conduttività: è questo uno dei casi in cui un sovrainvecchiamento moderato viene perseguito dai produttori in modo tale da agglomerare in maniera ulteriore il precipitato di Berillio. Sempre

come conseguenza del rafforzamento per precipitazione, le leghe ad alta resistenza si contraddistinguono per avere un modulo elastico che è circa $2/3$ di quello degli acciai per molla con simili proprietà. Per la produzione di strumenti a molla questo è un importante vantaggio dato che, per molle di forma simile, un minor carico produrrà una maggiore deformazione, manifestazione stessa di una maggiore sensibilità dello strumento. Per quanto concerne le leghe ad alta conduttività anch'esse subiscono l'influenza dei trattamenti termici: grazie ad essi la conduttività elettrica è in grado di raggiungere valori anche superiori a 50 % IACS.

Capitolo 5 Le proprietà meccaniche.

Tra le principali caratteristiche dei materiali, le proprietà meccaniche rappresentano un importante fonte di informazioni per capire come il materiale, nel nostro caso le leghe Rame-Berillio, risponda alle sollecitazioni esterne e come sia in grado o meno di resistere ad esse nel tempo.

A differenza di quanto visto con le caratteristiche fisiche, le leghe Rame-Berillio, per quanto riguarda le proprietà meccaniche, risentono notevolmente dei trattamenti termici e delle lavorazioni meccaniche subiti tanto che viene utilizzata una specifica denominazione per poter descrivere all'utilizzatore quale percorso abbia affrontato il materiale.

I prodotti lavorati (wought products) possono infatti essere sottoposti a due diverse tipologie di trattamento:

✓ **Trattamento termico** a cui verrà associata la suddetta denominazione

A o **TB00** per condizione di solution annealing

¼H o **TD01** per condizione di lavorazione a freddo incrudito ¼

½H o **TD02** per condizione di lavorazione a freddo incrudito ½

H o **TD04** per condizione di lavorazione a freddo incrudito completamente

Le differenti denominazioni che riguardano la lavorazione a freddo fanno riferimento a tre diverse intensità di trattamento cui si può sottoporre il pezzo e che corrispondono a tre diversi livelli di riduzione della sezione trasversale. Va inoltre ricordato che i prodotti sottoposti a tale processo dovranno essere invecchiati da parte dell'utilizzatore dopo la formatura: nella condizione as-shipped (prima dell'invecchiamento), le leghe Rame-Berillio presentano la massima duttilità e la minima durezza e possono quindi assumere configurazioni anche alquanto complesse. L'invecchiamento fornisce poi al materiale quel livello di durezza necessario per mantenere la forma acquisita anche se sottoposto ad intense sollecitazioni esterne: l'applicazione di lavorazione a freddo e susseguentemente del rafforzamento per precipitazione permette di far acquisire alla lega Rame-Berillio livelli di durezza non raggiungibili dalle altre leghe di Rame.

E' di conseguenza necessario identificare con una nuova denominazione i prodotti lavorati che abbiano subito anche l'invecchiamento dal momento che presenteranno caratteristiche differenti. Useremo perciò i seguenti codici

- AT o TF00 per una lega Cu-Be ricotta + invecchiata
- ¼HT o TH01 per una lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita ¼ + invecchiata
- ½HT o TH02 per una lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita ½ + invecchiata
- HT o TH04 per una lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita completamente
+ invecchiata

✓ **Trattamento meccanico di rafforzamento (Mill hardened)** a cui viene associata una ulteriore specifica codificazione

- AM o TM00 per la lega Cu-Be ricotta + laminata
- ¼HM o TM01 per la lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita ¼ + laminata
- ½HM o TM02 per la lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita ½ + laminata
- HM o TM04 per la lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita completamente
+ laminata
- SHM o TM05 per la lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita completamente
+ laminata
- XHM o TM06 per la lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita completamente
+ laminata
- XMHS o TM08 per la lega Cu-Be lavorata a freddo incrudita completamente
+ laminata

Per tali tipologie di materiali i trattamenti di lavorazione a freddo e l'invecchiamento vengono eseguiti dal fornitore e non necessitano di trattamento termico da parte dell'acquirente dopo la formatura, il che sta ad indicare quale già alto livello di durezza e resistenza abbiano. Le leghe Rame-Berillio rafforzate meccanicamente presentano infatti livelli medio-alti di durezza ed una buona duttilità, il che li rende idonei alla produzione di una grande varietà di componenti.

Sebbene le proprietà meccaniche siano strettamente correlate ai trattamenti subiti dal materiale, esse dipendono in larga misura anche dalla **forma del prodotto** e ciò lo si può ben capire ricordando come tali qualità altro non descrivano se non la modalità con cui in questo caso la lega Rame-

Berillio risponda alle sollecitazioni esterne ad essa applicate secondo diverse direzioni: da qui dunque deriva l'importanza della conformazione del materiale e la necessità di specificare e correlare le proprietà meccaniche alla forma con la quale il produttore fornisce la lega. Tra i prodotti lavorati (wrough products) è bene dunque distinguere tra:

- a) Le proprietà meccaniche dei prodotti lavorati con conformazione di lamine (strips):
 i cui valori sono stati per la prima volta dedotti tramite un insieme di studi e prove effettuate da Gohn e Arnold su ben 26 campioni precedentemente sottoposti a sei combinazioni di trattamenti termici e lavorazioni a freddo. I campioni erano costituiti appunto da Rame –Berillio in forma di striscia con una concentrazione di soluto tra l'1,85 % ed il 2,25 %, con e senza l'aggiunta di piccole quantità di Cobalto, Nichel e Ferro. I dati raccolti, seppur oggi superati in precisione da più moderne tecniche di analisi, hanno permesso di dedurre importanti correlazioni tra i valori assunti da alcune delle proprietà meccaniche ed altre variabili relative la lega Rame-Berillio.

Tabella 5.1: dati relativi ad alcune proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio in funzione del trattamento di rafforzamento subito.

Condizione	Resistenza a trazione MPa	Limite di proporzionalità MPa	Limite di elasticità MPa	Modulo di Young GPa	Durezza Vickers	Resistenza a fatica per 10 ⁸ cicli MPa
Ricottura completa						
Valore medio	484,88	121,6	165,68	118,73	110	220,4
Ricottura + invecchiamento						
Valore medio	1106,56	421,04	515,28	130,61	328	234,08
Ricottura + laminazione ½ hard						
Valore medio	629,28	304	407,36	123,62	172	224,96
Laminazione ½ hard + invecchiamento						
Valore medio	1360,4	524,4	665,76	133,06	387	252,32
Ricottura + laminazione 1 hard						
Valore medio	737,2	380	471,2	118,58	214	235,6
Laminazione 1 hard + invecchiamento						
Valore medio	1241,84	478,8	623,2	135,13	376	279,68

Arnold e Gohn evidenziarono come ad esempio la **resistenza a trazione** di un campione sottoposto a trattamento completo (ricotto in soluzione + laminato a freddo + invecchiato) modificasse il proprio valore principalmente in funzione di tre fattori:

- la forma del materiale: la forma con cui il materiale viene fornito ha una relativa piccola influenza sulle caratteristiche meccaniche, sebbene sia risultato che la lega Cu-Be sottoforma di filamento, a parità di intensità di lavorazione a freddo applicata, tenda ad essere alquanto più resistente che il medesimo materiale sottoforma di nastro o di barra;
- la concentrazione di Berillio è un secondo importante fattore di influenza: i valori di resistenza a trazione e di durezza man mano che la percentuale di soluto cresce, pur restando nel range sopra indicato, crescono proporzionalmente di valore. Una più alta presenza di alligante attua una più alta barriera al moto delle dislocazioni ed incrementa di conseguenza le grandezze indicate.
- il livello di intensità della lavorazione a freddo applicata: anche in questo caso maggiore è il grado di lavorazione a freddo applicata, maggiore risulta essere il livello di resistenza a trazione raggiunto, ipotizzando comunque di aver attuato altri trattamenti con i medesimi parametri di processo. La tabella sopra riportata rileva comunque come il trattamento di invecchiamento agisca quasi da moltiplicare degli effetti sulla resistenza a trazione procurati dalla ricottura e dalla laminazione.

Per quanto riguarda invece la **resistenza a fatica**, che in condizione di completo trattamento termico raggiunge un valore di 288 MPa per 108 cicli, appare influenzata maggiormente da

- da ambienti corrosivi: la resistenza a fatica appare moderatamente indebolito da ambienti corrosivi. Per esempio quando viene testato in soluzione salina, il Rame-Berillio mantiene sopra al 90 % il proprio valore del limite di fatica in atmosfera ordinaria. Questa buona resistenza alla fatica da corrosione fa sì che la lega Cu-Be sia utilizzata in condizioni che sarebbero proibitivi per molti altri materiali con proprietà meccaniche comparabili;
- dai trattamenti termici subiti dal materiale, ma non in maniera così determinante come vedremo invece accadere per altre proprietà meccaniche. Dal punto di vista di resistenza a stress ciclici, sembrerebbe esservi un vantaggio nell'evitare condizioni di eccessivo indurimento della lega, dove il materiale risulta più probabilmente essere

più sensibile agli intagli o a piccole imperfezioni superficiali e maggiormente inclini a mantenere tensioni residue che sono normalmente dannose alla vita a fatica.

La prosecuzione degli studi di Arnold e Gohn ha poi permesso di capire il comportamento delle medesime proprietà meccaniche rispetto ad un'altra importante variabile, la **temperatura di esercizio**, ossia la temperatura alla quale gli strumenti con componenti in lega Rame-Berillio vengono impiegati. Sottoporre infatti il materiale a condizioni di lavoro implicanti stress termico comporta inevitabilmente una riduzione in valore delle caratteristiche meccaniche: ad esempio la resistenza alla trazione scende da 1415 MPa a 1290 MPa quando la lega viene esposta a 200 °C per 500 ore (altri test hanno però evidenziato decrementi molto più limitati). In situazioni che prevedono l'insorgenza di crepe, comunque, il Rame-Berillio, come altri invecchiati, potrebbe essere soggetto a rottura improvvisa con o senza il manifestarsi di una qualche piccola deformazione anticipatoria. Del tutto diverso è il comportamento delle proprietà meccaniche quando la lega viene utilizzata a temperature inferiori alla temperatura standard: in modo analogo a tutte le leghe di Rame, le leghe Rame-Berillio vedono il miglioramento di tutte le proprie qualità meccaniche quando la temperatura viene ridotta come si può dedurre osservando la tabella sottostante.

Tabella 5.2: le proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio e la temperatura di esercizio.

Condizione		Temperature °C				
		T ₀	-50	-100	-150	-200
Ricottura + invecchiamento						
Resistenza a trazione	MPa	1292	1307,2	1322,4	1352,8	1428,8
Limite di elasticità (*)	MPa	972,8	1079,2	1094,4	1124,8	1185,6
Modulo di Young	GPa	121,3	123,4	125,5	129,6	132,4
Resilienza	J	5,424	6,780	6,780	8,136	9,492
Ricottura + laminazione ½ hard + invecchiamento						
Resistenza a trazione	MPa	1322,4	1337,6	1368	1428,8	1504,8
Limite di elasticità (*)	MPa	1155,2	1216	1428,8	1337,6	1352,8
Modulo di Young	GPa	124,8	127,5	127,5	126,8	131
Resilienza	J	6,780	6,780	6,780	8,136	9,492

(*) Limite di elasticità := resistenza allo snervamento (0,2 % di deformazione).

Ovviamente se le proprietà sono finalizzate alla costruzione di un componente che lavorerà a temperatura ambiente, ne verrà un incremento che comporterà un aumento nei margini di sicurezza per quando le leghe Rame-Berillio verranno utilizzati a basse temperature. In particolar modo non ci sarà motivo di temere la fragilità dati gli incrementi di duttilità insieme con quelle di resistenza che comporteranno anche un effettivo incremento di tenacità. Ciò è confermato dal leggero ma netto aumento osservabile nei valori riportati per la prova di Charpy riportati sopra. Inoltre, come già accennato prima, il modulo di elasticità tende a crescere al diminuire della temperatura; di conseguenza le molle in Rame-Berillio diventano leggermente più rigide alle basse temperature. Ciò deve essere preso in considerazione ad esempio nella progettazione delle molle calibrate finalizzata all'impiego per strumenti operanti in condizioni termiche rigide.

Sulla scia degli studi di Arnold e Gohn, altre analisi vennero condotte sulle leghe Rame-Berillio con basso contenuto di Berillio, evidenziando anche in esse un incremento dei valori delle proprietà meccaniche al diminuire della temperatura : ad esempio per quanto riguarda la resistenza alla trazione oppure i risultati ottenuti dalla prova di Charpy. Data l'alta conducibilità elettrica di tali materiali, anche ad alte temperature si può apprezzare una buona tenuta dei valori delle proprietà meccaniche: la buona conducibilità elettrica e termica permette a tali leghe di dissipare agevolmente il calore e di mantenere buone qualità meccaniche anche in condizioni termiche che altrimenti risulterebbero gravose.

Facendo riferimento a studi più recenti ed alla classificazione delle leghe Rame-Berillio più attuale, nella descrizione dei valori assunti dalle principali proprietà meccaniche è bene sempre distinguere in primo luogo tra leghe ad alta resistenza e leghe ad alta conduttività ed, in secondo luogo, per ciascuna di questa due tipologie, specificare quale procedura di rafforzamento sia stata utilizzata. Utilizzando questo schema riportato di seguito alcuni valori di proprietà meccaniche delle principali leghe in Rame-Berillio: per le restanti tipologie si rimanda alle tabelle sotto riportate.

- Le leghe ad alta resistenza trattate termicamente (valori massimali)

C17200	resistenza a trazione	1520 MPa	per il picco di invecchiamento
	conduttività elettrica	20 % IACS	

C17000	resistenza a trazione	1415 MPa	per il picco di invecchiamento
	conduttività elettrica	20 % IACS	

Dai dati riportati in tabella emerge che nel caso delle leghe ad alta resistenza la duttilità decresce con l'incremento della lavorazione a freddo.

- Le leghe ad alta resistenza rafforzate meccanicamente (valori massimali)

C17200 resistenza a trazione 680 – 1320 MPa per varie tempere

Dall'analisi dei valori si evidenzia che nelle leghe rafforzate meccanicamente la duttilità decresce all'aumentare della resistenza.

- Le leghe ad alta conduttività trattate termicamente (valori massimali)

C17500 e C17510 resistenza a trazione > 940 a MPa

conduttività elettrica > 45 % IACS

- Le leghe ad alta conduttività rafforzate meccanicamente (valori massimali)

C17500 e C17510 resistenza a trazione 510 – 1040 MPa

conduttività elettrica > 60 % IACS

Tabella 5.3: le proprietà meccaniche delle leghe Cu-Be in forma di strisce nelle varie condizioni.

C17000		Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allungamento relativo	Durezza	Conduttività elettrica	Condizioni di invecchiamento
		MPa	MPa	%		IACS	
Rafforzate grazie trattamento termico							
A	TB00	410-540	190-415	35-65	45-78 HRB	15-19	.....
¼ H	TD01	520-610	410-550	15-40	68-90 HRB	15-19	.....
½ H	TD02	590-690	515-660	12-30	88-96 HRB	15-19	.....
H	TD04	690-900	620-770	2-10	96-104 HRB	15-19	.....
Rafforzate grazie trattamento termico ed invecchiamento							
AT	TF00	1030-1250	890-1140	3-20	33-38 HRB	22-28	3h a 315 °C
		1105-1275	860-1140	4-10	34-40 HRC	22-28	3h a 345 °C
¼ HT	TH01	1100-1320	930-1210	3-15	35-40 HRC	22-28	2h a 315 °C
		1170-1345	895-1170	3-6	36-41 HRC	22-28	3h a 330 °C
½ HT	TH02	1170-1380	1030-1250	1-10	37-42 HRC	22-28	2h a 315 °C
		1240-1380	956-1240	2-5	38-42 HRC	22-28	2h a 330 °C
HT	TH04	1240-1380	1060-1250	1-6	38-44 HRC	22-28	2h a 315 °C
		1275-1415	1070-1345	2-5	39-43 HRC	22-28	2h a 330 °C

Rafforzate grazie a trattamento meccanico								
AM	TM00	680-760	480-660	18-30	23	HRC	18-33	.....
¼ H	TM01	750-830	550-760	15-25	20-26	HRC	18-33	.....
½ H	TM02	820-940	650-870	12-22	24-30	HRC	18-33	.....
HM	TM04	930-1040	750-940	9-20	28-35	HRC	18-33	.....
SHM	TM05	1030-1110	860-970	9-18	31-37	HRC	18-33	.....
XHM	TM06	1060-1210	930-1140	3-10	32-38	HRC	18-33	.....

C17200 Condizione	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allunga- mento rela- tivo	Durezza	Condutti- vità elet- trica	Condizioni di invecchiamen- to

Rafforzate tramite trattamento termico								
A	TB00	410-540	200-380	35-60	45-78	HRB	15-19	.....
¼ H	TD01	510-610	410-560	20-45	68-90	HRB	15-19	.....
½ H	TD02	580-690	510-660	12-30	88-96	HRB	15-19	.....
H	TD04	630-830	620-800	2-18	96-102	HRB	15-19	.....

Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo								
AT	TF00	1130-1350	960-1205	3-15	36-42	HRC	22-28	3h a 315 °C
		1105-1310	895-1205	3-10	34-40	HRC	22-28	½ h a 370 °C
¼ HT	TH01	1200-1420	1030-1275	3-10	36-43	HRC	22-28	2h a 315 °C
		1170-1380	965-1275	2-6	36-42	HRC	22-28	¼ h a 330 °C
½ HT	TH02	1270-1490	1100-1350	1-8	38-44	HRC	22-28	2h a 315 °C
		1240-1450	1035-1345	2-5	38-44	HRC	22-28	¼ h a 370 °C
HT	TH04	1310-1520	1130-1420	1-6	38-45	HRC	22-28	2h a 315 °C
		1275-1480	1105-1415	1-4	39-45	HRC	22-28	¼ a 370 °C

Rafforzate tramite trattamento meccanico								
AM	TM00	680-760	480-660	16-30	23	HRC	17-28	.....
¼ H	TM01	750-830	550-760	15-25	20-26	HRC	17-28	.....
½ H	TM02	820-940	650-870	12-22	23-30	HRC	17-28	.....
HM	TM04	930-1040	750-940	9-20	28-35	HRC	17-28	.....
SHM	TM05	1030-1110	860-970	9-18	31-37	HRC	17-28	.....
XHM	TM06	1060-1210	930-1180	4-15	32-38	HRC	17-28	.....
XHMS	TM08	1200-1320	1030-1250	3-12	33-42	HRC	17-28	.....

C17400 e C17410 Condizione	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allungamento relativo	Durezza	Conduttività elettrica	Condizioni di invecchiamento
	MPa	MPa	%		IACS	
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo						
HT	750-900	650-870	7-17	27 HRC	45-55	.....

C17500 e C17510 Condizione	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allungamento relativo	Durezza	Conduttività elettrica	Condizioni di invecchiamento
	MPa	MPa	%		IACS	
Rafforzate tramite trattamento termico						
A TB00	240-380	170-320	20-40	20-45 HRB	20-30	.....
H TD04	480-590	370-560	2-10	78-88 HRB	20-30	.....
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo						
AT TF00	725-825	550-725	8-12	93-100 HRB	45-60	3h a 445°C
	680-900	550-690	10-25	92-100 HRB	45-60	3h a 480°C
HT TH04	792-950	725-860	5-8	97-104 HRB	45-52	2h a 445°C
	750-940	650-830	8-20	95-102 HRB	48-60	2h a 480°C
Rafforzate tramite trattamento meccanico						
AM TM00	680-900	550-690	10-25	92-100 HRB	45-60	.....
HM TM04	750-940	650-830	8-20	95-102 HRB	48-60	.....
HTR	820-1040	750-970	1-5	98-103 HRB	48-60	.....
HTC	510-590	340-520	8-20	79-88 HRB	> 60	.....

b) Le proprietà meccaniche dei prodotti lavorati con **altre tipologie di forma:**

come già accennato in precedenza la forma dei prodotti lavorati incide sul valore assunto dalle proprietà meccaniche per cui è necessario distinguere tra prodotti lavorati a forma di striscia e prodotti lavorati con altra forma come ad esempio lastre, barre, aste, fili e tubi, anch'essi rafforzabili attraverso le diverse modalità di trattamento già descritte per le strisce: ricotte in soluzione, ricotte e lavorate a freddo ed infine laminate.

I fili presentano combinazioni di resistenza e duttilità del tutto simili a quelli delle corrispondenti leghe prodotte sottoforma di strisce, mentre le lamine, le barre ed i tubi acquisiscono livelli di rafforzamento correlati allo spessore del prodotto lavorato da

una funzione di inversa proporzionalità: quanto maggiore è lo spessore, tanto più diminuirà a parità di condizioni il valore delle proprietà meccaniche.

Prodotti forgiati e prodotti estrusi a caldo sono disponibili anch'essi nelle condizioni ricotti in soluzione, ricotto ed invecchiato. La lavorazione a freddo non viene impartita prima dell'invecchiamento. Le proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio relative ai prodotti forgiati ed estrusi sono riportate nella specifica tabella sottostante.

Tabella 5.4: le proprietà meccaniche delle leghe Cu-Be in forma di fili nelle varie condizioni

C17200 e C17300 Condizione	Diametro	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allun- gamento relativo	Conduttivi- tà elettrica	Condizioni di in- vecchiamento
	mm	MPa	MPa	%	IACS	
Rafforzate tramite trattamento termico						
A TB00	1,3-12,7	410-540	130-210	30-60	15-19	.....
¼ H TD01	1,3-12,7	620-800	510-730	3-25	15-19	.....
½ H TD02	1,3-12,7	750-940	620-870	2-15	15-19	.....
¾ H TD03	1,3-2,0	890-1070	790-1040	2-8	15-19	.....
H TD04	1,3-2,0	960-1140	890-1110	1-6	15-19	.....
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo						
AT TF00	1,3-12,7	1030-1250	990-1250	> 3	22-28	3h a 315-330 °C
¼ HT TH01	1,3-12,7	1100-1320	1130-1380	>2	22-28	2h a 315-330 °C
½ HT TH02	1,3-12,7	1170-1380	1170-1450	> 2	22-28	1,5h a 315-330 °C
¾ HT TH03	1,3-2,0	1240-1380	1200-1520	> 2	22-28	1h a 315-330 °C
HT TH04	1,3-2,0	1240-1380	1240-1520	> 1	22-28	1h a 315-330 °C

C17510 e C17000 Condizione	Diametro	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allun- gamento relativo	Conduttivi- tà elettrica	Condizioni di in- vecchiamento
	mm	MPa	MPa	%	IACS	
Rafforzate tramite trattamento termico						
A TB00	1,3-12,7	410-540	130-210	20-60	20-30	.....
H TD04	1,3-2,0	960-1140	890-1110	2-20	20-30	.....
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo						
AT TF00	1,3-12,7	1030-1250	990-1250	> 10	45-60	3h a 480-495 °C
HT TH04	1,3-2,0	1240-1380	1240-1520	> 10	48-60	2h a 480-495 °C

Tabella.5.5: le proprietà meccaniche delle leghe Cu-Be nelle varie condizioni in forma di aste, barre, tubi e lamine

C17200 Condizione	Diametro	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allungamento relativo	Conduttività elettrica	Condizioni di invecchiamento	
	mm	MPa	MPa	%	IACS		
Rafforzate tramite trattamento termico							
A	TB00	Ogni valore	410-590	130-250	20-60	15-19	.....
H	TD04	≤9,5	620-900	510-730	8-30	15-19	.....
		9,5-25	620-870	510-730	8-30	15-19	.....
		25-50	580-830	510-730	8-20	15-19	.....
		50-75	580-830	510-730	8-20	15-19	.....
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo							
AT	TF00	Ogni valore	1130-1380	890-1210	3-10	22-28	3h a 315-330 °C
HT	TH04	≤9,5	1270-1560	1100-1380	2-9	22-28	2-3h a 315-330 °C
		9,5-25	1240-1520	1060-1350	2-9	22-28	
		25-50	1200-1490	1030-1320	4-9	22-28	
		50-75	1200-1490	990-1280	4-9	22-28	
C17000 Condizione	Diametro	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allungamento relativo	Conduttività elettrica	Condizioni di invecchiamento	
	mm	MPa	MPa	%	IACS		
Rafforzate tramite trattamento termico							
A	TB00	Ogni valore	410-590	130-250	20-60	15-19	.....
H	TD04	≤9,5	620-900	510-730	8-30	15-19	.....
		9,5-25	620-870	510-730	8-30	15-19	.....
		25-50	580-830	510-730	8-20	15-19	.....
		50-75	580-830	510-730	8-20	15-19	.....
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo							
AT	TF00	Ogni valore	1130-1320	860-1070	3-10	22-28	3h a 315-330 °C
HT	TH04	≤9,5	1170-1450	990-1280	2-5	22-28	2-3h a 315-330 °C
		9,5-25	1170-1450	990-1280	2-5	22-28	
		25-50	1130-1380	960-1250	2-5	22-28	
		50-75	1130-1380	930-1210	2-6	22-28	

C17500 e C17510 Condizione	Diametro	Resistenza a trazione	Resistenza allo snervamento	Allun- gamento relativo	Conduttivi- tà elettrica	Condizioni di in- vecchiamento	
	mm	MPa	MPa	%	IACS		
Rafforzate tramite trattamento termico							
A	TB00	Ogni valore	240-380	60-210	20-35	20-30	.....
H	TD04	≤ 5	440-560	340-520	10-15	20-30	.....
Rafforzate tramite trattamento termico ed invecchiamento conclusivo							
AT	TF00	Ogni valore	680-900	550-690	10-25	45-60	3h a 480 °C
HT	TH04	≤ 7,5	750-970	650-870	5-25	48-60	2h a 480 °C

I prodotti di fonderia (cast products): vengono così definiti quell'insieme di prodotti metallurgici per la cui realizzazione viene utilizzato un diverso processo industriale rispetto a quelli usati per i prodotti lavorati e che prevede il versamento di materiale allo stato fuso all'interno di appositi stampi caratterizzati dalla forma che si vuol fare acquisire dal componente. Anche questa tipologia di prodotti, al pari dei prodotti lavorati, possono subire diversi trattamenti a cui è necessario fare riferimento nella denominazione delle leghe stesse dal momento che i valori assunti dalle proprietà meccaniche e non solo ne sono direttamente influenzati. A tal ragione i prodotti colati si dividono in quattro tipologie:

As-cast: codificata con la sigla **C** oppure con le diverse sigle **M01→M07** (*)

As-cast + age hardened : con la sola denominazione **CT**

As-cast + solution annealed: codificate con la sigla **A**, oppure **TB00** (*)

As-cast + solution annealed + age hardened: con la sigla **AT** oppure **TF00**

(*)

L'asterisco tra parentesi sta ad indicare la classificazione ASTM, una tipologia di classificazione che tiene conto di tutta una serie di fattori che riguardano il processo di colata, a partire dalla tecnica usata, dalla sabbia, fino alla qualità della forma se permanente o meno oppure alla continuità o non continuità della colata stessa ed altre caratteristiche ancora.

Anche per questa categoria di prodotti è necessario distinguere tra le due diverse qualità di lega Rame-Berillio, ossia le leghe Rame-Berillio ad alta resistenza e le leghe Rame-Berillio ad alta conduttività, dal momento che presentano diverse temperature caratteristiche nei trattamenti di ricottura ed invecchiamento, nello specifico

Le leghe di fonderia ad alta resistenza

T ricottura in soluzione	760-790 °C
T invecchiamento	340 °C

Le leghe di fonderia ad alta conduttività

T ricottura in soluzione	870-900 °C
T invecchiamento	480 °C

Viene solitamente raccomandato un tempo di ricottura di 1h per ogni 2,5 cm di spessore della lega di fonderia, con un minimo di 3h di omogeneizzazione del bagno per le leghe colate ad alta resistenza per assicurare l'uniformità delle proprietà in tutto il pezzo. Per quanto concerne all'invecchiamento invece, viene consigliato un tempo di 3h alle temperature indicate. La massima durezza viene raggiunta dalle leghe di fonderia nelle condizioni di stato AT. Queste leghe raggiungono livelli di durezza leggermente più bassi delle corrispondenti leghe lavorate AT.

Le leghe colate di tipo CT raggiungono livelli di durezza leggermente più bassi rispetto alle leghe di fonderia AT; la minore durezza è però spesso accompagnata da costi di produzione più bassi. In più i componenti in lega con condizione CT sperimentano un minor ritiro ed una minore distorsione a seguito di invecchiamento delle leghe di fonderia AT. Le durezze delle tipologie di stato CT sono riportate nella tabella sottostante e si riferiscono a colate versate in stampi. Le leghe di fonderia nelle condizioni ricotta e invecchiata (AT) sono meno suscettibili agli effetti derivanti da una bassa velocità di raffreddamento o alla dimensione della sezione. Il raffreddamento ad acqua delle leghe di fonderia nella condizione ricotta caratterizzate da una grossa grana può provocare l'insorgenza e la propagazione di cricche e di conseguenza anche possibili rotture. Diminuendo la velocità di raffreddamento si eviteranno tali problematiche ma si ridurrà anche la risposta all'invecchiamento della condizione di stato AT di tali materiali.

Tabella 5.6: le proprietà meccaniche delle leghe Cu-Be in forma colata nelle varie condizioni

Designazione	Condizione	Resistenza allo snervamento (0,2 % di deformazione)	Resistenza a trazione	Allungamento percentuale	Durezza	
		MPa	MPa	%		
C82000	As-cast	105-170	310-380	15-25	50-60	HRB
	As-cast + invecchiato	170-310	380-480	10-15	65-75	HRB
	Solubilizzato + invecchiato	480-550	620-760	3-15	92-100	HRB
C82200	As-cast	170-240	380-410	15-25	55-65	HRB
	As-cast + invecchiato	280-380	410-520	10-20	75-90	HRB
	Solubilizzato + invecchiato	480-550	620-690	5-10	92-100	HRB
C82400	As-cast	240-280	450-520	20-15	74-82	HRB
	As-cast + invecchiato	450-520	655-720	10-20	20-24	HRC
	Solubilizzato + invecchiato	930-1000	1000-1070	2-4	34-39	HRC
C82500	As-cast	280-345	520-590	15-30	80-85	HRB
C82510	As-cast + invecchiato	480-520	690-720	10-20	20-24	HRC
	Solubilizzato + invecchiato	830-1030	1030-1210	1-3	38-43	HRC
C82600	As-cast	310-345	550-590	15-25	81-86	HRB
	As-cast + invecchiato	410-450	650-720	10-15	20-25	HRC
	Solubilizzato + invecchiato	1070-1170	1140-1240	1-2	40-45	HRC
C82800	As-cast	345-410	590-620	5-25	80-90	HRB
	As-cast + invecchiato	410-480	655-720	10-15	20-25	HRC
	Solubilizzato + invecchiato	1140-1240	1240-1340	0,5-3	43-47	HRC

Capitolo 6 Le caratteristiche di fabbricazione.

Prima di addentrarci nella descrizione delle principali lavorazioni a cui possono essere sottoposte le varie tipologie di leghe Rame-Berillio, è bene soffermarci su alcuni fenomeni ed accorgimenti ad esse inerenti ed a cui faremo riferimento nel prossimo capitolo, la cui conoscenza risulta indispensabile per il successo o meno delle lavorazioni stesse.

La formabilità: con il termine formabilità in metallurgia si identifica quella proprietà o attitudine specifica del materiale ad acquisire una determinata forma in risposta all'applicazione su di esso di forze esterne senza che il pezzo incorra in screpolature od esfoliazioni. Tale caratteristica è strettamente correlata ai trattamenti subiti dal metallo in esame e può essere facilmente misurata tramite test di piegatura a $90^\circ \div 180^\circ$ su nastri dello spessore di 1,2 mm.

Esistono diversi metodi con i quali le industrie metallurgiche modellano i nastri metallici in funzione del loro stato: i principali processi di formatura includono lo stampaggio, la coniatatura, l'imbutitura profonda e l'idroformatura.

Ognuna di queste lavorazioni è attuata ricorrendo ad elevate tensioni e ciò vale in modo particolare per le ultime due lavorazioni a freddo citate: in questi processi le forze in gioco sono in genere così elevate che la loro applicabilità viene limitata alle leghe Rame-Berillio di tipo solution annealed (solubilizzate) TB00 o a quelle incrudite $\frac{1}{4}$ TD01.

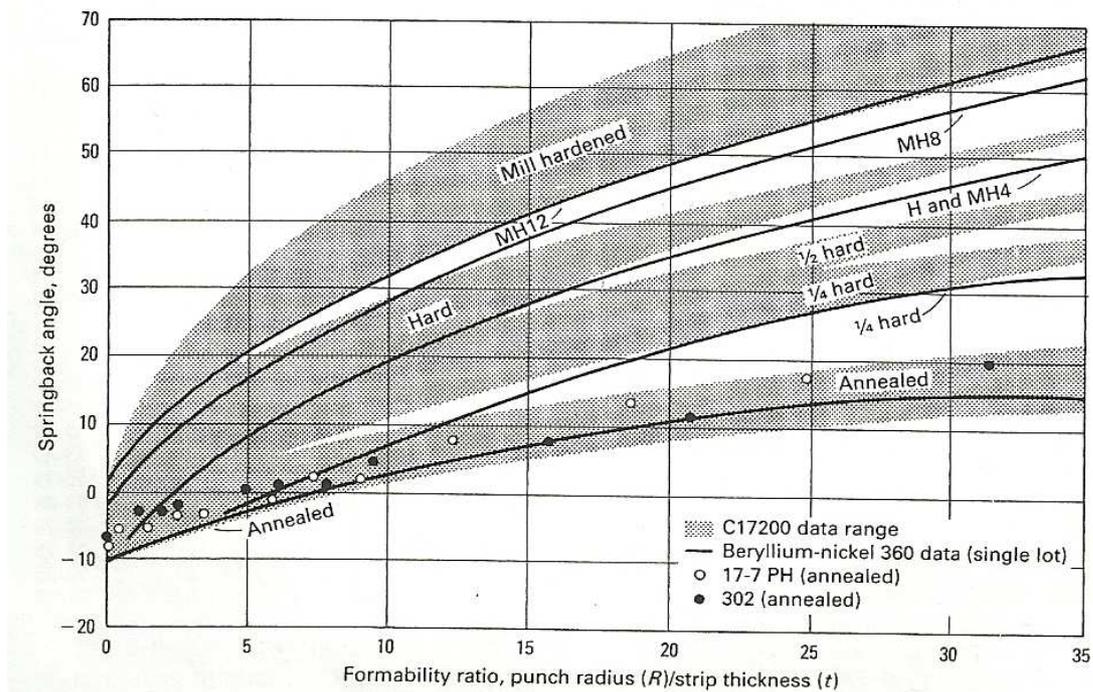
Ciò è di per sé intuibile se si considera che il pezzo è un sistema fisico a cui noi trasferiamo energia attraverso l'applicazione di forze così che possa, adottando una nuova conformazione, arrivare ad una nuova condizione di equilibrio. Le condizioni di tempra che sono quindi correlate ad una migliore formabilità risultano perciò essere quelle in cui il componente presenta in partenza minori tensioni interne ed una minore concentrazione di dislocazioni, condizione questa propria delle tempre a minore carico energetico come ad esempio la ricottura in soluzione ed incruditura $\frac{1}{4}$.

Via via che ci discostiamo da condizioni di tempra frutto di un basso dispendio energetico, la formabilità della lega Rame-Berillio tende a diminuire: le leghe TD04, che si caratterizzano per un maggior livello di rafforzamento proprio di una laminazione a freddo a completa incruditura, godono di ancora una buona formabilità, così come le tipologie TM01 \div TM04, mentre le leghe Rame-Berillio ad alta resistenza rafforzate meccanicamente presentano una limitata formabilità ed anche anisotropia conseguente al già notevole stress interno inglobato con tali processi di rafforzamento.

Il ritorno elastico: il ritorno elastico, al pari del cambiamento dimensionale che vedremo di seguito, è una delle modalità di risposta del “ sistema fisico ”, costituito dal pezzo in lavorazione, alle sollecitazioni esterne al fine di ricollocarsi in un nuovo stato di equilibrio energetico: fintanto che le forze esterne non sono di intensità notevole, il componente riesce a scaricare l’energia assorbita attraverso il ritorno elastico, mentre se l’apporto energetico è notevole, il materiale ingloberà tale energia sottoforma di dislocazioni interne manifestandolo esternamente tramite la deformazione permanente.

Anche in questo caso, la “ capacità di risposta ” della lega Rame-Berillio è legata alle condizioni complessive dovute ai trattamenti subiti dal pezzo: dall’analisi delle curve riportate nel diagramma sottostante, è possibile dedurre un insieme di utili considerazioni in relazione a tale fenomeno:

Fig. 6.1: Ritorno elastico angolare di una striscia di lega Rame-Berillio C17200 e di Berillio-Nickel N03360 nelle condizioni di tempra rafforzabili tramite trattamento termico e tramite trattamento meccanico.



- Il ritorno elastico cresce all’aumentare del valore del coefficiente di resistenza allo snervamento (σ_{sn}) ed in particolare si può osservare che
 - è il più basso nelle leghe Cu-Be di tipo TB00 ottenute con ricottura in soluzione
 - presenta il valore più alto con le leghe Cu-Be ad alta resistenza rafforzate meccanicamente.

- Aumenta proporzionalmente al crescere del rapporto di formatura (il rapporto di formatura è il rapporto tra il raggio del punzone e lo spessore del nastro) come la tensione elastica diviene una più larga parte della tensione totale di formatura.
- La consistenza di ritorno elastico in un componente formato attraverso l'ausilio di uno strumento con un determinato raggio del punzone dipende più dalla uniformità dello spessore che dal valore del coefficiente di resistenza allo snervamento (σ_{sn}) per una dato stato di trattamento.
- Il ritorno elastico dipende inoltre dalle tensioni impartite durante la formatura e varia in funzione del valore assunto da altri fattori quali lo spazio tra punzone e matrice ed il metodo di formatura adottato.

E' infine necessario ricordare che nei pezzi sottoposti a formatura è possibile riscontrare fenomeni di ritorno elastico positivo, ma anche a carattere negativo: in tal caso si verificherà il collassamento della parte, soggetta a formatura, contro il punzone. Tale fenomeno nelle leghe Rame-Berillio è frequente per valori di rapporto di formatura molto piccoli ed è associato ad un sostanziale spostamento dell'asse neutrale, asse centrale del componente dove le tensioni interne si annullano, verso l'interno del raggio di curva.

Il cambiamento dimensionale e l'invecchiamento: sostanzialmente tutte le tipologie di leghe Rame-Berillio sono soggette ad una variazione delle caratteristiche dimensionali come conseguenza del trattamento termico di invecchiamento: le sole tipologie di leghe Rame-Berillio che esulano da tale comportamento sono le leghe rafforzate meccanicamente dal momento che dopo la formatura o lo stampaggio non hanno bisogno di essere trattate termicamente. Per le altre tipologie con le quali si formano i componenti e che susseguentemente vengono sottoposti ad invecchiamento è necessario considerare un insieme di fattori che possono enfatizzare o meno il conseguentemente cambiamento dimensionale che si verifica durante il rafforzamento per precipitazione e conoscerne le modalità di controllo.

Le cause del cambiamento dimensionale: la principale causa alla base di tale fenomeno è da riferirsi alla maggiore densità che caratterizza i precipitati coerenti che hanno origine durante il trattamento di invecchiamento. Tale densità risulta maggiore rispetto alla matrice di Rame e di conseguenza ne

causa il ritiro la cui intensità dipende strettamente da fattori quali il contenuto di Berillio, dalla condizione di trattamento e dalla modalità con cui viene eseguito l'invecchiamento. Per quanto concerne la concentrazione di Berillio si evidenzia che al suo crescere cresce di conseguenza il livello di ritiro dimensionale accusato dal componente: nelle leghe ad alta resistenza come le C17000, C17200 e le C17300 si verifica un ritiro dello 0,6 % in volume e dello 0,2 % nelle dimensioni lineari, mentre nelle leghe ad alta conduttività, che sono caratterizzate da una minore concentrazione di Berillio, tale fenomeno risulta del tutto trascurabile.

Si è inoltre scoperto quale notevole influsso giochino le tensioni residuali interne sia sulla velocità di precipitazione, sia sul cambiamento dimensionale del prodotto: gli stress compressivi localmente intensificano il processo di invecchiamento, mentre gli sforzi locali di trazione lo rallentano. Quando la distribuzione degli stress residuali è disuniforme, come accade nella maggior parte dei componenti lavorati, si può verificare un ritiro disomogeneo lungo le varie dimensioni dell'oggetto, promuovendo di fatto una modifica della conformazione del pezzo rispetto a quanto pensato in sede di progettazione.

Se prendiamo ad esempio una piegatura con angolo di 90° , avremo che la superficie corrispondente al raggio di curvatura più interno sarà sottoposta a compressione e manifesterà una migliore risposta al trattamento di invecchiamento e quindi un maggior ritiro rispetto alla superficie corrispondente al raggio di curvatura più esterno, causando quindi una diminuzione dell'angolo di piegatura durante l'invecchiamento stesso.

Altri studi hanno dimostrato come la distorsione si presenti con maggiore intensità nei componenti più piani che rispetto ad altre forme e come essa tenda ad essere amplificata lungo le dimensioni più lunghe. Piegature, tensioni, ondulazioni e cambiamenti angolari possono manifestarsi nelle componenti non vincolate durante l'invecchiamento ma ciascuno di questi problemi può essere controllato e limitato adottando sistemi di irrigidimento in sede di progettazione o con uno o più degli approcci suggeriti di seguito.

Le tecniche di controllo del cambiamento dimensionale: esistono diverse modalità di controllo e limitazione delle distorsioni che possono essere applicate sia nella fase di progettazione del pezzo che nella fase stessa di formatura del componente. Tra queste le principali e più comunemente usate sono:

- 1) La suddivisione del processo di formatura in due o più fasi: l'adozione di una tale modalità di esecuzione della piegatura promuove una più uniforme distribuzione degli stress residuali nella

parte neo-formata. La parte può essere inizialmente piegata oltre l'angolo fissato e poi venire ripiegata in un secondo momento al fine di assumere la posizione desiderata. In tal modo il componente invece di accusare stress di compressione sulla superficie corrispondente al raggio di curvatura più interno e stress di trazione sulla superficie propria del raggio di piegatura più esterno, come accade in una piegatura attuata in una sola fase, esibirà stress di compressione sulle superfici di entrambi i raggi di curvatura promuovendo in tal modo un più uniforme ritiro attraverso lo spessore del componente.

Risulta inoltre che maggiore sarà il raggio di curvatura, maggiore saranno le tensioni residuali provocate dalla piegatura: se questa si caratterizza per un raggio di curvatura eccessivamente elevato, il ritorno elastico sarà talmente elevato da modificare i segni degli stress residuali sulle superfici di curva più interne e più esterne. In pratica una tensione residuale di compressione interna si trasformerà in una tensione di compressione esterna e viceversa. Quando ciò accade, la distorsione conseguente all'invecchiamento apparirà nella direzione opposta alla curva di raggio minore.

Una lavorazione condotta in maniera troppo lenta od un eccessivo spazio tra le parti dello stampo incrementano la distorsione del materiale allo spigolo neo-formato, innescando tensioni residuali che possono incrementare la distorsione che segue l'invecchiamento.

2) Selezionare opportunamente le condizioni di trattamento del materiale: dalla pratica industriale risulta che la condizione di trattamento che comporti la minore disuniformità nella distribuzione delle tensioni interne finali nel componente che deve essere sottoposto ad invecchiamento procurerà la minore distorsione. Questo non è altro che un principio dedotto dal buon senso: se vogliamo applicare una elevata piegatura ad una striscia di Rame-Berillio sarà meglio che tale pezzo non presenti già una eccessiva presenza di tensioni interne, di natura disuniforme, dovute a precedenti trattamenti, dato che queste sarebbero di ostacolo alla curvatura stessa. E' meglio dunque, a parità di raggio di curvatura di valore medio-alto, scegliere una trave di Rame-Berillio ricotta in soluzione piuttosto che una trave delle medesime dimensioni ma che abbia subito trattamenti di lavorazioni a freddo di notevole intensità: la prima risultando libera da stress residuali (la ricottura è un trattamento che libera il componente da tensioni residue interne) sarà caratterizzata da una minore distorsione dovuta all'invecchiamento.

3) Adottare sistemi di fissaggio e di supporto dei componenti: è forse la tecnica più frequentemente assunta al fine di limitare le distorsioni. Si tratta semplicemente di utilizzare dei sistemi di vincolo per costringere le componenti, durante il trattamento di invecchiamento, al mantenimento della conformazione appena assunta. Diverse sono le tipologie di tali modalità di fissaggio e la

selezione dell'una o dell'altra di esse è strettamente connessa alla forma di partenza del pezzo da lavorare e alla sua condizione di tempra: aste piatte, lunghe o anche componenti tubolari possono essere assicurate con travi rigide o tra piatti piani, mentre altri pezzi di forma diversa possono essere raggruppati strettamente in un mezzo di supporto e di trasmissione del calore come la sabbia.

4) Il ricorso a speciali condizioni nei trattamenti termici: questa tecnica è utilizzata soprattutto per minimizzare le distorsioni dovute all'invecchiamento nelle leghe Rame-Berillio ad alta resistenza. Varie sono le vie praticabili per raggiungere tale risultato ma la principale è quella che prevede di attuare l'invecchiamento ad una temperatura maggiore di quella consigliata per ottenere il valore di massimo relativo di rafforzamento nella curva di risposta all'invecchiamento stesso ma per un tempo inferiore (il picco di invecchiamento si consegue con un riscaldamento a 315 °C per un tempo che varia tra le 2 e le 3 ore). In tal modo si riuscirà a ridurre la distorsione tramite l'incremento dei precipitati incoerenti rispetto a quelli coerenti durante il processo di invecchiamento stesso, riducendo in tal modo anche la tendenza di restringimento del materiale a scapito comunque del picco di resistenza ottenibile. Ad esempio per la lega Rame-Berillio di tipo C17200 la diminuzione di resistenza è di circa 100 MPa.

Il livello di resistenza desiderata e le relative tecniche di controllo del processo che possono essere usate durante il trattamento di invecchiamento (tali tecniche sono influenzate dalle dimensioni del pezzo, dal tipo di forno e dalla forma della parte) determineranno la temperatura ottimale da utilizzare con tale approccio. I trattamenti utilizzati per alleviare gli stress termici a temperature inferiori a quelle proprie del range di invecchiamento possono concorrere a ridurre le tensioni residuali interne. Indicativamente un trattamento a 175 °C condotto per 3 ÷ 4 ore è un semplice ed efficace metodo di alleviamento delle tensioni.

La pulizia dei prodotti lavorati: i prodotti in lega Rame-Berillio, una volta che abbiano finito i cicli di lavorazione a cui devono essere sottoposti, prima di venire spediti agli acquirenti, vengono completamente puliti e trattati con inibitori dell'ossidazione. Il trattamento di pulizia non è però solamente relegato alle fasi terminali della produzione aziendale degli oggetti costituiti con la nostra lega, ma è bensì una procedura assai ricorrente da eseguire dopo ogni stampaggio o formatura ed anche al termine di ogni invecchiamento od altro tipo di trattamento termico ed è da considerarsi come una procedura obbligata ai processi di placcatura, di rivestimento e di unione di parti in lega Rame-Berillio.

Sostanzialmente tale procedura viene adottata per assolvere a due finalità principali:

- per rimuovere dalle superfici tracce di sporco, grasso ed olio che inevitabilmente sono presenti come residui dei lubrificanti usati nella formatura o per l'esposizione del materiale alle atmosfere di esercizio proprie dei vari trattamenti in cui viene ad essere ricoperto con un velo d'olio.

E' essenziale riuscire a rimuovere dalla superficie ogni elemento di sporcizia ed anche le impronte lasciate: a tal fine, per la rimozione di questi residui a carattere organico, i convenzionali detergenti, così come i solventi organici e le soluzioni alcaline sono considerati del tutto adeguati. Per incrementare l'efficacia del mezzo di pulitura è poi possibile ricorrere a tecniche di sgrossamento col vapore od anche ad agitazione tramite ultrasuoni dell'agente pulente;

- per rimuovere e prevenire la formazione del sottile strato di ossido che viene a formarsi sulle superfici in lega Rame-Berillio. L'umidità e le temperature elevate accelerano ed enfatizzano lo sviluppo di tale substrato che non viene se non in parte limitato dall'utilizzo di atmosfere protette .

Per tal motivo le superfici dei pezzi in lega Rame-Berillio che devono essere trattati termicamente vengono preparate al processo seguendo una precisa procedura

- Immersione delle parti in soluzione acquosa al 20 % ÷ 25 % di acido solforico con l'aggiunta di in 2 % ÷ 3 % di perossido di idrogeno tenuto a 45 ° ÷ 60 °. Immergere per un tempo sufficiente a rimuovere la colorazione nerastra causata dallo strato di ossido.
- Risciacquare completamente ed asciugare. Le eventuali operazioni di placatura e di saldatura dovrebbero essere effettuate immediatamente dopo aver terminato il processo di pulitura.

E' consigliabile ricorrere ad un pre-test per evitare di rimuovere quantità rilevanti di materiale a causa ad esempio di un'alta concentrazione di acido o di un eccessivo tempo di immersione.

Capitolo 7 La produzione metallurgica.

La fusione e la colata delle leghe Rame-Berillio: come per la maggior parte delle leghe, la lega Rame-Berillio è formata attraverso la fusione insieme dei metalli che la costituiscono e la colata all'interno di idonee forme e stampi atte alla produzione di prodotti intermedi che verranno sottoposti susseguentemente a processi quali la laminazione o l'imbutitura o alla realizzazione di getti usati come tali.

Anche se in prima istanza tali processi possono apparire molto semplici, essi richiedono una particolare attenzione sia per quanto riguarda l'esecuzione delle tappe fondamentali da attuare per la realizzazione di billette e lingotti, sia per quell'insieme di altri elementi che influenzano come vedremo in maniera determinante la qualità di tali processi: la tipologia degli stampi e dei fondenti utilizzati ed altro ancora.

La produzione metallurgica di una lega Rame-Berillio prevede per prima cosa la produzione di una lega madre di Rame caratterizzata dalla presenza di un 4 % in peso di Berillio attraverso la riduzione carbotermica dell'ossido di Berillio in un bagno di Rame fuso in un forno ad arco. In un secondo momento la lega madre viene poi rifusa in un forno ad induzione senza nucleo e diluita con altro rame, Cobalto (o Nichel) e rottami di fabbrica riciclati al fine di aggiustare la composizione finale. Risulta essenziale in queste prime fasi il rispetto di alcune precauzioni per minimizzare la perdita di Berillio: è preferibile fondere prima il Rame ed aggiungere solo dopo la lega madre; ciò consentirà una perdita marginale dell'alligante, circa dello 0,1 %. Anche l'adozione del surriscaldamento durante la fusione con una temperatura di colata non superiore comunque ai 1100 °C risulta essere utile al medesimo scopo.

Come con le altre leghe di Rame bisogna fare attenzione durante questi passaggi per evitare l'introduzione di Idrogeno, limitando il più possibile l'esposizione all'aria del fuso che andrebbe altrimenti incontro facilmente ad ossidazione del Berillio ed alla possibilità di inglobamento di scorie durante la colata.

Raggiunta la giusta composizione, i fusi vengono colati in maniera semicontinua all'interno di billette di natura rettangolare o circolare, destinate ad essere laminate a caldo per essere poi lavorate plasticamente, od in alternativa, vengono versati in forme per ottenere piccoli lingotti per usi di fonderia. Le billette di natura sia rettangolare che circolare vengono sottoposte entrambe a lavorazione a caldo: le billette rettangolari colate in maniera semicontinua vengono laminate a caldo per dar vita a lamine o bobine da cui poi si otterranno le striscie, mentre le billette circolari vengono estruse a caldo al fine di ottenere barre, fili e tubi privi di saldature.

Particolarmente interessante è notare come le billette in condizione as-cast presentino uno strato a segregazione inversa, ricco di Berillio, che non può essere eliminato attraverso l'utilizzo dei normali trattamenti termici di omogeneizzazione ma solamente attraverso rimozione meccanica.

Le temperature caratteristiche delle **lavorazioni a caldo** solitamente coincidono con le temperature di ricottura delle rispettive tipologie di leghe Rame-Berillio: circa tra i 705 e gli 815 °C per le leghe ad alta resistenza e tra gli 815 ed i 925 °C per le leghe ad alta conduttività. Per ottenere una risposta elevata al susseguente trattamento di invecchiamento sarebbe inoltre opportuno alla fine della lavorazione a caldo procedere ad un raffreddamento rapido del materiale, meglio se con una tempra. E' consigliabile, qualora le condizioni indicate non vengano rispettate rigorosamente nella prassi produttiva, procedere alla applicazione di un trattamento termico di solubilizzazione (trattamento di ricottura) alla fine di ogni programma di lavorazione a caldo. Ulteriori dettagli relativamente alle lavorazioni a caldo verranno comunque riportati con maggior dettaglio nel prossimo capitolo dedicato a tale argomento.

Come accennato precedentemente, sia nella fase di fusione che durante quella di colata, è necessario adottare tutta una serie di particolari accorgimenti relativi sia alla modalità di esecuzione di tali processi, sia agli strumenti in essi utilizzati. Sia i lingotti che le billette pur soggette a successive lavorazioni sono colati all'interno di stampi in ghisa e preparazioni oleose degli stampi, del tipo di quelle usate per l'ottone e leghe simili, danno buoni risultati. Il metallo fuso è molto fluido e, purchè la colata non abbia inglobato una eccessiva quantità di gas, essa in genere penetra bene nella forma durante la solidificazione, necessitando comunque di un adeguato caricamento. Ci si dovrebbe assicurare che la lega Rame-Berillio entri negli stampi molto lentamente: a tal fine viene usato un serbatoio (gate) che riesce a rallentare il flusso. E' inoltre necessario un condotto posizionato dietro il serbatoio e che colleghi lo stampo alla materozza in modo tale che sia in grado di raccogliere tutte le eventuali scorie presenti nel fuso.

La procedura di fusione per la produzione di colata in terra è essenzialmente simile a quella delle altre leghe a base di Rame ed è perciò possibile utilizzare le stesse tipologie di terre e le medesime anime. Una buona permeabilità è vantaggiosa e per evitare criccate durante la solidificazione è necessario che le anime non siano troppo dure.

In aggiunta alla normale tecnica di colata in sabbia, le colate delle leghe Rame-Berillio possono essere effettuate senza alcuna difficoltà attraverso altre specifiche tecniche quali la fusione a cera persa (microfusione) e tramite shell moulding: la fusione a cera persa risulta particolarmente adatta nella realizzazione di piccoli oggetti di forma complessa dove siano richieste una buona finitura superficiale e strette tolleranze dimensionali.

Per quanto concerne invece i materiali fondenti utilizzati, il Cloruro di Bario risulta assai utile nei processi di fusione in cui vi siano piccoli rottami o trucioli in lega Rame-Berillio. Altri composti come ad esempio la Criolite, che possono reagire con il Berillio dovrebbero essere evitati: non solo comportano la perdita di Berillio ma possono produrre fumi che reagendo con esso possono risultare dannosi per la salute degli operatori.

Cast products (i prodotti di fonderia): in aggiunta al rafforzamento prodotto per invecchiamento, le leghe Rame-Berillio di tipo cast manifestano una apprezzabile fluidità e capacità di replicare nel dettaglio le caratteristiche dello stampo. Le procedure relative alla fusione ed alla colata di tali leghe sono progettate in modo tale da minimizzare la perdita di Berillio conseguentemente alla ossidazione e mantenere una eccellente colabilità. A tal fine particolare attenzione viene riservata all'insieme dei fattori che concorrono alla qualità o meno della produzione dei prodotti di fonderia:

- la tipologia di forni: le leghe Rame-Berillio di tipo casting possono essere fuse all'interno di forni a resistenza, forni a gas, ad arco ed anche ad induzione senza nucleo. Particolarmente efficace per il controllo del processo è l'utilizzo di forni ad induzione senza nucleo: questa tipologia di forni consente una riduzione dell'incremento di Idrogeno, una minore perdita di Berillio ed una minore contaminazione da scorie. Le leghe possono venire fuse in aria o sottovuoto, condizione quest'ultima che assicura una minore contaminazione iniziale;

- le impurità: i materiali della carica da introdurre nel forno dovrebbero essere precedentemente puliti, seccati e liberati da ogni possibile elemento contaminante, condizione questa di difficile raggiungimento. Molte infatti delle impurità vengono introdotte nei forni attraverso i rottami, il materiale di scarto e di recupero che concorre ad un abbassamento dei costi di produzione, ma che può influenzare per la presenza di questi elementi contaminanti la qualità del risultato di colata. Ad esempio si ha che

- Zinco, Stagno e Fosforo possono indurre fragilità e perdita di resistenza
- Alluminio e Ferro possono ridurre la risposta all'invecchiamento, la conduttività sia elettrica che termica e la resistenza alla corrosione
- il Ferro può provocare una diminuzione della permeabilità magnetica per cui dovrebbe essere mantenuto ad un livello il più basso possibile

- il Silicio è aggiunto in lega per promuoverne la fluidità ed il controllo nella riduzione degli ossidi:

nelle leghe ad alta resistenza viene introdotto

tra lo 0,20 % pond. ÷ 0,35 % pond. di Silicio

nelle leghe ad alta conduttività si aggiunge

tra lo 0,15 % pond. o meno di Silicio

E' comunque da evitare l'introduzione di una quantità eccessiva di tale elemento dal momento che ciò produrrebbe un incremento della fragilità della lega.

- l'affinamento della grana: la procedura di affinamento del grano è attuata tramite diverse soluzioni. Per i lingotti di colata dal C82400 fino al C82800 il risultato viene raggiunto grazie alla introduzione di una piccola quantità di Titanio, mentre per le leghe C82510 grazie all'aggiunta di Cobalto.
- la temperatura: l'intervallo di temperatura di colata raccomandata decresce al crescere del contenuto di Berillio nella lega:

C82000 e C82200	1090 °C ÷ 1180 °C
C82400 ÷ C82510	1010 °C ÷ 1120 °C
C82600	970 °C ÷ 1070 °C
C82800	900 °C ÷ 1040 °C

Estrema attenzione deve essere usata in alcuni sistemi di fusione per evitare eccessivi surriscaldamenti che possono provocare perdita di Berillio, la formazione di ossidi e l'assorbimento di gas da parte della lega Rame-Berillio. L'elevata affinità della lega per l'ossigeno induce a ridurre al minimo l'agitazione ed il tempo di permanenza allo stato fuso del materiale.

- la formazione di scaglie: la formazione di scaglie può essere minimizzata attraverso il ricorso alla fusione sotto gas inerte o attraverso la copertura con Grafite od ancora attuando la colata nel momento stesso in cui si raggiunge la temperatura di colata. Le scaglie possono essere facilmente rimosse, ma l'utilizzo di un fluido contenente Fluoro può facilitare la separazione delle scaglie con annesso del materiale. Le leghe fuse possono essere ripulite dai gas grazie all'uso di Azoto secco ed Argon oppure usando come degasatori dei sali commerciali come il PTFE di natura plastica.

- l'utilizzo di filtri: per controllare e allo stesso tempo limitare l'immissione di inclusioni non metalliche si è soliti ricorrere all'uso di filtri ceramici. E' necessario comunque ricordare che l'utilizzo di filtri può comportare turbolenza del flusso di colata a causa delle scaglie in esso presenti e perciò ne viene sconsigliato l'impiego.

- le metodologie di colata: i più comuni metodi di colata usati per le leghe a base di Rame, sono applicabili alle leghe Rame-Berillio. Questi includono la colata in pressione, la microfusione, la colata centrifuga, la colata in pressofusione, la colata continua, in stampi ceramici od in sabbia da fonderia.

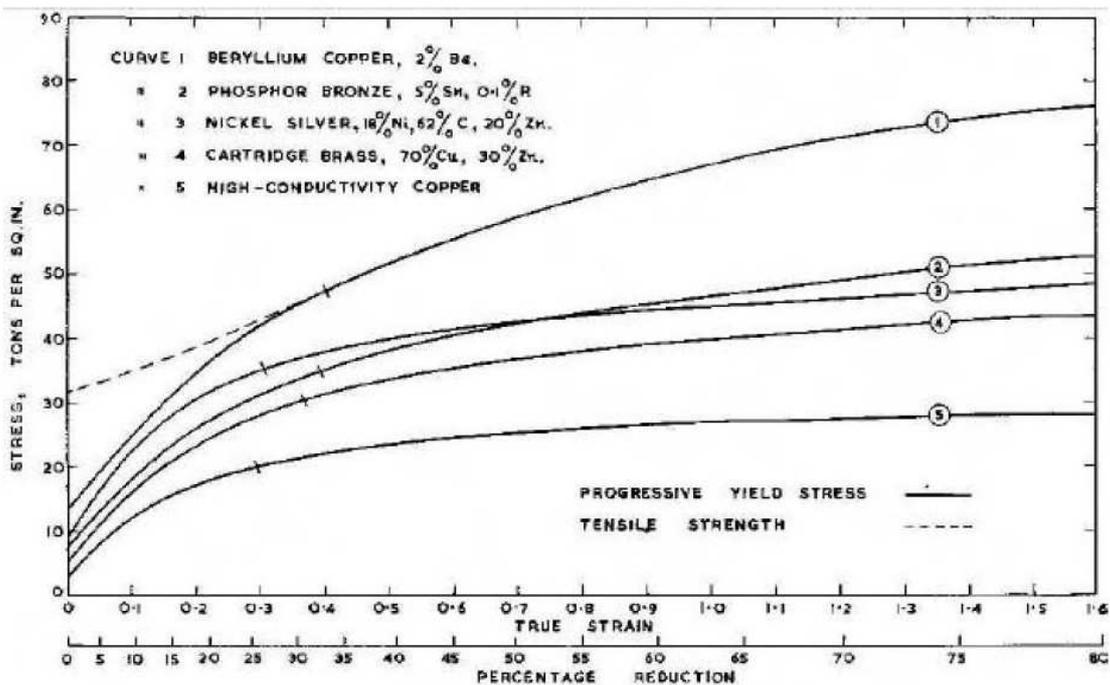
Il ritiro per solidificazione del Rame-Berillio è simile a quello del Bronzo-Stagno e minore di quello del Bronzo di Alluminio, del Bronzo di Silicio, del Bronzo di Manganese. Per favorire la solidificazione direzionale e ridurre le porosità da ritiro si può ricorrere all'uso di conchiglie ed ad altri organi di raffreddamento in metallo.

Le lavorazioni a freddo (laminazione, imbutitura e pressatura ...): convenzionalmente quando in metallurgia si parla di lavorazioni a freddo si fa riferimento ad un insieme di lavorazioni condotte sul materiale ad una temperatura il cui valore risulti inferiore al 30 % della temperatura assoluta di fusione del materiale stesso (nel nostro caso circa 370 °C). Come si può facilmente intuire, attuare delle lavorazioni in tali condizioni risulterà assai dispendioso data la natura delle forze in gioco che sarà necessario erogare per vincere la resistenza alla deformazione adottata dalla lega e che, come abbiamo già visto, può venire incrementata sottoponendo la lega Rame-Berillio ad opportuni trattamenti termici e meccanici di rafforzamento. Le stesse lavorazioni a freddo, come ad esempio la laminazione e la pressatura, risultano inoltre essere utili ad amplificare la risposta al trattamento di rafforzamento per precipitazione della lega Rame-Berillio ed è per questo che solitamente i prodotti lavorati devono essere sottoposti a più cicli di lavorazioni a freddo e di ricottura intermedia prima che si ottenga il prodotto finito con le volute dimensioni della grana finale e di risposta all'invecchiamento: data l'alta resistenza del materiale è infatti improbabile che un unico ciclo sia sufficiente.

Questo fatto risulta ancora più evidente se si osservano le curve di rafforzamento di alcune tipologie di leghe comparate alla lega Rame-Berillio: come appare dal diagramma sottostante la curva di rafforzamento della lega Rame-Berillio risulta essere nettamente al disopra delle altre curve e ciò sta ad indicare che tale materiale risulterà più difficile da deformare rispetto agli altri a parità di trattamento

di rafforzamento subito, richiedendo più processi di lavorazione a freddo alternati a trattamenti termici di ricottura.

Fig. 7.1: curve caratteristiche di rafforzamento del Rame, della lega Rame-Berillio e di altre leghe di Rame



Come già accennato trattando delle tecniche di rafforzamento meccanico, esiste una vera e propria classificazione relativa alle diverse entità di deformazione a cui può essere sottoposta la lega Rame-Berillio ed in funzione della quale è stata definita una specifica denominazione per descrivere il livello di rafforzamento subito dal materiale. Avremo dunque tali diversi stati di trattamento:

COMPLETAMENTE INCRUDITO: cui corrisponde uno sforzo di deformazione che provochi una riduzione di spessore pari al 33 % (posto come limite di deformazione consentito);

INCRUDITO 1/2: cui è associato uno sforzo di deformazione che causa una riduzione dello spessore del 18 %;

INCRUDITO 1/4: corrispondente ad uno sforzo di deformazione che determini una riduzione dello spessore pari al 10 %;

SOLUBILIZZATO: trattamento termico a cui non viene associata alcuna riduzione dello spessore.

Per completezza va ricordato la deformazione vera in un particolare istante durante la riduzione di sezione di un pezzo con sezione trasversale di partenza A_0 , è definita come la riduzione puntuale di area, $-dA$, all'istante in questione, diviso per l'area di sezione A da cui il cambiamento di spessore prende luogo. La istantanea vera deformazione, ottenuta attraverso l'integrazione è allora data da $\log_e (A_0/A)$.

Inoltre elemento di maggior importanza nella definizione, le deformazioni vere, ossia quelle definite in tal modo, hanno il grosso vantaggio, rispetto alle riduzioni espresse in termini percentuali, di essere direttamente sommabili. Perciò se A_1 rappresenta un riduzione intermedia nella riduzione complessiva tra A_0 ed A si avrà per definizione che

$$\log_e (A_0 / A_1) + \log_e (A_1 / A) = \log_e (A_0 / A)$$

che differisce sostanzialmente dal risultato errato che si ottiene addizionando le corrispondenti riduzioni espresse in percentuale e che è dato da

$$100 \left((A_1 - A_0) / A + (A_1 - A) / A_1 \right)$$

e non all'attesa riduzione data da

$$100 \left((A_0 - A) / A_0 \right).$$

Le diverse tipologie delle leghe Rame-Berillio si comportano più o meno allo stesso modo relativamente alla loro lavorabilità a freddo: possiamo definire solo marginali differenze in questo senso tra le leghe normal e leghe a basso contenuto di Berillio, ossia tra le leghe che oggi definiamo leghe ad alta resistenza ed ad alta conduttività. Per entrambe le tipologie la qualità di fabbricazione in relazione alle varie condizioni di rafforzamento può inoltre essere descritta dettagliatamente in funzione della diversa condizione di trattamento subita :

SOLUBILIZZATO: idonea per tutte le applicazioni che includono una severa imbutitura profonda o similari processi di formatura. Può dare luogo a leggera bavatura alla troncatura.

INCRUDITO ¼: attribuisce alla lega una migliore formabilità, risultando la condizione più utile cui preparare il materiale destinato alla produzione di molle (vedi applicazioni).

INCRUDITO ½ : riesce ad attribuire buone proprietà alle molle che saranno caratterizzate da una formabilità che è all'incirca la metà di quelle costruite con materiale ricotto in soluzione. La lega Rame-Berillio in tali condizioni può essere piegata a raggi moderati di curvatura e vede inoltre migliorate le caratteristiche di tranciabilità.

COMPLETAMENTE INCRUDITO: condizione che dà la massima resistenza e durezza a quelle componenti che richiedono poco o per nulla formatura. Permette al materiale di acquisire buone caratteristiche di tranciabilità.

Tra le diverse tipologie di leghe Rame-Berillio, le leghe ad alta conduttività, caratterizzate da un basso contenuto di soluto, pur invecchiate, mantengono una buona duttilità e lavorabilità a freddo che permette loro di subire operazioni di leggera formatura. A tali materiali, dato il rafforzamento subito a seguito dell'invecchiamento, non è comunque possibile applicare deformazioni di grande rilevanza, anche se ciò non ne preclude un ruolo di rilievo nella produzione di lamine o molle leggermente piegate e di articoli simili. Raramente invece, se non nella condizione di prodotti finiti, la lega Rame-Berillio ad alta resistenza viene sottoposta nella condizione invecchiata a lavorazioni a freddo

dal momento che ciò comporterebbe un estremo dispendio energetico e l'applicazione di forze di notevole intensità anche per minime piegature.

Proprio in ragione dell'elevato valore delle forze necessarie per deformare le leghe Rame-Berillio, particolare attenzione viene riposta nella **lubrificazione** così da diminuire l'effetto degli attriti tra il materiale ed i macchinari utilizzati e di conseguenza l'energia necessaria di tali processi. Tale preparazione è così importante che già dal finire degli anni '50 in funzione della gravità delle lavorazioni a freddo effettuate venivano usate differenti e specifiche tipologie di lubrificanti, quali ad esempio:

- per operazioni leggere poteva risultare sufficiente l'utilizzo di sapone ed acqua data anche la facilità di rimozione con un semplice risciacquo di tale composto;
- per severe imbutiture si riteneva invece auspicabile fare uso di lubrificanti idonei alle alte pressioni, anche se il ricorso a paste di sapone in grado di formare dei film antifrizione tra le parti che entrano in contatto era una soluzione alquanto soddisfacente e ricorrente. Even-

tuali paste solide contenenti zolfo sono state col tempo sempre meno impiegate per tali finalità, dal momento che, come è stato già accennato, tale elemento chimico tende a reagire colla lega Rame-Berillio causandone scolorimento e la comparsa di alcune macchie sulla superficie del pezzo qualora non venisse completamente rimosso prima del trattamento termico di ricottura attraverso opportune tecniche di pulizia;

- per lavorazioni che implicano l'esercizio di forze particolarmente intense una delle soluzioni adottate era quella di rivestire il materiale con del Cadmio che non ha solo la capacità di proteggere la superficie dalla reazione di ossidazione, ma anche quella di fungere da lubrificante in modo da ridurre l'usura attraverso l'ammortizzazione del contatto tra lo strumento e la zona di lavoro. Anche tale elemento chimico deve essere completamente rimosso prima di sottoporre la lega al trattamento termico.

Altra tappa di primaria importanza è la **pulizia chimica** che è necessario eseguire dopo ogni ricottura, tanto di quella finale che di quelle che vengono attuate in alternanza alla applicazione di una serie di lavorazioni a freddo, in modo tale da eliminare quel tenace film ossido che, anche nelle migliori condizioni di vuoto o di atmosfere protette, si formerà sulla superficie del pezzo. Se non rimosso infatti questo strato di ossido può provocare danni alle parti che vengono a contatto con la lega Rame-Berillio: si possono verificare condizioni di usura dei rulli dei sistemi di laminazione, alterazioni degli stampi ed anche scarsa adesione delle parti nei processi di saldatura o degli strati di placcatura che fungono da rivestimento in alcuni componenti finiti.

In relazione a ciò, le leghe Rame-Berillio ad alta conduttività risultano essere particolarmente inclini a subire ossidazione sottosuperficiale ed è per questo che se ne consiglia la lavorazione in atmosfera protetta. Questo strato di ossidazione superficiale interna funge da barriera alla risposta all'invecchiamento e per questa ragione, qualora non sia stato possibile operare in atmosfera protetta, sarà indispensabile eliminarlo attraverso l'ausilio di tecniche di pulizia di natura chimica o meccanica.

Anche la scelta dei materiali con cui costruire gli strumenti necessari per l'esecuzione delle lavorazioni a freddo è strettamente correlato alla intensità delle forze in gioco e non solo: la scelta del materiale per i punzoni e gli stampi nella formatura o nei processi di taglio dipende in maniera significativa dalla lunghezza della corsa richiesta. Nel corso degli anni si sono susseguite diverse soluzioni, passando dall'utilizzo di strumenti in carburo a quelli in acciai autotempranti per cicli produttivi moderatamente lunghi.

Un'ulteriore tecnica prevede il ricorso a strumenti placcati al Cromo che tendono a ridurre gli attriti: tale rivestimento può ancora venire usato per ridefinire la forma originaria di utensili usurati od anche per rinforzarli in quei punti in cui l'usura sia stata particolarmente severa.

La tipologia di lavorazione a freddo e l'intensità delle forze in esse sfruttate hanno influenza anche su alcune caratteristiche che devono essere rispettate dagli strumenti che vengono adoperati per attuarle. Per la tranciatura e la perforazione, le lavorazioni a freddo delle leghe Rame-Berillio procurano bordi più netti con una minore bavatura di quelli ottenibili dai prodotti del medesimo materiale ma in condizione ricotto in soluzione (leghe Rame-Berillio solubilizzate). Per le diverse classi di lavorati a freddo è di norma necessario adottare uno spazio libero tra punzone e stampo che corrisponda al 5 % fino al 10 % dello spessore del metallo, ma per materiali solubilizzati lo spazio tra punzone e matrice deve essere portato ad un massimo di circa il 6 % dello spessore del materiale al fine di minimizzare la bavatura.

Per quanto riguarda la tranciatura, la faccia del punzone solitamente dovrebbe essere piatta, mentre la matrice potrebbe essere formata con una leggera angolazione per ridurre la pressione richiesta per la lavorazione.

A livello indicativo si possono definire anche dei limiti pratici relativi alla imbutitura profonda per i pezzi in Rame-Berillio per farne acquisire forma a coppa in riferimento alle quattro diverse qualità di trattamento cui possono essere poi sottoposti. Queste cifre, riportate nella tabella sottostante, devono essere considerate come valori di massima e con tale riserva essere applicati alle diverse tipologie di leghe del nostro studio.

Tabella 7.1: valori limite rispetto alla imbutitura profonda delle diverse tipologie di trattamento applicate alle leghe CuBe.

Tipologia di trattamento	Rapporto tra il diametro del disco grezzo e il diametro dello coppa (cup)	Rapporto tra lo spessore della coppa ed il diametro della coppa
Solubilizzato	1,5	0,3
Incrudito ¼	1,3	0,2
Incrudito ½	1,2	0,1
Completamente incrudito	1	.....

Il rispetto di tali valori consente di evitare il verificarsi del fenomeno di stiratura, consente cioè di mantenere lo spessore della coppa identico a quello del pezzo grezzo da lavorare. Anche in questo caso comunque per la buona riuscita delle operazioni è necessario assicurare il minimo attrito tra le parti, grazie all'uso di strumenti lisci e ben lubrificati e senza il ricorso a pressioni di fermo del pezzo troppo elevate in modo da evitare il corrugamento. Va inoltre ricordato che alcuni fattori come lo spessore del materiale, il raggio del punzone e le dimensioni della matrice possono modificare in maniera considerevole i rapporti riportati.

Se è richiesta una imbutitura più profonda, il consiglio resta quello di suddividere la lavorazione in una serie di lavorazioni di minore gravità intercalate le une dalle altre da ricotture in soluzione in modo però che il totale delle riduzioni tra le ricotture non superi i valori riportati sopra. Anche in questo caso il metallo deve essere pulito sia prima che dopo ciascuna ricottura in soluzione così da evitare alterazioni indotte dal lubrificante e per rimuovere le scorie e lo strato di ossido.

Per alcune tipologie di lavorazioni a freddo come ad esempio la piegatura, un fenomeno di particolare importanza di cui è necessario tener conto sia in fase di progettazione che nella realizzazione del pezzo è quello del ritorno elastico a cui abbiamo già accennato in precedenza. Il livello di ritorno elastico dipende in modo assai stretto da una serie di fattori inclusa anche la gravità della piegatura e la sua direzione in relazione a quella della laminazione, tanto quanto la resistenza, la durezza e lo spessore della striscia stessa: nelle normali condizioni può variare dai 5 ° ai 10 °. La tecnica di suddividere il processo in tappe in cui le forze in gioco siano di minore intensità ed a cui corrispondano quindi piegature di minore rilevanza rispetto a quella che si desidera ottenere è un'utile modalità per poter raggiungere i risultati auspicati nel rispetto delle tolleranze imposte. A questo modo di operare si affianca poi quello della compensazione che, come abbiamo già visto, viene impiegato già in fase di progettazione sia del pezzo che della strumentazione utilizzata per realizzarlo: si progetta il componente tenendo in considerazione l'effetto di ritorno elastico che esso subirà in relazione alla gravità della piegatura che si intende fargli acquisire ed in base a tali ipotesi si sottopone l'oggetto ad una curvatura leggermente superiore in modo tale che, una volta sfogate le forze di ritorno elastico, il pezzo rispetti le predefinite tolleranze di lavorazione.

L'improntatura a freddo delle leghe Rame-Berillio è un'altra lavorazione abbastanza praticabile almeno quando il materiale è stato precedentemente ricotto in soluzione. Gli strumenti adottati per tale processo devono comunque essere alquanto robusti e resistenti data la notevole energia richiesta per tale operazione. La coniatatura, che possiamo considerare come una leggera forma di improntatura, è anch'essa eseguibile adottando i medesimi accorgimenti. Può essere eseguita in unione con altri processi di formatura a freddo ed è, fatte alcune riserve, applicabile alla lega Rame-Berillio sia rafforzata tramite laminazione così come nella condizione di ricotta in soluzione.

In conclusione è bene ricordare che i prodotti lavorati sono solitamente trattati con film aventi la funzione di inibire la corrosione e di estendere in tal modo la durata di inutilizzo di tali componenti. Durante la fase di fabbricazione i prodotti laminati vengono sottoposti a stringenti controlli relativi al contenuto di inclusioni non metalliche, rispetto alla dimensione della grana nella fase di ricottura intermedia ed a fine ricottura, così come viene verificata la consistenza dimensionale, le proprietà meccaniche di pre-invecchiamento e i relativi cambiamenti in risposta all'invecchiamento stesso.

Lavorazioni a caldo (hot working processes): le leghe Rame-Berillio vengono lavorate a caldo al fine di produrre parti accuratamente dimensionate e che siano in grado di rispondere bene al susseguente invecchiamento. La forgiabilità di tali leghe può considerarsi buona. Le variabili ed i fattori che vanno ad influenzare la qualità del prodotto sono:

- il tempo di preriscaldamento
- la temperatura
- la capacità di controllo della temperatura durante il processo
- il rapporto di deformazione

Tra le diverse lavorazioni a caldo a cui è possibile sottoporre le leghe Rame-Berillio, particolare interesse rivestono la forgiatura, l'estrusione e la formatura di cui ora cercheremo di definire le principali caratteristiche relativamente al materiale protagonista di questo nostro studio.

1) **la forgiatura:** con questo termine si identifica un processo di produzione industriale metallurgica in cui pezzi metallici di varia sezione vengono trasformati plasticamente attraverso ripetuti stadi di deformazione portati sul componente allo stato rovente da parte di strumenti quali il maglio, la pressa per forgiatura ed altri ancora. Esistono inoltre diverse tipologie di forgiatura che vengono preferite le une alle altre in funzione delle caratteristiche del pezzo che si deve lavorare:

- **la forgiatura a stampo aperto**, che include anche la rullatura ad anelli e la laminazione dei profilati e che viene solitamente applicata a pezzi caratterizzati da asse corto o parti relativamente larghe a geometria alquanto semplice.
- **la forgiatura a stampo chiuso**, che risulta migliore per pezzi che presentino corse piuttosto lunghe o con forme piuttosto complesse e che richiedono una maggiore precisione

A prescindere comunque dalla tipologia di forgiatura eseguita, durante tale processo il componente deve essere mantenuto all'interno di un determinato e ben specifico range di temperature:

- per le leghe ad alta conduttività	C17500, C17510	760 °C ÷ 925 °C
- per le le leghe ad alta resistenza	C17200	705 °C ÷ 775 °C

nb: la lega C17300, essendo la versione non lavorata (free machining) della C17200, non è forgiabile a caldo ma può essere estrusa a caldo.

Il mantenimento, all'interno degli indicati specifici range, della temperatura del componente durante l'esecuzione di tale lavorazione, permette di evitare il verificarsi di difetti di forgiatura dovuti ad una incipiente fusione in corrispondenza al limite superiore degli intervalli di valori riportati e l'originarsi di cricche superficiali quando la temperatura è prossima al limite di tali range.

Già da questi primi elementi si può dunque capire come la temperatura ed il suo controllo siano gli elementi cruciali che determinano la qualità o meno di tale lavorazione con conseguenze dirette come vedremo sulle proprietà meccaniche del materiale che possono venire notevolmente alterate. Molti studi e la pratica industriale in tale settore evidenziano che:

-La selezione del valore della temperatura di forgiatura è funzione sia della velocità che della gravità di deformazione che si intende applicare al materiale. Ne consegue che più alte velocità di deformazione e maggiori riduzioni (che sono inoltre anche causa di un notevole riscaldamento adiabatico) richiedono una temperatura di partenza prossima ai limiti inferiori dei range indicati, altrimenti si potrebbe provocare un accrescimento eccessivo della grana metallica;

-la forgiatura deve comunque essere condotta ad una temperatura sufficientemente alta al fine di promuovere la ricristallizzazione metallica senza però incorrere in una eccessiva crescita del grano che comprometterebbe alcune qualità meccaniche come ad esempio la resistenza.

Solitamente durante la forgiatura si presenta la necessità di un riscaldamento successivo a quello di partenza dal momento che il pezzo tende a raffreddarsi a causa delle perdite di calore che si verificano per fenomeni di radiazione o di conduzione-convezione per il contat-

to con lo stampo. Inoltre il riscaldamento adiabatico non è sempre sufficiente a mantenere il valore della temperatura superiore al minimo del range di lavorazione;

- la velocità di riscaldamento è un altro fattore di cruciale importanza: le billette dovrebbero essere portate dalla temperatura ambiente alla temperatura di forgiatura con una velocità di riscaldamento ben definita calcolabile con la seguente equazione $v_{risc} = 1h * inch_{sezione}$ e poi messe a bagno alla temperatura di forgiatura per un breve tempo per assicurare l'uniformità di temperatura del componente. Per il successivo riscaldamento, necessario al mantenimento della idonea condizione termica, la velocità di riscaldamento è desumibile con quest'altra formula $v_{risc} = 0,5 * inch_{sezione}$ senza necessità di attese perché il pezzo acquisisca una uniforme valore di temperatura.

Come già accennato descrivendo altre lavorazioni, viene sconsigliato l'utilizzo di un combustibile ad alto contenuto di Zolfo nei forni alimentate a gas: questa tipologia di combustibili reagisce con la lega Rame-Berillio causandone scolorazione e formazione di un notevole film ossido.

Con la forgiatura si possono ottenere rapporti di estrusione che vanno da $3 \div 1$ fino a $5 \div 1$, ma non di rado si possono raggiungere rapporti di riduzione alquanto grandi quali $8 \div 1$ ed anche $10 \div 1$. In ogni caso non si dovrebbe superare il limite di duttilità ad elevate temperature.

Tabella 7.2: le proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio in funzione delle diverse temperature di lavorazione a freddo.

Lega Cu-Be	Temperature	Carico di snervamento σ_{SN}	Allungamento	Carico di rottura σ_R
	°C	MPa	%	MPa
Ad alta resistenza C17000 e C17200	705	48	60	70-193
	760	14	105	55-138
	815	7	130	48-117
Ad alta conduttività C17500 e C17510	705	76	35	110-228
	760	55	45	83-186
	815	34	55	69-159
	870	20	70	41-138
	925	14	85	34-110

I rapporti di riduzione dovrebbero essere sufficientemente grandi da procurare penetrazioni del materiale a seguito della deformazione che siano in grado di attraversare l'intera sezione del pezzo. Una penetrazione del componente che sia solamente parziale e causata da colpi di martello, in modo particolare se ciò avviene nei passaggi finali, può procurare una indesiderata e dinamica ricristallizzazione ed un'associata disuniformità nella microstruttura e nelle proprietà meccaniche a seguito di invecchiamento del materiale.

2) L'estrusione: è un processo industriale di deformazione plastica che consente di produrre pezzi a sezione cilindrica (tubi, profilati). Consiste essenzialmente nel forzare per compressione il materiale, allo stato pastoso, a passare attraverso una sagoma (matrice o filiera) che riproduce la forma esterna del pezzo che si vuole ottenere. Se la sezione è cava, sarà presente un'anima che riprodurrà il profilo della cavità interna. La compressione del materiale a monte della matrice è ottenuta, per la gomma o la plastica, da apparecchiature a semplice o doppia vite senza fine (vite di Archimede) che spingono il materiale verso la testa di estrusione: questo macchinario viene appunto chiamato estrusore. Nel caso dei metalli e quindi della lega Rame-Berillio vengono invece utilizzate delle macchine a pistone in modo tale da costringere il materiale allo stato solido al passaggio attraverso la testa.

Le variabili principali che caratterizzano questo processo risultano quindi essere:

- la temperatura
- il materiale con cui è costruito lo stampo
- la forma del tampone pressatore
- il tipo di lubrificante usato e la qualità di lubrificazione

Primo passaggio fondamentale nel processo di estrusione è il riscaldamento del materiale che può essere ottenuto anche tramite induzione con una minima ossidazione: una temperatura troppo bassa della billetta provocherebbe il ricorso ad eccessivi carichi di pressione che potrebbero causare una distribuzione non uniforme delle deformazioni. Anche per tale lavorazione nella fase di riscaldamento sussiste il problema della possibile formazione del film ossido: l'utilizzo di atmosfere protette nel forno di preriscaldamento ritarda il verificarsi del fenomeno di ossidazione, principale artefice dell'usura degli stampi.

I range di temperatura per la lavorazione di estrusione si differenziano in funzione della tipologia di lega Rame-Berillio per cui avremo:

- per le leghe ad alta conduttività	C17500, C17510	815 °C ÷ 910 °C
- per le leghe ad alta resistenza	C17200	705 °C ÷ 775 °C

nb: la lega C17300, essendo la versione non lavorata (free machining) della C17200, è più difficile da estrudere rispetto alle altre tipologie di lega Rame-Berillio e richiede perciò un controllo del tutto particolare dei parametri di processo.

Per quanto concerne la velocità di passata ed il rapporto di estrusione questi dipendono dalla conformazione dello stampo e dalla capacità della strumentazione e del sistema metallico di distribuire il calore adiabatico generato durante la deformazione. I sistemi di bloccaggio sono solitamente piatti e l'angolo di estrusione (die half angle) per le leghe ad alta resistenza è in genere di 35 ° e permette di raggiungere rapporti di estrusione anche di 10 ÷ 1.

In tutto ciò molto importante è conoscere la tipologia dei materiali usati per la realizzazione degli stampi essendo quest'ultimi vettori del calore per il riscaldamento-raffreddamento dei pezzi e trasmettitori delle forze di pressione in sinergia con il pistone pressatore. Solitamente vengono usati acciai per utensili, leghe ad alta temperatura a base di Cobalto e di Nichel, oppure ceramiche a base di Zirconio e di Allumina: gli stampi ceramici hanno il vantaggio di un basso coefficiente di attrito nell'interazione con le leghe Rame-Berillio e quindi di una bassa velocità di usura. In alternativa ed anche a supporto di ciò viene solitamente applicata una lubrificazione attraverso composti a base di Grafite e libere da Zolfo per evitare problematiche connesse a fenomeni di ossidazione già citati in precedenza per altre lavorazioni.

3) La ricalcatura o formatura: le temple trattabili termicamente in forma di aste e di fili possono essere formate attraverso ricalcatura a freddo:

- la lega C17500 può essere rafforzata per laminazione (mill hardened);
- la lega C17510 nella forma di aste e di barre in forza della moderata resistenza e moderata duttilità possono essere formate a freddo tramite piegatura.

NB Trattamenti termici e proprietà dei prodotti lavorati a caldo: i pezzi ottenuti con forgiatura così come quelli prodotti tramite estrusione richiedono trattamenti termici così da ottenere la massima resistenza e per tal motivo solitamente si ricorre in sequenza alla ricottura in soluzione, al raffreddamento rapido ed all'invecchiamento. Talvolta, in alternativa al solution annealing, i compo-

nenti finiti a freddo (gli estrusi in modo particolare) possono essere raffreddati già nelle presse attraverso immersione in un mezzo ben agitato.

L'utilizzo di uno spray raffreddante è solitamente inadeguato in quanto la risultante risposta all'invecchiamento dipende sia dalla temperatura di finitura a caldo che dalla rapidità con la quale si attua il raffreddamento stesso.

Lavorazioni per asportazione di materiale (machinability): con il termine machinability in metallurgia si identificano quell'insieme di lavorazioni che implicano asportazione di materiale sotto forma di truciolo. Proprio questo scarto risulta essere per le leghe Rame-Berillio un fattore di ritardo nella produzione industriale dal momento che, essendo solitamente piuttosto lungo e resistente e non distaccandosi facilmente dal pezzo in lavorazione, va ad intralciare il cammino delle macchine utensili che necessariamente dovranno essere fermate. Risolvendo con opportuni accorgimenti tale problematica, la velocità di lavorazione delle leghe Rame-Berillio è di per sé comparabile a quella ottenibile con gli acciai inossidabili.

L'asportazione può quindi essere effettuata sia sulle leghe invecchiate ma anche su quelle ricotte o lavorate a freddo: solitamente le leghe ad alta resistenza invecchiate, essendo caratterizzate da un maggior contenuto di Berillio, vengono maggiormente rafforzate dal processo di indurimento per precipitazione e per tal motivo sono per lo più sottoposte ad operazioni di rettifica, di asportazione marginale di materiale data la loro durezza. Altre tipologie di leghe Rame-Berillio vedono migliorata la loro lavorabilità grazie alla presenza di inclusioni di determinanti alliganti: per esempio la lega C17300 è usata per le lavorazioni meccaniche sfruttando la presenza di Piombo che aiuta a rompere il truciolo e funge da lubrificante solido. Lo strisciamento della punta dell'utensile comporta infatti un incremento di temperatura e di conseguenza la liquefazione del Piombo, la disgregazione del truciolo in parti più piccole ed una migliore scorrevolezza della punta stessa.

Gli strumenti di taglio devono essere mantenuti affilati e con un angolo di taglio positivo tra i 5° e i 20°. E' inoltre raccomandabile il ricorso a rompitrucioli (in modo particolare per la tornitura) e, come già accennato, l'impiego di fluidi di taglio che fungano da lubrificanti ed allo stesso tempo da refrigeranti. Senza tali accorgimenti la superficie del pezzo sottoposto a lavorazione vedrebbe un notevole incremento della propria temperatura tale da poter provocare un parziale rafforzamento per precipitazione della lega stessa a danno quindi della lama dello strumento. Emulsioni acquose con oli solubili hanno eccellenti proprietà refrigeranti, mentre gli oli minerali e vegetali si caratterizzano per una maggiore capacità di lubrificazione: con entrambe le tipologie di fluido di taglio si deve ricordare che i composti dello Zolfo, che loro spesso contengono, macchiano il Rame-Berillio qualora

non siano del tutto rimossi prima che il materiale sia sottoposto ad altri trattamenti, in modo particolare a quelli termici.

Come già noto inoltre, la lega Rame-Berillio è spesso coperta da un sottile film ossido per cui si raccomanda che i tagli preliminari siano abbastanza profondi in modo tale da che l'incisione sia in grado di oltrepassare al primo passaggio tale barriera: tagli poco profondi tendono ad indurire gli strati superficiali provocando un incremento di usura delle lame e delle punte degli utensili. Una profondità di taglio minimo superiore a 0,007 inch (1,6 mm) dovrebbe comunque essere sempre praticata.

In molte lavorazioni di asportazione del materiale risulta inoltre indispensabile anche l'impiego di supporti rigidi sia del pezzo da lavorare che dello strumento e portautensili alquanto robusti: a causa del suo minore modulo elastico, una barra di Rame-Berillio non supportata si piegherà ad una determinata pressione molto più di una barra di acciaio delle stesse dimensioni.

Capitolo 8 Le diverse modalità di giunzione.

Le leghe Rame-Berillio, così come larga parte dei materiali metallici, godono della possibilità di ricorrere a diverse tecniche di unione qualora si verifici una rottura dei componenti. Queste differenti alternative, come vedremo, si differenziano principalmente per la temperatura a cui vengono portati i lembi, fattore questo che influisce in maniera determinante sia sulla entità della zona termicamente alterata, sia sulla qualità delle proprietà meccaniche del pezzo, in modo particolare sulla resistenza alle sollecitazioni esterne. Prima di approfondire le specifiche tipologie di saldatura che interessano le leghe Rame-Berillio è bene quindi richiamare alcuni dei concetti fondamentali di tale processo.

In campo metallurgico, con il termine **saldatura** si identifica un procedimento che permette il collegamento permanente tra di loro di due parti solide al fine di realizzare la continuità del materiale per cui tale operazione è stata effettuata. Nella sua accezione più diffusa prevede l'apporto di calore localizzato tale da permettere la fusione del materiale. In relazione della diversa qualità del materiale utilizzato si distingue tra

- materiale autogeno: se per l'unione dei due pezzi si utilizza lo stesso materiale con cui è costituito il componente od un materiale con caratteristiche ad esso omogeneo avremo una saldatura autogena e sarà necessario preparare i lembi con un'operazione di cianfrinatura.
- materiale eterogeneo: se per la saldatura si ricorre ad un materiale diverso, questo verrà definito materiale d'apporto e l'operazione verrà chiamata brasatura.

La finalità principale della saldatura è quella di ripristinare o dare vita ad una struttura monolitica, cioè una struttura che non presenti discontinuità di caratteristiche in presenza dei giunti in modo dunque che il pezzo sia dotato di resistenza meccanica uniforme rispetto alle aggressioni esterne.

Sebbene le tipologie di saldatura applicabili ad un componente siano molteplici è comunque possibile definire un procedimento generico che accomuna i diversi processi e che consta di due tappe principali:

1. Come prima cosa è necessario attuare la preparazione dei lembi tramite cianfrinatura.
2. Riscaldamento dei giunti a temperature diverse a seconda del processo impiegato
 - nella saldatura autogena i giunti vengono fusi per cui avremo $T_{\text{Giunto}} > T_{f \text{ Giunto}}$
 - nella brasatura viene fuso il materiale d'apporto che funge da collante tra le parti:
il giunto viene riscaldato ma non fino a fondere per cui risulterà che $T_{\text{Giunto}} < T_{f \text{ Giunto}}$
mentre il materiale d'apporto presenterà le seguenti caratteristiche $T_{f \text{ D'App}} < T_{\text{D'App}} < T_{f \text{ Giunto}}$

Il calore necessario al riscaldamento delle varie parti può essere fornito in uno dei seguenti modi:

- tramite fiamma ottenuta dalla combustione di gas con aria od ossigeno;
- grazie ad arco elettrico prodotto da due elettrodi (uno dei quali può essere il pezzo stesso);
- sfruttando l'effetto Joule prodotto dal passaggio della corrente attraverso i pezzi da saldare;
- tramite laser.

Per ottenere una saldatura resistente, tecnicamente buona, nonché esente da imperfezioni, la zona di fusione deve essere protetta da fenomeni di ossidazione ed il metallo fuso deve essere depurato da scorie: per ottenere questo è necessario lavorare in un'atmosfera il più possibile priva di ossigeno che si può ottenere dando vita, nella zona termicamente alterata, ad una atmosfera protettiva prodotta dalla reazione tra gas, borace, silicati e carbonati che procurano l'espulsione delle scorie.

E' bene ricordare che non esiste una sola modalità di brasatura ma che anch'essa si differenzia, in funzione della temperatura di esercizio, in tre tipologie. Si parlerà dunque di

- **brasatura forte:** quando si opera a temperature superiori ai 450 °C ma comunque ad una temperatura inferiore al materiale da saldare. Il giunto dovrà essere preparato in modo da favorire la penetrazione del materiale d'apporto per capillarità.
- **brasatura dolce:** quando si opera a temperature inferiori ai 450 °C ed inferiori alla temperatura del materiale da saldare. Anche in questo caso il giunto dovrà essere preparato in modo tale che il materiale d'apporto possa diffondere per capillarità.
- **saldobrasatura:** in questo le leghe d'apporto sono leghe fondenti a temperature superiori a quelle usate nella brasatura forte ma comunque sempre inferiori al punto di fusione dei materiali da saldare. Il giunto viene preparato in maniera del tutto simile a quanto accade per una saldatura autogena.

Per quanto concerne invece l'evoluzione delle modalità e delle tecniche di saldatura che si sono succedute nel corso degli ultimi decenni è importante evidenziare come la tecnologia in questo campo abbia avuto come mission principale quella di rendere tale operazione sempre più efficiente dal punto di vista della limitazione della zona termicamente alterata minimizzando di conseguenza l'influenza negativa sulle caratteristiche meccaniche del materiale in modo tale che siano preservate da eccessivi sbalzi termici.

Per quanto riguarda le leghe Rame-Berillio esse possono essere accoppiate con successo tramite tutte le principali tecniche di unione sopra elencate come la saldatura, la brasatura ed anche la saldatura a freddo. Tutti i principali processi richiedono l'applicazione di calore che comporta un notevo-

le incremento della temperatura che deve essere sempre controllata in relazione a due fondamentali proprietà della lega Rame-Berillio:

- la suscettibilità all'indurimento per precipitazione (processo di invecchiamento)
- la formazione di un sottile strato di ossido quando viene riscaldato.

Proprio in virtù di questi fattori la saldatura dovrebbe essere preferibilmente condotta prima del trattamento termico di ricottura in soluzione così che l'interezza del prodotto, inclusa la zona saldata, riceva lo stesso trattamento e mantenga le stesse proprietà meccaniche.

Una delle tecniche maggiormente impiegata nell'unione dei pezzi in lega Rame-Berillio è la **saldobrasatura (saldatura dolce)**: il ricorso a tale tecnica è consigliato quando la temperatura di esercizio del componente è circa a 150 °C, quando temperature più elevate potrebbero danneggiare i componenti e vengano richieste una maggiore conducibilità elettrica e termica rispetto a quelle che una unione meccanica possa dare. Per questa ultima ragione la tecnica di saldatura dolce risulta essere la più comunemente usata sia nelle applicazioni elettriche che elettroniche in cui però lo spessore del materiale trattato risulti essere almeno superiore agli 0,3 mm.

Le modalità di riscaldamento principali utilizzate con tale tecnica sono molteplici: si può ricorrere all'effetto Joule sviluppato tramite resistenza elettrica, suscitato da induzione, oppure incrementare la temperatura tramite combustione, raggi infrarossi, ma anche attraverso deposizione di fase vapore. Sia prima che dopo aver effettuato la saldatura dolce è necessario aver completato una pulitura profonda del pezzo in modo tale che su di esso non siano più presenti tracce di olio, grasso, nonché annerimenti dovuti ai fenomeni di ossidazione. Si privilegia l'utilizzo del più dolce fondente disponibile, come ad esempio materiali fondenti non corrosivi che sono attivi solamente quando sono riscaldati e che necessitano di acqua riscaldata per la pulizia. Comunemente il materiale d'apporto impiegato per tali operazioni sono composti Stagno-Piombo:

- 50 Sn – 50 Pb tipicamente scelta per la saldatura a mano
- 63 Sn – 37 Pb idonee per saldature operate meccanicamente e lavorazioni ad alto contenuto elettronico

tali materiali presentano una temperatura di fusione tra i 180 °C ÷ 240 °C ed è sufficientemente bassa ed al di sotto del range di temperature proprie dell'invecchiamento delle leghe Rame-Berillio per cui le proprietà meccaniche non saranno intaccate durante la saldatura.

In alcuni casi possono venire impiegati in qualità di materiali d'apporto dei composti in Argento od in Indio che riescono a garantire alle saldature alta resistenza e duttilità.

Questo insieme di composti sono adatti sia a saldature automatiche che manuali a patto che vengano eseguite a velocità moderate: la velocità può essere incrementata qualora sia attuato un rivestimento con 60Sn-40Pb dello spessore almeno di 0,007 mm od anche semplicemente con Stagno applicato attraverso immersione a caldo o processo di galvanoplastica.

E' necessario in ogni caso non cadere in situazioni di surriscaldamento in modo tale da poter evitare l'ossidazione, ostacolare la degradazione del fondente, nonché ritardare la formazione di composti intermetallici nell'interfaccia tra lega per saldatura e substrato e prevenire cambiamenti metallurgici nel substrato. E' comunque decisamente opportuno rimuovere l'eventuale film ossido che si forma tra il trattamento di solubilizzazione ed il trattamento di invecchiamento anche perché, qualora ciò non venisse portato a termine con successo, il rafforzamento per precipitazione andrebbe più che altro ad incrementare l'attecchimento del film ossido rendendolo di fatto molto difficile da essere eliminato. Dove è possibile è auspicabile adottare dei sistemi di pulitura abrasivi o meccanici, utilizzando carta smerigliata od anche sistemi lucida-metalli, ma in molti casi come quello di produzione di massa di piccoli componenti ciò è difficilmente praticabile. Tali ostacoli possono essere comunque superati ricorrendo al decapaggio: nei casi più ostinati potrebbe essere necessario ripetere il processo di decapaggio dopo il trattamento termico finale.

Si può inoltre ricorrere all'uso di dissipatori di calore nella realizzazione delle leghe rame –Berillio in modo tale che non vi sia una permanenza prolungata di alte temperature nella zona termicamente alterata così da limitare l'alterazione subita dalle proprietà meccaniche.

Altra tecnica utilizzata per unire componenti in lega Rame-Berillio è la **brasatura** a cui generalmente si fa ricorso per produrre giunzioni più forti e più resistenti rispetto a quelle che si realizzano con la saldobrasatura. La temperatura di processo è in questo caso maggiore della temperatura di invecchiamento ma solitamente non superiore a quella di ricottura in soluzione: è quindi preferibile condurre la brasatura prima di ognuno di questi trattamenti termici, anche se è comunque possibile effettuare brasature su leghe invecchiate a patto di utilizzare un ciclo rapido.

Sostanzialmente esistono due differenti tecniche per realizzare una brasatura su una lega Rame-Berillio:

1) Brasatura con approccio a bassa temperatura: $T_{f_metal\ filler} \leq 620\text{ }^{\circ}\text{C}$

in cui la temperatura di fusione del metallo d'apporto è inferiore ai 620 °C.

Tale tipologia di brasatura è consigliata qualora si vogliano unire piccoli componenti di dimensione e forma simili ed è applicabile solo dopo aver già eseguito l'invecchiamento in modo tale da minimizzare perdite di durezza e resistenza del materiale.

Per la sua realizzazione richiede una localizzata e rapida applicazione del calore nell'area da saldare, un tempo di sosta di circa un minuto al massimo seguito da un rapido raffreddamento forzato ad aria o ad acqua.

Piccoli assemblati tramite brasatura possono essere sottoposti ad un trattamento di invecchiamento ad alta temperatura durante l'esecuzione della stessa brasatura.

2) Brasatura con approccio ad alta temperatura: $T_{f_metal\ filler} \approx T_{ricottura\ Cu-Be}$

in cui la temperatura di fusione del metallo d'apporto è circa quella di ricottura in soluzione delle differenti tipologie di leghe Rame-Berillio

- per le leghe ad alta resistenza $T_{f_metal\ filler} \approx 760\text{ }^{\circ}\text{C}$

- per le leghe ad alta conduttività $T_{f_metal\ filler} \approx 900\text{ }^{\circ}\text{C} \div 950\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tale tipologia di brasatura risulta maggiormente adatta alla saldatura di pezzi di maggiore dimensione e di forma differente e deve inoltre essere applicato dopo aver concluso il trattamento di ricottura in soluzione, detto anche di solubilizzazione, ma prima del trattamento termico di invecchiamento.

Il riscaldamento necessario alla sua realizzazione deve essere seguito da un rapido raffreddamento, preferibilmente ad acqua, in modo da preservare la risposta all'invecchiamento.

Anche per la brasatura è necessario ricordare come sia indispensabile pulire con attenzione le superfici prima di effettuare l'unione dei pezzi così da rimuovere le sostanze oleose, il grasso e lo sporco, nonché l'eventuale presenza di ossidi. I residui del fondente dovrebbero essere rimossi dopo l'unione grazie all'ausilio di acqua fredda e spazzolati, oppure ricorrendo all'uso di acido solforico diluito a caldo.

Altra tecnica ancora che permette di unire le leghe Rame-Berillio è la **saldatura (welding)**. Tale soluzione deve essere eseguita su lega Rame –Berillio ricotta in soluzione e solo successivamente sottoposta ad invecchiamento: solo prima di venire invecchiato il materiale può infatti essere saldato dal momento che la maggiore conduttività termica del materiale d'apporto e le complesse condizioni

metallurgiche nella zona termicamente alterata rendono i trattamenti termici post-saldatura altamente utili per il ripristino adeguato delle proprietà metallurgiche e l'eliminazione di tensioni interne. Tale processo di unione delle leghe Rame-Berillio prevede per prima cosa la progettazione nonché la realizzazione delle idonee conformazioni delle estremità delle giunzioni da unire, seguito da un preriscaldamento in cui la temperatura sia inferiore alla temperatura di invecchiamento ed infine il ricorso ad una delle diverse tecniche di saldatura disponibili. Tra queste possiamo ricordare la saldatura a fascio elettronico, quella laser, la saldatura a resistenza per l'unione faccia a faccia delle lamiere, la saldatura per attrito per le sezioni tubolari ed infine la saldatura ad arco a gas tungsteno per la copertura e l'unione di sezioni spesse.

L'incollaggio (adesive bonding) è un'ulteriore tecnica di unione delle leghe Rame-Berillio che negli ultimi anni ha trovato un sempre più diffuso utilizzo: tale soluzione si caratterizza infatti per bassi costi di realizzazione ed ottime prestazioni, in termini di resistenza dell'assemblato, per temperature superiori ai 150 °C. Sono ormai note diverse formulazioni adesive che, non necessitando di alcuna complessa preparazione delle superfici, permettono di ottenere una buona forza di legame tra le parti unite. In tutto ciò gioca un importante ruolo la conformazione dei giunti che si vanno ad unire: dove sia possibile i carichi dovrebbero essere trasmessi solamente parallelamente e non ortogonalmente all'asse della giunzione stessa.

Capitolo 9 Problemi di sicurezza e rischi per la salute.

I prodotti a base di lega Rame-Berillio possono essere normalmente fabbricati ed utilizzati in completa sicurezza, anche se risulta ormai confermato da numerosi studi scientifici che i fumi così come le particelle di polvere prodotte da alcuni dei processi di lavorazione già descritti nei capitoli precedenti possano procurare dei rischi per la salute degli addetti. Ormai da alcuni anni, la normativa europea, sulla scia di già precedenti normative nazionali (vedi la normativa inglese sulla sicurezza e salute sul lavoro del 1974 a cui faremo riferimento in tale capitolo), ha attribuito al fornitore dei prodotti in Rame-Berillio la responsabilità di comunicare al consumatore, in base a quanto rivelato dai dati raccolti in materia di sicurezza e salute, l'insieme di precauzioni a cui attenersi qualora si debba operare con tali prodotti.

Manipolazione: non sono stati ad oggi rivelati particolari rischi associati con la manipolazione così come per quanto riguarda l'accidentale ingestione di componenti in lega Rame-Berillio. Qualora nel maneggiamento di tali materiali ci si dovesse procurare tagli o abrasioni, è consigliabile seguire le normali procedure di pronto soccorso, facendo comunque particolare attenzione affinché vengano rimosse tutte le particelle metalliche dalle lesioni nell'osservanza dei normali standard igienici.

Operazioni non pericolose: molte delle operazioni già descritte nei precedenti capitoli sono da considerarsi del tutto sicure e non richiedono pertanto specifici controlli se non la necessità che negli ambienti di lavoro siano garantiti idonei standard di ventilazione dei locali. Tra le operazioni del tutto sicure possiamo ricordare la manipolazione, lo stampaggio, la formatura, molte delle lavorazioni con i macchinari, trattamenti termici a media temperatura, la pulizia, la placcatura, la saldatura e generalmente le operazioni sia di assemblaggio che di disassemblaggio.

Rischi per la salute: I maggiori rischi per la salute connessi alle leghe Rame-Berillio si presentano principalmente con quell'insieme di processi che causano la produzione di fumi e polveri ricchi di particelle di tali materiali: l'inalazione delle microparticelle, specialmente quelle con dimensioni tra lo $0,5 \div 0,7 \mu\text{m}$, può provocare seri problemi polmonari con rilevanti conseguenze per quanto concerne le funzionalità respiratorie proprie dei bronchi.

E' pertanto opportuno adottare misure di protezione nei confronti di tutti coloro che possano essere esposti a tali elementi: in merito a questo la normativa europea ha definito precise norme a cui doversi attenere al fine di preservare l'incolumità di ogni individuo. E' ad esempio definito un limite

massimo di esposizione di $2 \mu\text{g} * \text{m}^3$ (valore pesato su una media di 8 ore lavorative) ed in relazione a ciò l'azienda è chiamata a mettere in atto tutti i sistemi di controllo di produzione affinché tali valori siano rispettati ed è esortata a scegliere tra le diverse soluzioni quelle che possano garantire più bassi livelli ottenibili inferiori ai già citati limiti imposti. Va però ricordato che numerose ricerche scientifiche di natura indipendente, condotte per lo più negli Stati Uniti hanno dimostrato come tale valore di soglia sia del tutto inappropriato ad evitare l'insorgenza della sindrome cronica da Berillio (CBD).

Operazioni da considerarsi rischiose: le operazioni che sono da ritenersi potenzialmente rischiose per la salute degli addetti sono quelle che possono causare la contaminazione dell'aria al di sopra dei livelli consentiti per legge tra le quali possiamo includere la smerigliatura, il taglio abrasivo, l'abrasione stessa, la levigatura, l'erosione ottenuta da scintille e da lavorazioni elettrochimiche, trattamenti termici ad alte temperature, saldatura, fusione e colata. Queste operazioni richiedono rigidi controlli e monitoraggio continuo dell'aria al fine di preservare la sicurezza dei lavoratori. I controlli dipendono dalle specifiche caratteristiche delle trasformazioni, variando dall'uso di semplici sistemi di refrigerazione e lubrificanti in grado di intrappolare e trattenere le polveri, a sistemi di estrazione e filtraggio dell'aria in modo da purificare l'ambiente di lavoro. In modo particolare i trattamenti termici e tra questi in primis l'invecchiamento, la ricottura in soluzione o il riscaldamento per la forgiatura, dovrebbero condotti in forni chiusi. In aggiunta a ciò gli addetti della fornace dovrebbero indossare per la loro incolumità delle mascherine in grado di proteggere le loro vie respiratorie.

I film ossidi che si formano soprattutto durante i trattamenti termici possono diventare volatili a seguito dell'insieme di operazioni messe in atto per eliminarli. Viene dunque consigliato che gli ossidi siano rimossi ricorrendo al decapaggio e che i fluidi di decapaggio utilizzati siano eliminati attraverso procedure standard che non prevedano evaporazioni. In maniera simile nel caso di erosione per scintilla e fresatura chimica, i fluidi di lavoro dovrebbero essere diluiti ed eliminati in forma liquida senza mai subire alcuna vaporizzazione.

Capitolo 10 Le molteplici applicazioni delle leghe Rame-Berillio.

Le leghe Rame-Berillio ad oggi vengono utilizzate in vari campi industriali e questa versatilità ha loro garantito un notevole successo soprattutto negli ultimi cinquant'anni, periodo nel quale la ricerca ha permesso di incrementare le già buone qualità di partenza di tali materiali e di allargarne le funzionalità: le diverse applicazioni in cui tali leghe vengono impiegate sono strettamente correlate alle loro specifiche proprietà di alta resistenza e durezza, di elasticità e conduttività sia termica che elettrica, nonché di resistenza alla corrosione. Proprio per questo motivo è possibile suddividere i diversi utilizzi delle leghe Rame-Berillio in cinque gruppi principali:

1) Nell'industria elettrica ed elettronica per la realizzazione di

- contatti elettrici a molla per i quali si sfrutteranno le proprietà di alta resistenza e buona formabilità della lega nonché la stabilità termica delle medesime proprietà;
- switch, controllori termostatici e relays elettromeccanici in cui prioritarie sono invece la resistenza a fatica e la resilienza;
- custodie per sensori magnetici grazie alla bassa suscettibilità magnetica di cui godono le leghe Rame-Berillio;
- bobine magnetiche in virtù della buona conducibilità elettrica e termica a temperatura criogenica e della notevole resistenza.

2) Nell'industria siderurgica e meccanica in cui due sono le applicazioni principali:

- la produzione di cuscinetti in grado di resistere ad elevate sollecitazioni senza incorrere in deformazione plastica permanente ;
- la realizzazione di elettrodi per saldature a resistenza per i quali vengono sfruttate sia l'alta conducibilità elettrica che termica e l'elevata durezza di tali materiali.

3) Nell'industria plastica

- per la creazione degli stampi data l'alta conduttività termica e la resistenza a fatica, caratteristiche di peculiare importanza per la distribuzione del calore ed anche per l'accorciamento del tempo ciclo di produzione dei componenti.

4) Nell'industria petrolifera, nelle miniere, negli aeroporti e nelle industrie di esplosivi

- grazie alla produzione di strumenti antiscintilla necessari per la sicurezza degli utenti.

5) In diversi campi industriali in cui particolari condizioni di criticità dell'ambiente di lavoro richiedono l'impiego di materiali caratterizzati da notevole resistenza alla corrosione.

Come già accennato nel capitolo di introduzione, esistono molti altri composti contenenti Berillio che trovano un largo impiego in diversi settori industriali come ad esempio le leghe madri (master alloys) del Berillio nel Rame, nel Nichel e nell'Alluminio. Tali composti sono adatti ad usi di fonderia nella preparazione di leghe di fonderia (casting alloys) od ancora nel trattamento dei metalli puri per la produzione delle leghe. Trova ampio utilizzo anche la polvere atomizzata di Rame-Berillio, la cui notevole conduttività termica la rende idonea nelle strumentazioni per il taglio dei metalli e nella realizzazione dei contatti elettrici permeabili.

1) I diversi impieghi delle leghe Rame-Berillio nell'industria elettrica ed elettronica

Il principale vantaggio offerto dalle leghe Rame-Berillio a questo primo gruppo di applicazioni è l'alta facilità con cui possono essere prodotte in forme complicate e successivamente indurite tramite opportuni trattamenti termici. La loro conduttività sia elettrica che termica risultando molto più alte rispetto a quelle che presentano altri materiali con comparabili proprietà di rinvenimento, unitamente alle già note qualità non magnetiche, fa sì che vengano raccomandate in modo particolare per l'industria elettrica ed elettronica in cui il maggiore utilizzo è relativo alla produzione di contatti a molla di molteplici tipologie così come alla realizzazione di molle calibrate per strumenti impiegati nelle misurazioni elettriche. Anche le molle di tipo hair springs degli orologi possono venire prodotte in lega Rame-Berillio data la facilità con la quale possono essere prodotte e data la robustezza che permette loro di venire manipolate sui banchi di assemblaggio senza particolari preoccupazioni o cautele, assicurando così una minimizzazione degli scarti che, nella produzione di massa, attribuisce loro un'alta profittabilità pur avendo il materiale un costo unitario che dovrebbe sfavorirne l'impiego.

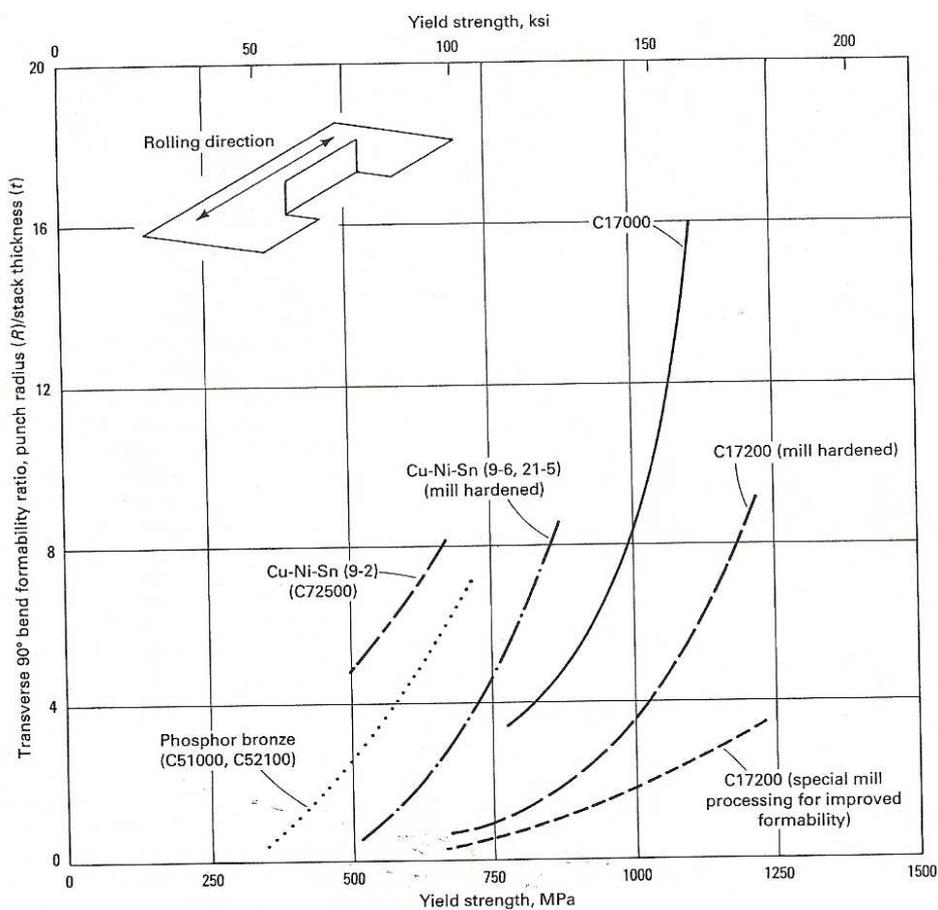
Entrando più nel dettaglio cercheremo di specificare quali siano le più opportune tipologie di leghe Rame-Berillio da scegliere in base alle diverse applicazioni e quali siano le motivazioni alla base di tali associazioni tipologia-impiego.

- **la produzione dei contatti elettronici a molla**

Questa tipologia di connettori viene in modo particolare impiegata nella realizzazione di circuiti elettronici miniaturizzati, sistemi in cui è necessario che i vari materiali impiegati siano caratterizzati al contempo da elevata formabilità e da minimizzazione degli spazi occupati, fattori propri di materiali metallici che presentino alti valori del rapporto tra il carico di snervamento ed il modulo elastico del materiale, ottimo indicatore della capacità di una molla di applicare una forza dopo aver subito una deformazione senza che quest'ultima abbia acquisito un carattere permanente.

Il diagramma sotto riportato confronta tra loro alcune delle leghe utilizzate per la costruzione dei connettori in relazione proprio al rapporto appena citato: tale indicatore varia non solo in virtù della composizione ma anche, come si può notare, in virtù dei trattamenti termici e meccanici subiti dal materiale.

Fig. 10.1: relazione tra la resistenza allo snervamento e la formabilità trasversale alla piegatura di alcune leghe selezionate per la costruzione di connettori.



Il sistema fisico, nella fattispecie la molla, caratterizzato da una condizione dovuta al trattamento subito in grado di indurre in esso tensioni interne residue di minore entità, presenta migliori capacità di assorbimento delle tensioni impulsive esterne, riuscendo a scaricare l'energia appena inglobata senza subire una deformazione permanente della propria struttura e mantenendo in tal modo la propria natura elastica.

Per quanto concerne la formabilità, essa appare come una caratteristica imprescindibile nella realizzazione dei connettori a molla, componenti che solitamente vengono formati a partire da lega in Rame-Berillio sottoforma di nastri più che di fili. Anche in questo caso nella selezione tra le diverse tipologie della nostra lega ci viene in aiuto un altro indicatore denominato formabilità alla piegatura (bend formability) e definito dal rapporto tra il raggio di valore minimo di piegatura rispetto allo spessore della striscia tale da evitare la formazione di cricche visibili sulla superficie più esterna della piegatura: valori minori di tale rapporto rappresentano una migliore capacità di acquisire anche forme complesse in uno spazio contenuto.

Dall'analisi dei valori della tabella sottostante, relativa alla diversa formabilità di quattro tipologie di leghe Rame-Berillio con diverse condizioni di stato di trattamento subito, appare evidente come, anche in questo caso i diversi trattamenti di rafforzamento giochino un ruolo chiave nel determinare l'attitudine del materiale stesso ad acquisire con facilità o meno anche forme complesse. In particolare si può notare anche in questo caso che i trattamenti termici di rafforzamento implicando un minore stress tensionale nel materiale permettano di raggiungere migliori risultati rispetto a quelli conseguibili sottoponendo la lega a processi di lavorazione a freddo e tanto più a trattamenti di rafforzamento di natura meccanica, i più inclini a lasciare nel materiale un maggiore carico di tensioni interne residuali che rafforzano il materiale a scapito però della sua lavorabilità.

Tabella 10.1: dati relativi alla diversa formabilità di quattro tipologie di leghe CuBe con diverse condizioni di tempra.

Classificazione di Formabilità	C17000			C17200			C17500 e C17510		
	Stato	R/t trasversale	R/t longitud.	Stato	R/t trasversale	R/t longitud.	Stato	R/t trasversale	R/t longitud.
Eccellente	TB00	0,0	0,0	TB00	0,0	0,0	TB00	0,0	0,0
				TD01	0,0	0,0	.....	.....	.....
				TM00*	0,0	0,0			
				TM02*	0,0	0,0			
Molto buona	TD02	1,0	0,5	TD02	1,0	0,5	TD04	0,6	0,5
				TM00	0,8	0,8	TF00	1,0	1,0
				TM01	1,0	1,0	HTC	1,0	1,0
				TM04*	1,0	1,0			
Buona	TD04	2,9	1,0	TD04	2,9	1,0	TH04	2,0	2,0
				TM01	1,7	1,5			
				TM02	2,2	1,9			
				TM06*	2,0	2,5			
Moderata	.....	.....	.....	TM05	3,2	2,8	HTR	3,5	2,8
	.....	.....	.....	TM06	3,8	3,0			
				TM08*	3,0	3,5			
Limitata	TM04	5,1	3,8	TM08	6,0	4,1	.....	.....	.....
				TM05	7,7	5,0			
				TM06	10,4	6,1			

I rapporti di formabilità riportati in tabella fanno riferimento ad un punzone di raggio R ed una striscia di spessore t e sono validi per strisce di spessore superiore ai 1,3 mm. Strisce di spessore inferiore ai 0,25 mm presenteranno valori di formatura anche migliori di quelli riportati. I valori corrispondono al raggio minimo di punzone in grado di formare un campione di nastro ad un angolo di piegatura di 90 ° senza incombere in rottura o cricche.

La direzione di piegatura trasversale ha un asse di piegatura parallelo alla direzione di laminazione.

La direzione di piegatura longitudinale ha un asse di piegatura perpendicolare alla direzione di piegatura.

Valori minori del rapporto implicano una migliore formabilità del materiale e di conseguenza una migliore capacità di risparmio dello spazio per la realizzazione del componente a tutto vantaggio del circuito elettronico miniaturizzato in cui dovrà essere inserito.

Volendo costruire un connettore a molla sarà comunque possibile scegliere fra le diverse tipologie di leghe Rame-Berillio attenendosi però ad una procedura standardizzata che ci con-

sentirà di attuare la scelta migliore tra quelle accessibili. I passi fondamentali necessari in questa procedura prevedono pertanto:

- in relazione alla conformazione del componente consultare i relativi diagrammi dati dall'interrelazione tra il carico di snervamento del materiale ed il rapporto di formabilità per una piegatura di 90° (è necessario considerare se la nostra piegatura avrà asse parallelo all'asse di laminazione o se invece sarà ad esso perpendicolare: esistono infatti due diagrammi differenti per le due diverse situazioni).
- calcolare il raggio di piegatura più stretto del componente che vogliamo formare.
- determinare il carico di snervamento tramite l'analisi dello sforzo normale in base ai dati di progetto.
- accoppiando i dati desunti dai due passi precedenti si ottengono le coordinate di un punto: la lega selezionata sarà quella la cui curva è immediatamente sotto al punto appena individuato sul diagramma.

Nella figura 10.1 viene riportato come esempio il diagramma tra carico di snervamento e rapporto di formabilità per una piegatura a 90° ad asse trasversale, in cui R è il raggio del punzone corrispondente al più stretto raggio di curvatura e t indica invece lo spessore della striscia di materiale utilizzato allo scopo.

La tipica richiesta di formabilità è solitamente di un rapporto di formabilità R/t con un range di valori $1 \div 2$ desunti rispetto ad uno 0,2 % di carico di snervamento per tensioni di carico pari o superiori ai 940 MPa .

Altro fattore determinante che ha privilegiato negli ultimi anni la scelta delle leghe Rame-Berillio per la realizzazione dei connettori a molla è stata certamente la buona conducibilità elettrica che esse presentano: questi contatti lavorando per lo più a basse correnti vengono spesso rivestiti comunque con materiali preziosi tramite processi di placcatura e di cromatura al fine di rendere la conducibilità elettrica stessa un elemento secondario nella scelta della lega. Nel caso di correnti elevate si è invece soliti ricorrere a rivestimenti polimerici: in ogni caso tuttavia è essenziale che tali materiali risultino essere resistenti all'ossidazione.

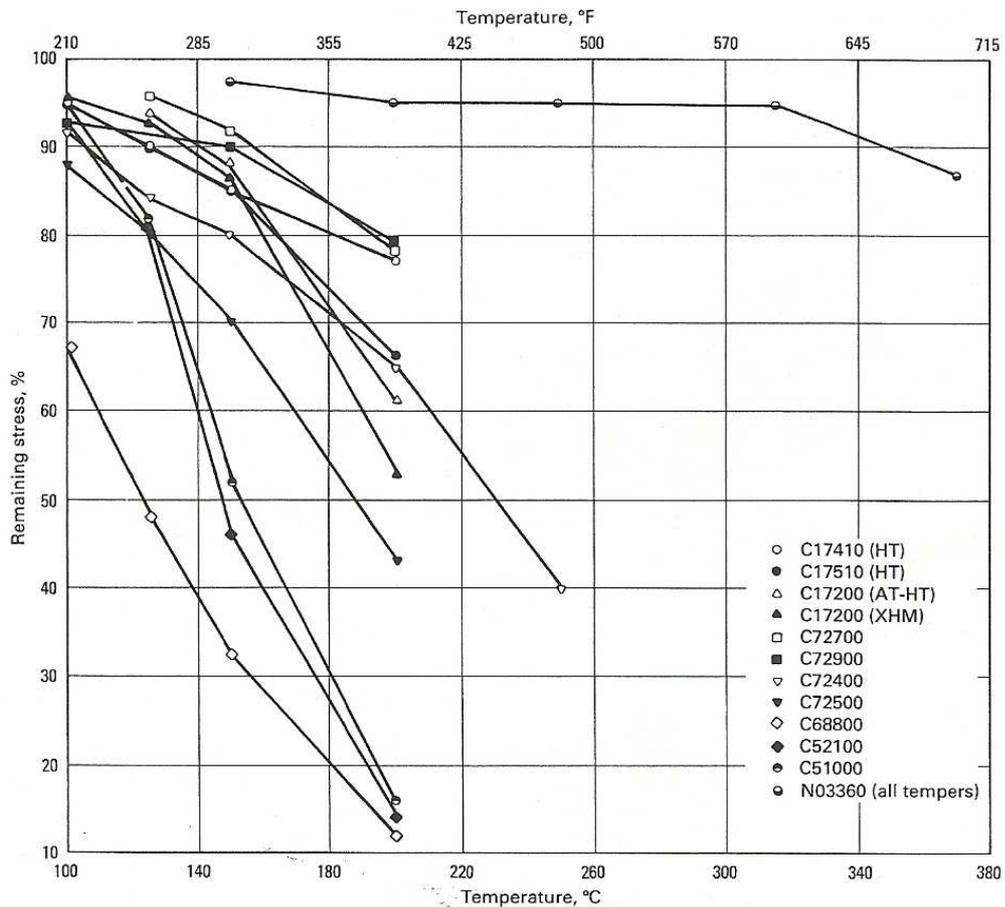
Nella maggior parte dei casi le leghe per i contatti elettronici vengono scelte in base alla loro resilienza e formabilità tra quelle leghe che presentino una conduttività elettrica non inferiore

ai 15 % IACS. Tale sigla è l'acronimo di un'unità di misura della conduttività elettrica per leghe e metalli, l'International Annealed Copper Standard: un valore di 100 % IACS corrisponde ad una conduttività elettrica pari a 5.80×10^7 S/m, valore di conduttività elettrica del Rame puro ricotto che viene usato come riferimento da tale unità di misura. Ciò non di meno esistono tutta una serie di eccezioni tra le diverse tipologie di connettori che esulano da tali linee guida, ossia connettori in cui non risultano essere peculiari fattori di scelta né la formabilità, né la resilienza, né addirittura la conduttività elettrica, ma per i quali si prendono in considerazione caratteristiche quali la lavorabilità isotropica e la resistenza al rilassamento da stress.

Soprattutto quest'ultimo fattore riveste una notevole importanza nel privilegiare la scelta delle leghe Rame-Berillio per la realizzazione dei connettori elettronici a molla: è necessario infatti che tali componenti assicurino una stabilità delle proprietà meccaniche per un ampio range di temperature, che, in particolare nei circuiti elettronici, a causa dell'effetto Joule dovuto alla resistività, comunque sempre presente anche nei buoni conduttori, può portare ad un incremento della temperatura anche di diversi gradi. Inoltre il connettore elettronico a molla deve saper mantenere le proprie caratteristiche meccaniche, in modo particolare la propria elasticità, per un periodo di tempo superiore alla vita utile attribuita al componente e perché ciò accada è necessario che il materiale adottato presenti, come è il caso delle leghe Rame-Berillio, una notevole resistenza al rilassamento da stress. Qualora così non fosse, ad un incremento delle temperature si verificherebbe il rilassamento o meglio il cedimento delle proprietà elastiche delle molle e di conseguenza un cambiamento permanente anche per sollecitazioni esterne di valore inferiore del limite di snervamento. Relativamente alla caratteristica di resistenza al rilassamento da stress risulta utile l'analisi del diagramma riportato in fig. 10.2, in cui ancora una volta le leghe Rame-Berillio rafforzate attraverso trattamento termico presentano un comportamento decisamente migliore rispetto a quelle rafforzate con l'ausilio di un trattamento meccanico. Ulteriori studi hanno inoltre permesso di evidenziare come il rilassamento aumenti leggermente con l'aumento dello sforzo iniziale a temperatura costante e diventi più pronunciato con l'aumento della temperatura. Così pure si è notato che le leghe Rame-Berillio ad alta conduttività, a causa della più alta temperatura di invecchiamento, sono, fatte le debite proporzioni, più resistenti al rilassamento da stress rispetto alle leghe ad alta resistenza (C17000 e C17200): comunque la resistenza allo snervamento delle leghe ad alta resistenza è generalmente più alta delle leghe ad alta conduttività permettendo perciò maggiori livelli iniziali di stress sulla forma del connettore.

Come evidenziato anche dal diagramma, la migliore performance rispetto alla caratteristica di resistenza al rilassamento da stress è propria delle leghe in Berillio-Nichel N03360, che presenta valori superiori sia alle leghe Rame-Berillio sia alle leghe che si caratterizzano per decomposizione spinodale. E' bene ricordare che la decomposizione spinodale è una tipologia di decomposizione possibile in alcune leghe di natura instabile indotta da variazioni periodiche di composizione che aumentano fino a dar luogo a due distinte soluzioni solide, di diversa composizione ma di identica struttura cristallina.

Fig. 10.2: Comportamento relativo al rilassamento da stress di alcune leghe selezionate per la costruzione di connettori elettrici in relazione ad un iniziale livello di stress indotto variante dal 50 % al 75 % dello 0,2 % del carico di snervamento a temperatura ambiente.



In linea di principio potendo affermare che l'incremento di temperatura in un fascio connettore di lunghezza l ed area trasversale A fissata è proporzionale al quadrato della corrente applicata ed inversamente proporzionale alla conduttività elettrica e termica del materiale,

appare comprensibile come le leghe Rame-Berillio ad alta conduttività, a causa del loro più basso contenuto di Berillio, manifesteranno un aumento di temperatura marcatamente più basso rispetto alle leghe Rame-Berillio ad alta resistenza.

Questa peculiarità delle leghe Rame-Berillio ad alta conduttività è assai importante basti pensare che un notevole incremento di temperatura può comportare:

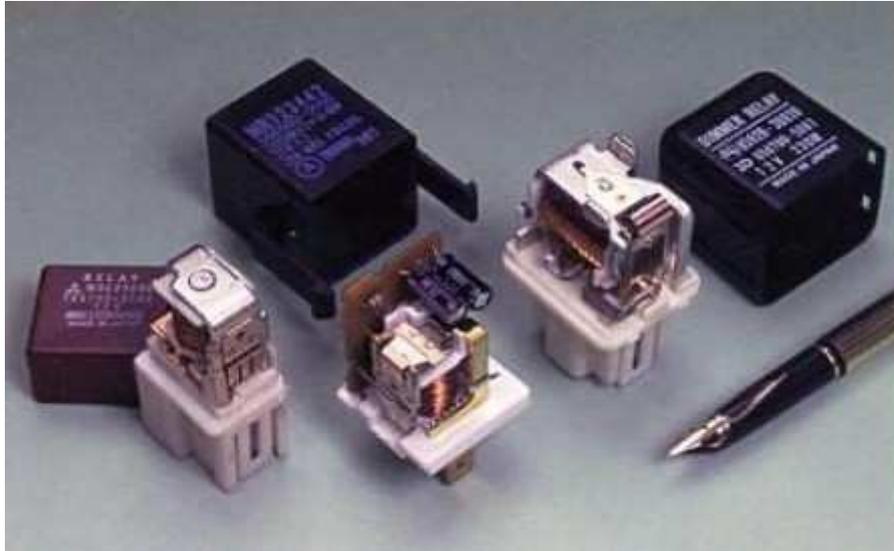
- un notevole aumento della perdita di forza elastica della molla attraverso un accelerato rilassamento da stress;
- un aumento della resistenza nella zona di contatto elettrico a causa della ossidazione indotta dal calore nell'interfaccia dei connettori;
- in alcuni casi può comportare addirittura la fusione dei contenitori in plastica dei connettori.

Proprio i contenitori che ad una non attenta analisi potrebbero sembrare delle semplici custodie giocano un ruolo di primo piano per garantire la funzionalità dei connettori elettronici a molla e dei relativi circuiti elettrici in cui essi sono inseriti. In primo luogo, questi connettori devono assolvere a due fondamentali funzioni:

- devono fungere da schermi contro le emissioni di onde elettromagnetiche che possono causare fenomeni di interferenza;
- devono preservare i contatti elettrici che custodiscono dalle infiltrazioni di polvere e particelle atmosferiche.

Per assolvere a questi compiti queste custodie devono venire attentamente sigillate ricorrendo all'uso di strisce in lega Rame-Berillio che verranno lavorate in modo tale da far loro acquisire una conformazione a molle digitoformi, come è possibile riscontrare nella fig. 10.3, e che garantiranno all'involucro di essere opportunamente serrato in maniera molto compatta.

Fig. 10.3: contenitori di componenti elettronici rivestiti con una striscia di Rame-Berillio in grado di attuare una chiusura ermetica ed una schermatura anti-interferenza rispetto alle onde elettromagnetiche.



Le leghe Rame-Berillio vengono solitamente scelte per la realizzazione di queste “strisce sigillanti” dal momento che la produzione di quest’ultime richiede allo stesso tempo un’alta resistenza alla frattura nella fase di piegatura, in grado anche di evitare la formazione di cricche, ed una elevata conduttività elettrica necessaria per scaricare a terra in modo efficace e pronto l’eventuale segnale di interferenza.

- **la produzione di molle meccaniche, di switch elettrici e controllori termostatici**

La produzione di questo tipo di componenti è solitamente attuata impiegando lamine in lega Rame-Berillio. La scelta di questo materiale anche in questo caso non è casuale dal momento che tale composto unisce in sé due caratteristiche fondamentali per la realizzazione di tali prodotti. Le leghe Rame-Berillio presentano infatti un’alta resistenza alla fatica ed allo stesso tempo un’elevata formabilità, che garantisce sia agli switch che ai relè un’elevata vita utile unitariamente ad una notevole loro miniaturizzazione. La fig.10.4 riporta il comportamento rispetto alla fatica di diverse tipologie di leghe Rame-Berillio rispetto a due differenti valori del rapporto di stress R , rapporto che confronta tra loro il minimo valore di stress ed il massimo valore di stress subito dal componente per ciclo: lo switch pur presentando quasi sempre un valore di $R = 0$, dovuto ad un valore di tensione massima molto maggiore rispetto al valore minimo, è in grado di sostenere comunque un numero molto elevato di cicli, manife-

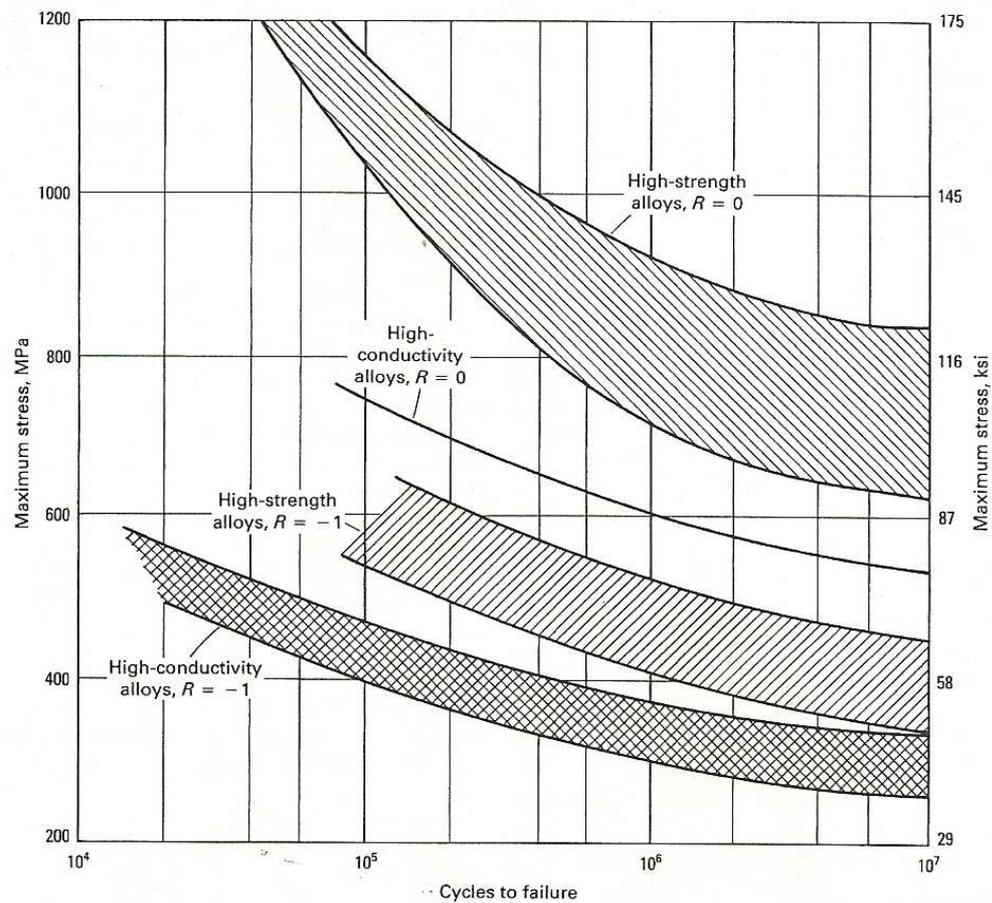
stando quindi un'ottima vita utile. Lo stesso si può dire per i relè prodotti in lega Rame-Berillio.

Differente è la scelta delle tipologie di leghe Rame-Berillio per la realizzazione di questi componenti elettronici:

- per gli switch: si è soliti privilegiare la scelta di leghe CuBe di tipo HT così da poter sfruttare la più alta resistenza possibile. In alternativa qualora si usino leghe CuBe mill-hardened, rafforzate tramite laminazione, è bene scegliere anche in questo caso la tempra a più alta resistenza optando quindi per le leghe SHM o XHMS (da TM05 fino a TM08);
- per i relè e i controllori termostatici: è invece ottimale preferire leghe Rame-Berillio ad alta conduttività come le C17510 e le C17410 dato che i livelli di corrente sono elevati e quindi la gestione della temperatura diviene un elemento cruciale.

Vi sono inoltre altri importanti dispositivi che sfruttano per le loro funzionalità l'elevata resilienza e la resistenza a fatica: ne sono un esempio i rilevatori sismici, quelli ultrasonici o comunque legati ad altra energia vibrazionale, per i quali è essenziale il ricorso a delle molle dotate di alta sensibilità rispetto anche a piccoli impulsi e che solitamente sono progettate per avere una rigidità molto elevata rispetto ai moti vibrazionali diversi da quelli della direzione di maggiore interesse.

Fig. 10.4: resistenza alla fatica di una striscia in lega Rame-Berillio nelle sue diverse qualità in funzione di due diversi valori del rapporto di stress R.



- **custodie per sensori di rilevazione di campi magnetici**

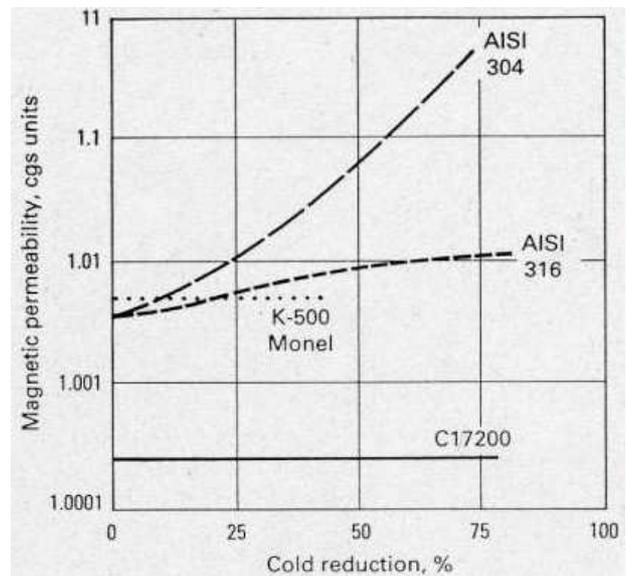
Soprattutto nel campo della rilevazione dei bacini petroliferi, così come per le strumentazioni biomediche o per la navigazione è ormai esteso l'utilizzo di magnetometri sensibili a campi magnetici fino a 10⁻⁴ Tesla ed anche di minore entità che per il loro impiego necessitano di custodie tubolari trasparenti a tali campi.

Per fare un esempio, diversi macchinari per la rilevazione dei pozzi petroliferi e dei giacimenti di gas hanno strumentazioni con custodie in lega Rame-Berillio che vengono spinte fino a profondità che vanno dai 300 m fino ai 6000 m al fine di determinare l'azimut e l'inclinazione idonea al foro di trivellazione per la escavazione e la estrazione. Le custodie tubolari per queste applicazioni possono essere:

- a parete sottile: ancorati con cavi d'acciaio che trasmettono i dati elettricamente;
- a parete spessa: in cui la strumentazione fa invece parte integrante del complesso di parti poste in fondo al pozzo vicino alla punta di perforazione.

Per tali funzioni servono infatti in ogni caso leghe con alta resistenza alla corrosione, in modo particolare resistenza alla formazione di cricche indotte dalla corrosione da cloruro e resistenza allo stiramento così da minimizzare la manutenzione associata a filettature stirate per il continuo disassemblamento dei pezzi. E' essenziale che il componente sia privo di punti soggetti a fenomeni di magnetismo: come indica la fig. 10.5 le leghe Rame-Berillio hanno una bassa suscettibilità iniziale che rimane stabile e non viene influenzata da effetti conseguenti a lavorazioni a freddo dovute a manutenzioni ricorrenti ed a robuste manipolazioni dei componenti che costituiscono tali strumentazioni.

Fig.10.5: influenza della lavorazione a freddo sulla permeabilità magnetica della lega Rame-Berillio C17200e su altri selezionati materiali.



- **avvolgimenti e bobine magnetiche**

Le leghe Rame-Berillio vengono impiegate anche per la realizzazione di magneti in grado di dar vita a campi magnetici molto estesi utili nelle indagini sugli effetti dei campi magnetici stessi, nello sviluppo di sistemi avanzati di generazione di energia elettrica, nelle analisi chimiche proprie della chimica analitica e nei sistemi medici di indagine e cura di determinate malattie.

La scelta di utilizzare questi tipo di leghe nasce dal fatto che, a differenza di quanto accade per un elettromagnete con nucleo di ferro, questi avvolgimenti aperti producono un campo magnetico molto esteso e non limitato da saturazione magnetica. Gli unici fattori di vincolo sono in questo caso riconducibili all'ampiezza della corrente elettrica che attraversa la bobina,

al calore che per effetto Joule viene a svilupparsi e alle tensioni indotte dai medesimi campi magnetici sulle spirali dello stesso avvolgimento che li produce.

Tra questi tre fattori il principale ed artefice della scelta delle leghe Rame-Berillio è la capacità di gestione del calore che viene assicurata attraverso raffreddamento criogenico: per questa applicazione è necessario infatti impiegare un materiale che sia in grado di mantenere una elevata conduttività elettrica e termica anche a temperatura criogenica.

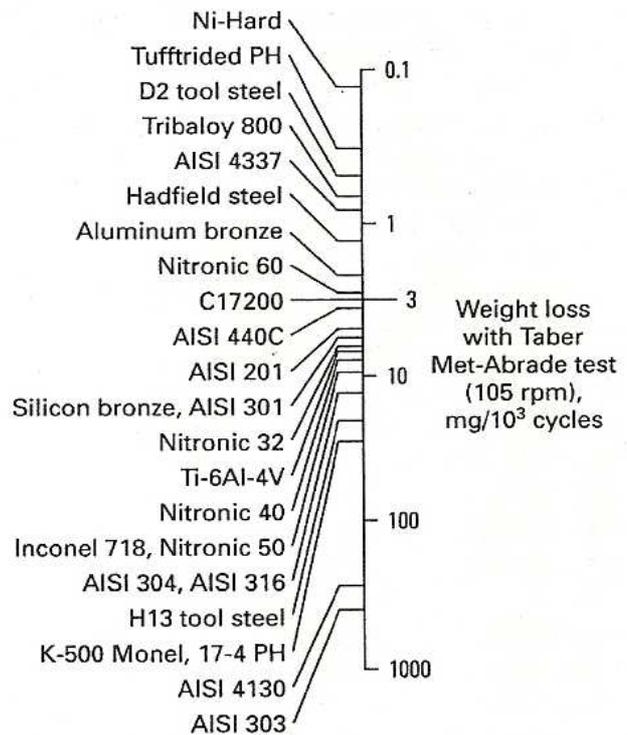
L'ipotesi di utilizzare per la realizzazione della bobina del Rame puro è da scartare, dal momento che questa soluzione non garantirebbe un buon funzionamento a causa del fenomeno di deformazione per scorrimento plastico, indotta dalle tensioni che insorgono nel dispositivo a causa del campo magnetico di elevata intensità.

Un'altra possibilità ben più praticabile prevede l'impiego di leghe Rame-Berillio del tipo C17510: tale tipologia di lega è adatta allo scopo quando i limiti di conduttività elettrica richiesta siano caratterizzati da un limite minimo di 60 % IACS con un massimo carico di snervamento di 725 MPa. Sebbene questa combinazione di valori sia ottimale per un alto numero di applicazioni, molti altri progetti richiedono un più alto livello di conduttività elettrica del materiale impiegato: allo scopo è possibile ricorrere ad una variante della medesima lega che presenta valori di conduttività elettrica pari a 70 % IACS ed un carico di snervamento di 510 MPa ed anche maggiori.

2) I diversi impieghi delle leghe Rame-Berillio nelle industrie meccanica e siderurgica

Per quanto concerne l'industria meccanica, l'impiego delle leghe Rame-Berillio è legata alla produzione dei cuscinetti, per i quali è necessario l'adozione di un materiale caratterizzato da un elevato rapporto tra il carico di snervamento ed il modulo elastico, fattore che permette al componente di poter sostenere un elevato carico radiale dalla parte collegata all'albero e di distribuire il medesimo carico in maniera elastica senza accusare alcuna deformazione permanente. Le leghe Rame-Berillio rispondendo perfettamente a queste richieste sono quindi una scelta ormai consolidata e che inoltre assicura una elevata resistenza al rilassamento unita ad una notevole resistenza all'usura.

Fig. 10.6: le caratteristiche di usura delle leghe Rame-Berillio comparate a quelle di altri materiali.



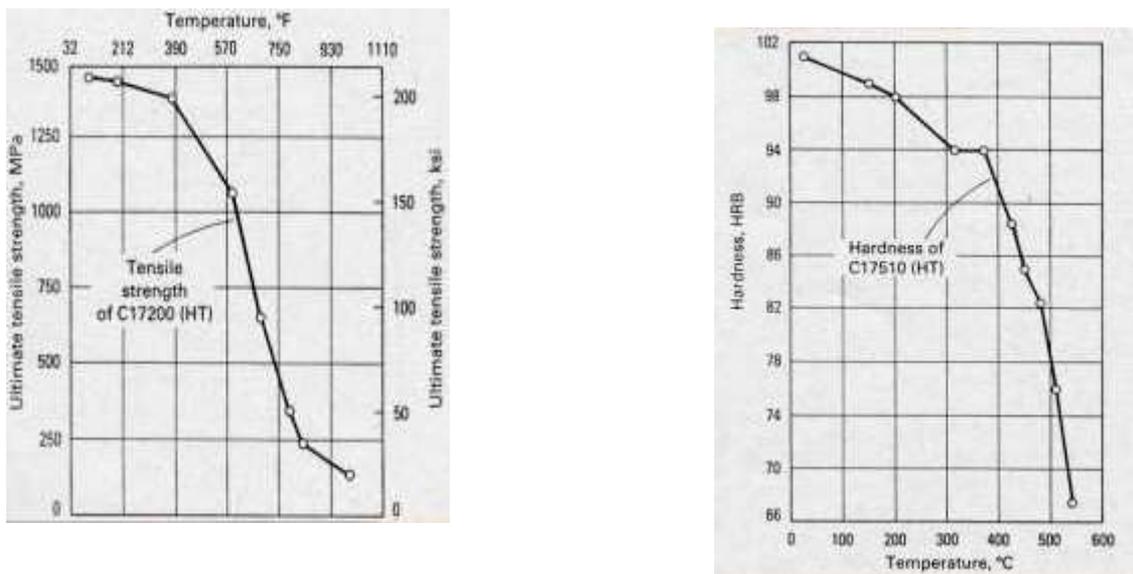
Se infatti analizziamo la fig. 10.6 che compara tra di loro le diverse leghe in relazione proprio alla resistenza all'usura, possiamo notare come le leghe Rame-Berillio non siano in realtà le migliori, ma come, associando a tale proprietà altri fattori quali la resistenza allo stiramento e la resilienza, tale materiale risulti in realtà il migliore candidato per la produzione di cuscinetti.

Nel caso invece dell'industria siderurgica il successo delle leghe Rame-Berillio è strettamente connesso alle loro caratteristiche di alta conduttività sia elettrica che termica che permettono loro di gestire ottimamente il calore sprigionato dall'effetto Joule ed innescato dal passaggio di corrente nelle strumentazioni che operino saldature per resistenza. Questa capacità di dissipazione del calore viene inoltre supportata dalla bassa resistività che presenta il materiale stesso e che quindi limita, a parità di intensità di corrente, l'incremento della temperatura che viene ulteriormente limitato grazie ad una efficace convezione ed ad un incisivo raffreddamento per irraggiamento.

Unitamente a queste caratteristiche le saldatrici a resistenza necessitano soprattutto nel campo della produzione massiva, in cui quindi l'apparecchiatura viene sollecitata fortemente e con continuità, che il materiale impiegato per tali strumenti sia dotato anche di una certa durezza in modo tale da non subire deformazioni anche a temperature alquanto elevate: in alcuni casi le operazioni di saldatura a resistenza prevedono la necessità di applicare una certa forza di pressione sulla parti in lamiera che devono essere unite. Solitamente si richiede che la tipologia di lega Rame-Berillio scelta presenti una durezza minima a temperatura ambiente di 95 HRB e che sia in grado di mantenere valori,

se non analoghi ad esso, molto prossimi anche per temperature che superino i 200 ° C. Nell'immagine sottostante sono riportati gli andamenti dei valori relativi alla resistenza ed alla durezza al variare della temperatura per due specifiche tipologie di leghe Rame-Berillio impiegate in tali applicazioni.

Fig.10.7: la durezza della lega C17510 (HT) ed il carico di rottura della lega C17200 (HT) ad elevate temperature.



3) L'importanza delle leghe Rame-Berillio nell'industria della plastica

L'utilizzo delle leghe Rame-Berillio nella realizzazione degli stampi per i processi di forgiatura, di trafilatura profonda ed in ultimo nell'industria della plastica è ormai divenuta una scelta consolidata nel tempo. Ciò è dovuto a molteplici fattori quali ad esempio la relativa facilità con cui tale materiale può essere lavorato per dar vita a stampi anche di forma complessa e che si caratterizzano per una buona vita utile derivante dall'ottima conduttività termica e da una buona resistenza all'usura. In particolare modo, la prima tra queste due qualità gioca un ruolo determinante nell'abbattimento dei costi di produzione nella realizzazione dei prodotti in plastica: uno stampo in grado di trasmettere in maniera ottimale il calore, così da determinare un raffreddamento del pezzo omogeneo ed uniforme, permette di evitare l'insorgenza di deformazioni del componente al momento dell'estrazione dell'oggetto. Tutto ciò migliora la qualità del prodotto stesso, garantisce una diminuzione degli scarti ed accorcia in maniera sostanziale la durata del ciclo di produzione rispetto a quanto è possibile ottenere con stampi in acciaio delle medesime dimensioni (data l'ottima lavorabilità delle leghe Rame-

Berillio in ogni stampo vengono riprodotte più cavità così da poter ottenere più pezzi prodotti per ciascuno stampo).

L'alto costo del materiale viene ulteriormente abbattuto dal fatto che i medesimi stampi, qualora presentino un livello di usura non più tollerabile e che vada ad inficiare la qualità di quanto stampato, possono venire “ riparati ” sia tramite un processo di addolcimento (softening) e successiva rilavorazione delle cavità, oppure, fondendo nuovamente lo stampo e ricolandolo.

Negli ultimi anni si sono via via sviluppati sempre migliori tecniche di stampaggio ad iniezione tali da controllare il flusso della resina plastica tramite una sempre più accurata gestione della temperatura dello stampo e degli inserti. Preferibilmente la tipologia di leghe Rame-Berillio adottata per la realizzazione degli stampi stessi è caduta sulle leghe C17200 e C17510, data la loro alta capacità di resistenza agli stress termici, necessaria per avere una lunga vita utile degli stampi, e l'ottima conduttività termica di cui godono. Tipicamente si è inoltre riscontrato come le leghe Rame-Berillio rafforzate meccanicamente con un range di durezza tra i 36 HRC ed i 42 HRC ed una conduttività termica simile a quella dell'Alluminio siano la migliore opzione per questi utilizzi. E' anche disponibile una versione lavorata di tale lega con una più alta conduttività termica, una durezza che varia tra i 90 HRB ed i 102 HRB e proprietà meccaniche equivalenti a quelle della lega C17510.

Per molti anni sono state utilizzate quasi esclusivamente le leghe di fonderia data la grande colabilità e la capacità di replicare accuratamente anche intricati dettagli del modello: ne è un esempio la lega C82200, anche se in realtà ognuna delle leghe colate ha trovato applicazione nel campo dello stampaggio delle materie plastiche.

4) Nell'industria petrolifera, nelle miniere, negli aeroporti e nelle industrie di esplosivi

Esiste ormai un campionario completo di “ strumenti di sicurezza ” che include martelli, cacciaviti, chiavi, pinze, scalpelli, lame per seghetti, coltelli, forbici, cesoie, picconi, pale ed altri ancora, realizzati in lega Rame-Berillio ed utilizzati in ambienti pericolosi quali miniere, aeroporti, arsenali militari ed industrie di materiali esplosivi od infiammabili. Il motivo alla base di ciò è correlabile a due particolari caratteristiche di cui gode il nostro materiale: la non produzione di scintille durante usi violenti ed il fatto che non si magnetizza ne ha favorito l'utilizzo in ambienti particolarmente pericolosi od in presenza di atmosfere contaminate, come ad esempio manutenzione di apparecchiature in ambienti contaminati da gas infiammabili.

Quasi sempre infatti le scintille prodotte dall'urto di un utensile contro un altro materiale sono dovute a minuscole particelle di ferro che sono sufficientemente riscaldate dall'energia dell'impatto tanto

da diventare incandescenti e bruciare, trasformandosi in ossido di ferro mentre aleggiano nell'aria. Particelle simili, se completamente formate da Rame-Berillio, non ossidano così velocemente e non producono di conseguenza scintille quando gli strumenti in lega vanno a colpire solidi molto duri. Tuttavia è possibile che le scintille possano comunque prodursi a seguito di un colpo di striscio dell'utensile in Rame-Berillio contro un oggetto in ferro: le manutenzioni che prevedano quindi di lavorare su componenti in ferro od in acciaio, seppur eseguite con strumenti in Rame-Berillio, non possono considerarsi dunque caratterizzate da una completa immunità al pericolo, anche se il rischio è di molto ridotto.

Fig. 10.8: il diverso comportamento magnetico delle leghe Rame-Berillio (a destra).



Fig. 10.9: il comportamento anti-scintilla delle leghe Rame-Berillio (a destra).



Fig. 10.10: utensili realizzati in lega Rame-Berillio.



E' necessario comunque ricordare che le leghe Rame-Berillio sono però molto sensibili all'Acetilene che, a contatto con il Rame, può reagire e formare un Acetilene esplosivo. In questo tipo di ambiente si dovrà avere cura di usare utensili con tenori di Rame minori del 50 % (tipo leghe Monel).

5) In particolari settori industriali in cui è necessaria una elevata resistenza alla corrosione

Molti settori industriali, dall'elettronica, all'estrazione degli idrocarburi, così come la trasmissione elettrica in ambiente marino ed altri ancora beneficiano della combinazione di proprietà di resistenza alla corrosione e delle caratteristiche meccaniche e fisiche delle leghe Rame-Berillio.

La resistenza alla corrosione diventa in molte applicazioni un fattore cruciale per motivare la scelta di tale materiale che non è di per sé economico, ma che, in virtù proprio di questa peculiarità, allungando la vita utile dei componenti che sono con esso realizzati, diviene la migliore opzione possibile. Sia le leghe a normale contenuto di Berillio che quelle a basso contenuto di Berillio presentano tale qualità con parametri standard pari a quelli riscontrabili nel Rame, risultando comunque molto più resistenti alla corrosione della maggior parte degli acciai e con comportamenti in tal senso simili a quelli espressi dai Bronzi al Fosforo.

Esistono anche qui molteplici fattori che influenzano la capacità di resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio: in primo luogo l'ambiente in cui la lega è costretta ad operare, così come la temperatura, la concentrazione di Berillio e la presenza o meno di impurità nel materiale stesso vanno ad influire sulle performance di resistenza. Altro importante ruolo in questo senso lo giocano anche i trattamenti eseguiti sulle superfici dei componenti: una striscia di C51000 o C72500 non protetta presenta una durata di inutilizzo non superiore ai 2 anni, mentre queste stesse tipologie se inibite superficialmente con Benzotriazolo allungano ben oltre tale limite questo indice.

La buona lavorabilità, la capacità di resistere anche a severe manipolazioni e trattamenti e le basse velocità di corrosione rispetto ai principali agenti corrosivi qualificano le leghe Rame-Berillio per vari utilizzi in ambiente marino: già gli studi condotti da Gough and Sopwith nei primi anni trenta dimostrarono come la resistenza alla corrosione per fatica di tali materiali fosse straordinariamente alta, superiore a quella di molti acciai inossidabili e quindi idonea ad esempio per la produzione delle custodie dei cavi sottomarini adibiti alle comunicazioni. Una custodia realizzata in C17200 presenta ad esempio una velocità di corrosione $v_{\text{corrosione}} = 0,025 \div 0,050 \text{ mm / anno}$ per una breve esposizione e con una corrente marina non elevata. Tale valore diminuisce ulteriormente al termine di una lunga esposizione agli agenti marini e ciò è dovuto a microrganismi che vanno a costituire un film protettivo sulle sue superfici.

Soluzioni acquose di sale non attaccano il Rame-Berillio in profondità, riuscendo tutt'al più a determinarne una certa scolorazione e l'assunzione di un colore verdastro. Sali invece come il Cloruro Fenico che idrolizzano in soluzione acquosa possono provocare un notevole livello di corrosione su tutte le leghe di Rame, comprese dunque anche le diverse tipologie di leghe Rame-Berillio. Diverso è il comportamento con le soluzioni acquose di idrossido di sodio rispetto alle quali manifestano una moderata resistenza, anche se va ricordato che mai tali leghe vanno esposte ad Idrossido di Ammonio od a vapori di Ammonio.

Il nostro materiale è invece immune a fenomeni di cracking in ambienti clorurici e solforici: in acido solforico mostra una corrosione generale piuttosto che localizzata (ad esempio a 150 ° C la velocità di corrosione è minore ai 0,50 mm / anno e la lega riesce pertanto a mantenere una integrità strutturale). Per attaccare le leghe Rame-Berillio e le altre leghe con alogeni come il Fluoro allo stato di gas è necessario che l'ambiente sia caratterizzato da una certa umidità. Il materiale presenterà fenomeni di cricatura per stress da corrosione solamente con la concomitante presenza di ammoniacca, alta umidità relativa ed ossigeno. Va inoltre ricordato che l'acido solforico risulta non eccessivamente dannoso a meno che non vi siano condizioni ossidanti: le medesime osservazioni si possono applica-

re agli acidi organici, l'azione dei quali è largamente accelerata e potenziata appunto dalla presenza di condizioni ossidanti nell'ambiente.

Non sussistono particolari problemi invece all'esposizione delle varie tipologie di leghe Rame-Berillio ai liquidi organici come i prodotti del petrolio, suoi derivati raffinati, ai solventi industriali ed anche rispetto ai mezzi di refrigerazione; questo insieme include anche i composti alogenati come il Tricloroetilene ed il Freon a patto che nell'ambiente non siano presenti acidi alogenidrici liberi. Di per sé comunque essendo la nostra lega suscettibile di attacco da parte dello Zolfo e dei suoi composti, in modo particolare da quelli allo stato gassoso come l'ossido di Zolfo e l'Idrogeno solforato, essa risente potenzialmente anche del contatto con lo stesso petrolio greggio e dei gas di scarico delle città, in special modo ad elevate temperature a causa dei composti dello Zolfo che di solito essi contengono.

Altamente sconsigliabile è poi esporre le leghe ricche di Rame, come appunto le leghe Rame-Berillio, al contatto con Acetilene puro, poiché c'è il rischio di formare Acetiluro di Rame che ha natura esplosiva.

Per quanto riguarda le materie plastiche il loro effetto sulle leghe Rame-Berillio varia in funzione della natura degli elementi volatili emessi. Nel processo di stampaggio dei polimeri, le resine non determinano né causano alcun attacco, mentre, poiché al momento della combustione il Cloruro di Polivinile ed il Silicone vulcanizzano a temperatura ambiente, possono produrre fumi che presentano un'elevata capacità corrosiva. Alcuni polimeri commerciali possono tuttavia contenere delle sostanze ignifughe così come dei composti organici bromurati in grado di attaccare le leghe Rame-Berillio al verificarsi di alcune specifiche condizioni.

In conclusione, è bene ricordare che in condizioni di ambiente ossidante, specialmente ad elevate temperature, il film ossido che viene a formarsi sulla superficie del materiale assume un comportamento protettivo e riesce a ritardare molto l'avanzamento dell'ossidazione stessa. Dato che comunque le temperature alle quali tale strato protettivo viene a formarsi sono molto prossime alle temperature di invecchiamento, l'utilizzo delle leghe Rame-Berillio solamente in virtù della loro capacità di resistenza all'ossidazione risulterebbe economicamente non vantaggioso.

Capitolo 11 Analisi dei più recenti studi sulle leghe Rame-Berillio.

Data la molteplicità di utilizzi che interessa le leghe Rame-Berillio ed i diversi settori industriali in cui il loro impiego risulta molto promettente, tale tipologia di materiale è stata negli ultimi anni al centro di notevoli studi e ricerche al fine di poterne capire al meglio le caratteristiche di comportamento ed in tal modo poter estendere ancor di più il loro uso.

Nel corso degli ultimi dieci anni sono stati condotti numerosi approfondimenti relativi alle principali proprietà meccaniche che hanno fatto di tali leghe un elemento cruciale di innovazione e di competitività: in quest'ottica si può dunque comprendere la selezione degli articoli scientifici a cui di seguito faremo riferimento per dare una visione d'insieme delle ancora numerose potenzialità di impiego proprie di tale materiale e delle prioritarie questioni ad esso inerenti e sulle quali si concentreranno gli sforzi dei ricercatori nei prossimi anni.

Quest'ultimo capitolo cercherà dunque di delineare i passi in avanti che sono stati compiuti in relazione a quattro delle peculiari caratteristiche delle leghe Rame-Berillio:

1. il comportamento nei confronti della **elettroerosione**, ormai divenuta una delle fondamentali tecniche di lavorazioni delle leghe Rame-Berillio nella produzione ad esempio di stampi finemente lavorati per l'injection molding e non solo.
2. il comportamento di tale materiale per quanto concerne il fenomeno della **corrosione**. Nei capitoli precedenti abbiamo già evidenziato come l'alta resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio le renda idonee a particolari applicazioni quali la trasmissione elettrica in ambiente marino o l'estrazione di idrocarburi. Più recentemente, proprio per questa qualità meccanica, tale materiale è stato impiegato nella realizzazione delle piastre bipolari che sono alla base del funzionamento delle celle a combustione all'idrogeno.
3. l'alta **resistenza alla frattura** che presentano le varie tipologie di lega Rame-Berillio mettendo in evidenza la correlazione esistente tra il trattamento di sovrainvecchiamento e tale caratteristica meccanica. La medesima proprietà è riscontrabile nelle giunzioni, ossia nelle saldature tra parti in lega Rame-Berillio, dimostrando, anche in questo secondo caso, come ai fini della resistenza a sollecitazioni esterne risulti determinante il trattamento termico subito dal materiale e la sua storia metallurgica.

4. Un altro importante insieme di studi è stato invece incentrato per comprendere quali siano le caratteristiche microstrutturali che permettano a tali leghe di manifestare una **buona resistenza alla fatica termica**.

11.1 Analisi della tecnica sperimentale di elettroerosione e lucidatura su lega Cu-Be H.S.

L'alta conduttività termica unita alla buona lavorabilità che caratterizza le leghe Rame-Berillio fa sì che esse siano utilizzate con ottimi risultati nella produzione di stampi per l'injection molding, lo stampaggio ad iniezione. Questo tipo di tecnica, ormai consolidatasi negli ultimi anni, essendo eseguita in ambiente umido e sommerso permette di minimizzare i rischi per la salute degli operatori connessi alla lavorazione di tale materiale, la cui inalazione sotto forma di microparticelle può compromettere le funzionalità respiratorie.

Il recente studio di J.C. Rebelo, A. Morão Dias ed altri ha cercato di definire **le condizioni per la ottimizzazione dei parametri EDM riuscendo a determinare una correlazione tra le principali variabili di questa tecnica**, tempo di scarica ed intensità della corrente di scarica stessa, con l'intento di migliorare il grado di precisione nella realizzazione di fini dettagli negli stampi pur preservando altre qualità meccaniche del materiale quali la scarsa suscettibilità alle cricature da cui deriva un incremento della vita utile delle forme e di efficienza e qualità dell'injection molding, rispetto ai risultati ottenibili utilizzando l'acciaio.

L'elettroerosione o EDM (Electro-discharge machining) è una innovativa metodologia di lavorazione che sfrutta il fenomeno secondario di asportazione di materiale conseguente alla scarica elettrica tra due componenti (lo strumento ed il pezzo da lavorare), immersi in un fluido dielettrico quando si venga a verificare tra le parti il superamento di un dato potenziale elettrico, il cosiddetto potenziale critico. Al superamento di tale soglia, il dielettrico in cui sono immersi, non è più in grado di assolvere alla propria funzione di isolante e permette alla elettricità di correre attraverso di esso, dando vita a quel che è stato denominato “canale del plasma”: un flusso di energia elettrica e materiale incandescente, circondato da una bolla di vapore, che cresce durante la scarica seppur in maniera limitata data la presenza del più denso liquido dielettrico. Tale contenimento permette al canale del plasma di non disperdere la propria energia in ingresso per concentrarla invece in uscita su una limitata porzione della superficie del materiale che si intende lavorare: il procedimento dà vita a dei piccoli crateri con forma e dimensione strettamente correlati alla energia di scarica, alle proprietà elettro-termiche dei materiali di cui sono costituiti gli elettrodi ed infine della qualità – modalità di conduzione termica stessa delle parti.

Comparando tra loro i risultati ottenuti tramite lavorazione di elettroerosione su campioni di acciaio e su campioni di leghe Rame-Berillio è stato possibile comprendere le particolari qualità meccaniche di cui gode questo materiale. I parametri di valutazione assunti sono stati il tasso di

rimozione del materiale MRR (material removal rate), il diametro dei crateri, la rugosità superficiale. Dalla loro analisi è stato possibile dedurre quanto segue:

- a. MRR (tasso o velocità di rimozione del materiale):

le leghe Rame –Berillio presentano MRR nettamente inferiori rispetto agli acciai che subiscono la medesima lavorazione anche se sottoposti alle stesse condizioni. Questo fatto è dovuto alla più alta conduttività termica del Cu-Be che permettendo una più facile dispersione del calore dalla zona colpita dalla scarica ne rende più difficoltosa la fusione e quindi la rimozione di materiale.

Il tasso di rimozione del materiale appare inoltre influenzato da un insieme di altri fattori, quali ad esempio la polarità adottata dall'elettrodo ed il tempo di scarica t_d .

Per quanto concerne la polarità, si è osservato che le lavorazioni eseguite grazie ad elettrodi a polarità positiva producono dei valori di MRR molto più alti rispetto a quelli ottenuti applicando una polarità negativa. Inoltre l'adozione della polarità positiva, unitamente ad una bassa energia di scarica, porta alla realizzazione di superfici pulite con lucentezza metallica, mentre nelle medesime condizioni energetiche l'uso della polarità negativa dà vita sulle superfici dei campioni a degli strati scuri di carbonio, causati da detriti che fungono da barriera protettiva ed ostacolano la rimozione del materiale. Tutto questo comporta che i valori di MRR delle leghe Rame-Berillio siano di circa dieci volte inferiori rispetto a quelli degli acciai.

Per quanto riguarda il tempo di scarica t_d è stato possibile determinare il tempo di scarica ottimale delle leghe Rame-Berillio sia per lavori di sgrossatura che di finitura:

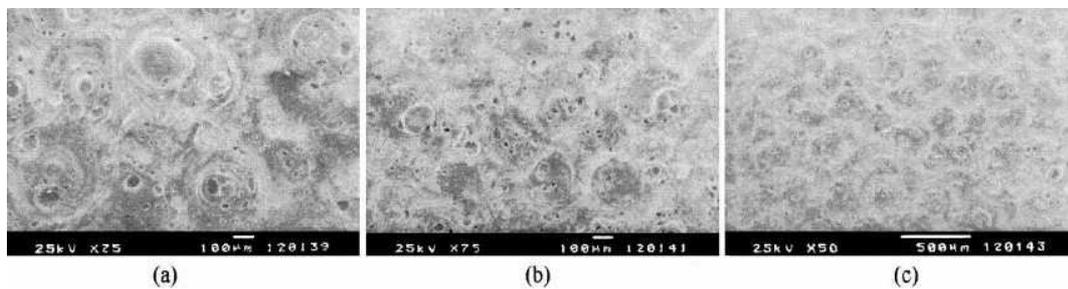
- per le operazioni di sgrossatura $t_{d\text{ ottimale}} = 50 \mu\text{s}$ per ogni intensità di corrente di scarica;
- per le operazioni di finitura $t_{d\text{ ottimale}} = 12,8 \mu\text{s}$ per ogni intensità di corrente di scarica.

Nel caso di tempi di scarica minori la riduzione del tasso di rimozione del materiale è riconducibile alla minima energia scaricata ed a possibili instabilità di processo. Nel caso invece di tempi di scarica superiori al valore ottimale, i valori inferiori assunti dall'MRR vengono ancora una volta causati dall'alta conduttività termica del materiale in questione che si traduce in una risolidificazione di parte del materiale fuso per la scarica e di cui si ha traccia nella parte più profonda del cratere.

b. Il diametro del cratere:

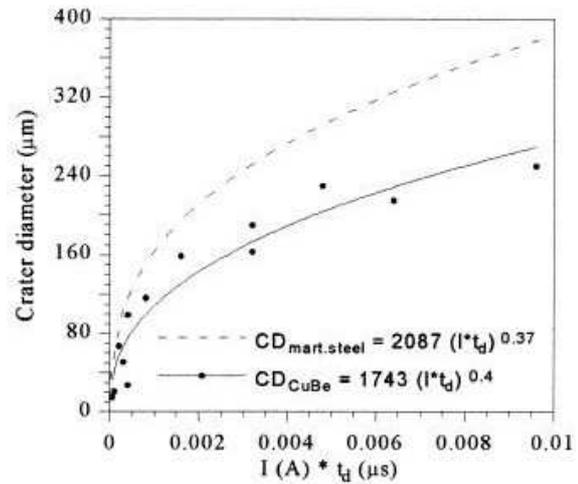
Il primo dato importante che si deduce esaminando tale parametro è l'**esistenza di una correlazione di diretta proporzionalità tra il diametro dei crateri ed il prodotto $I (A) * t_d (\mu s)$** : a riprova di ciò basti osservare la fig.11.1.1 in cui sono riportate le micrografie a scansione elettronica di un medesimo campione in lega Rame-Berillio per differenti valori del prodotto $I (A) * t_d (\mu s)$.

Fig. 11.1.1.: micrografie di superficie di un campione di lega CuBe elettroerosa per differenti valori del prodotto $I (A) * t_d (\mu s)$: a) 48 A * 200 μs ; b) 32 A * 200 μs ; c) 16 A * 200 μs .



Comparando tra loro i crateri ottenuti per elettroerosione su una lega Rame-Berillio rispetto a quelli che si originano con la medesima lavorazione sulla superficie di un acciaio martensitico sfruttando lo stesso prodotto $I (A) * t_d (\mu s) = 16 A * 200 \mu s$ si evidenzia una netta differenza di dimensioni. Anche in questo caso la ragione è da ricondursi alla più alta conduttività termica di cui sono dotate la leghe Rame-Berillio: una maggiore capacità di dispersione termica del calore fa sì che in quest'ultime il diametro dei crateri sia di molto inferiore in quanto non è dato modo alla energia di scarica di rimanere concentrata nella piccola porzione di spazio colpita. La discrepanza di valori risulta ancora più accentuata considerando tempi di scarica maggiori per i quali è già possibile il verificarsi della risolidificazione nel Rame quando invece il Ferro presente nell'acciaio martensitico è ancora allo stato liquido. Per un intervallo di temperature tra i 20 °C ed i 400 °C infatti il coefficiente di conduzione termica delle leghe Rame-Berillio è pari a 100 ÷ 200 W / m °C, mentre negli acciai martensitici essa varia dai 20 ÷ 30 W / m °C determinando di conseguenza una differente rugosità superficiale anche per condizioni di scarica analoghe.

Fig. 11.1.2.: Variazione di valore del diametro del cratere su una lega CuBe ed un acciaio martensitico per differenti valori del prodotto I (A) * t_d (μ s).

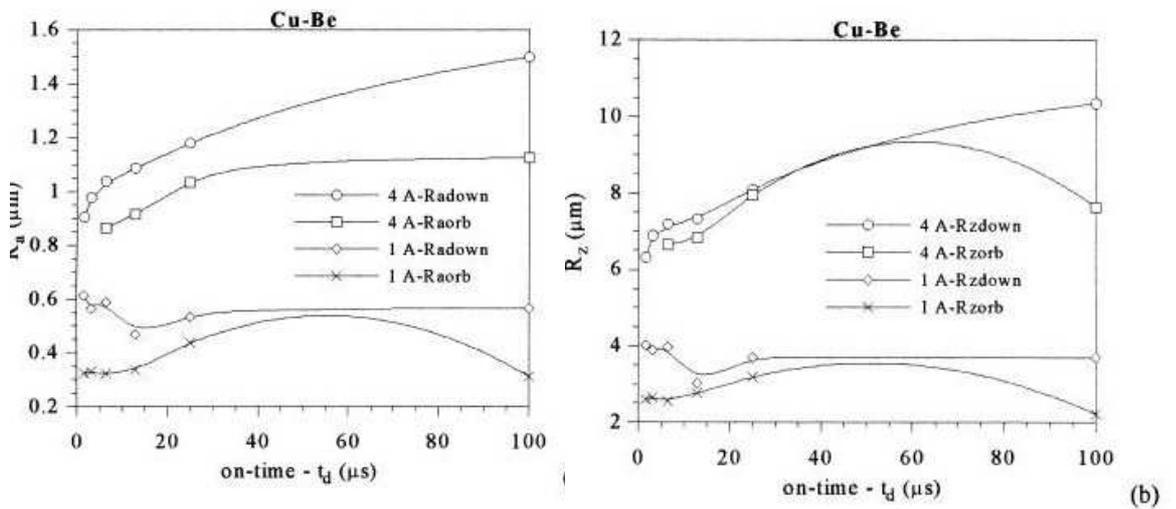


c. La rugosità superficiale:

Anche tale parametro, come il tasso di rimozione del materiale, risente in maniera determinante della polarità utilizzata nella esecuzione della elettroerosione, tanto che per la sua valutazione è necessario l'utilizzo di due diversi indici: R_a nel caso di impiego di polarità positiva ed R_z qualora si faccia riferimento a polarità negativa. **Adottando elettrodi a polarità positiva i valori di rugosità superficiale aumentano al crescere del tempo di scarica**, risultando comunque circa due volte più piccoli se comparati ai valori ottenuti con gli acciai, mentre con l'utilizzo della polarità negativa la rugosità superficiale non cresce stabilmente con il tempo di scarica. Tale anomalia può essere dovuta alla presenza di detriti dovuti alla lavorazione che, aderendo alla superficie, danno origine ad una sorta di strato protettivo che va ad ostacolare la rimozione del materiale procurando quindi una minore rugosità alla superficie stessa.

La pratica industriale ha inoltre messo in evidenza come in molti casi i difetti di ondulazione presenti su componenti già sottoposti ad elettroerosione siano riconducibili alla presenza di difetti nell'elettrodo stesso con cui si effettua la scarica od anche alla presenza di crateri da usura sulla superficie da lavorare. Da questa esperienza se ne è saputa trarre un'opportuna soluzione: l'utilizzo durante la lavorazione di elettroerosione del movimento orbitale e planetario dell'elettrodo. I dati riportati nelle figure 11.1.3 (a) e 11.1.3 (b) evidenziano come tale soluzione si sia rilevata assai valida. **I valori degli indici di rugosità R_a ed R_z risultano assai minori quando viene sfruttato il movimento orbitale dell'elettrodo.**

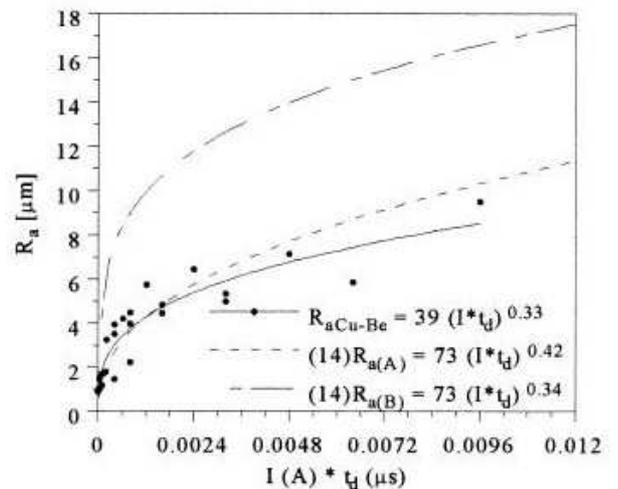
Fig.11.1.3.: valori degli indici di rugosità superficiale R_a ed R_z ottenuti spendendo la stessa energia con e senza il movimento orbitale degli elettrodi.



L'analisi dei dati raccolti ha inoltre permesso di definire la relazione che lega tra loro l'indice di rugosità superficiale R_a ed il prodotto di scarica $I (A) * t_d (\mu s)$.

$$I (A) * t_d (\mu s) = R_a = 39 * (I * t_d)^{0,33}$$

Fig.11.1.4.: comparazione dei valori di rugosità superficiale, R_a , delle leghe CuBe e degli acciai martensitici



Altro fenomeno molto interessante è la dipendenza della formazione dello strato protettivo, a seguito di elettroerosione con polarità negativa, dalla forma d'onda dell'impulso di scarica: ricorrendo ad un impulso di scarica con forma d'onda rilassata liberata da un circuito RC, lo strato di carbonio che ostacola la rimozione del materiale tende a non formarsi. Se ne conclude che adottando una polarità negativa in una lavorazione di finitura tramite elettroerosione si otterranno migliori risultati solamente ricorrendo al movimento orbitale dell'elettrodo e alla connessione con un circuito elettrico di tipo RC.

In conclusione quindi si può ritenere che la più alta conduttività termica delle leghe Rame-Berillio, pur determinando un maggior dispendio di tempo per la loro lavorazione, permette di ottenere una elevata qualità in termini di rugosità superficiale, una minore suscettibilità alle criccate e valori di WLT nettamente inferiori a quelli che si avrebbero con l'acciaio. Tutti questi fattori sono alla base della lunga vita utile che caratterizza gli stampi per injection molding prodotti con le leghe Rame-Berillio.

11.2. Analisi dei più recenti studi sul comportamento a corrosione.

Un secondo gruppo di importanti studi sulle leghe Rame –Berillio si è negli ultimi anni concentrata sulla comprensione del buon comportamento di tali materiali rispetto al fenomeno della corrosione.

Le tre ricerche cui ora si farà riferimento hanno saputo chiarire quali siano le cause fisiche e microstrutturali alla base di tale proprietà risultata determinante nella scelta di tale materiale per la realizzazione della piastra bipolare, elemento cardine del funzionamento della cella a combustione ad idrogeno.

a) Meccanismi di ossidazione delle leghe Rame-Berillio in ambiente alcalino

L'ottima conduttività termica, unita ad una buona resistenza sia alla fatica che alla corrosione hanno reso le leghe Cu-Be un materiale altamente idoneo a svariate produzioni in campo sia elettrico che elettronico, come ad esempio la realizzazione di microrelay e switch. Nella produzione di questi due componenti elettronici è proprio l'ossidazione degli elettrodi in Rame-Berillio a svolgere un ruolo fondamentale, data la capacità di suscitare una forte adesione tra la parte elettrica ed il substrato polimerico, altra componente principale di tali dispositivi. Lo studio di H. Kuroki e H.

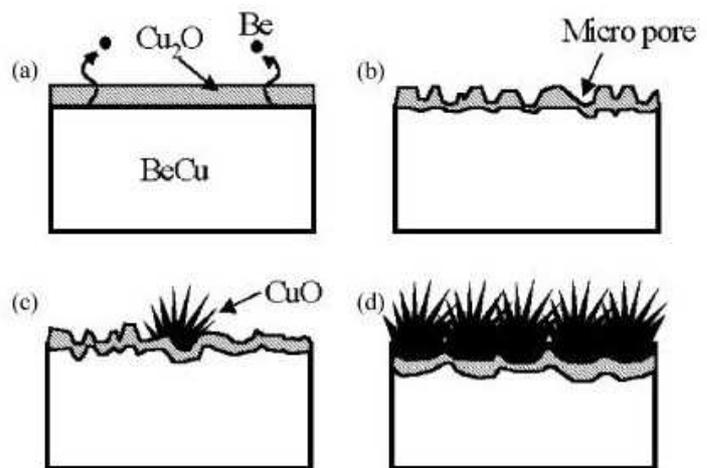
Kawarai ha permesso di comprendere il ruolo fondamentale del Berillio nel meccanismo di ossidazione di tali leghe grazie all'analisi degli strati ossidati usando come strumenti di indagine il microscopio a scansione elettronica, SEM, e la diffrazione ai raggi X.

L'analisi è stata condotta su lamine in Rame-Berillio, dapprima pulite con acetone ed acido solforico così da rimuoverne l'originario strato di ossido, ed infine immerse con differenti tempi di immersione in una soluzione alcalina alla temperatura di 90 °C in modo tale da poter valutare l'insorgenza e l'evoluzione della nuova ossidazione superficiale che viene ad interessare le lamine.

Supportando le immagini ricavabili grazie al microscopio a scansione elettronica con i dati raccolti grazie alla spettrometria a massa ionica secondaria, si è potuto osservare che:

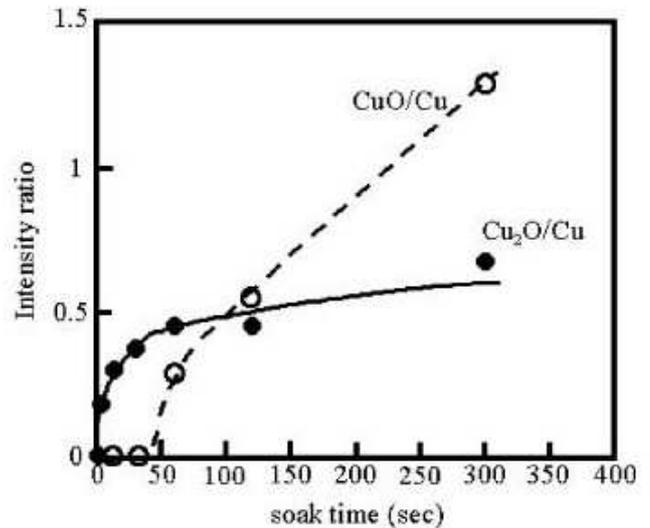
- dopo 10 s già appaiono sulla superficie delle sottili particelle di ossido rameoso, Cu_2O , del diametro di 0,1 μm e che andranno man mano ad accrescersi sia in numero che in larghezza, mentre gli atomi di Berillio appaiono già fuggiti completamente dalla superficie.
- dopo 30 s sono osservabili delle microporosità del diametro di 1 μm nello strato di ossido rameoso derivanti dalla dissoluzione dello stesso ossido rameoso nella soluzione alcalina.
- sulle lamine bagnate per almeno 60 s si può osservare l'originarsi di strutture aghi-formi all'interno delle microporosità e costituite da ossido rameico, CuO .
- per bagni con durate superiori ai 120 s la superficie dei campioni appare completamente ricoperta da aghi di ossido rameico.

Fig.11.2.a.1: il meccanismo di ossidazione della superficie di CuBe in una soluzione alcalina: a) 1- 10 s; b) 30 s; c) 60 s; d) 120 s di immersione.



Il diagramma riportato in fig.11.1.2.a..2, rappresentante l'andamento dei rapporti di intensità CuO/Cu e $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}$, evidenzia l'avvicendamento tra ossido rameoso ed ossido rameico che si verifica sulla superficie delle lamine ossidate. Per le lamine immerse in soluzione alcalina per tempi inferiori ai 40 s il livello di ossido rameico presente è minimo, mentre appare via via sempre più elevato con la progressiva crescita delle strutture cristallografiche aghi-formi. L'ossido rameoso, Cu_2O , appare già sulla superficie delle lamine dopo appena 1s ed il suo rapporto di intensità rispetto al rame della matrice arriva ad una certa stabilizzazione dopo 60 s, il che sta ad indicare che **man mano che l'ossidazione procede, il rame della matrice che andrà a legarsi all'ossigeno darà vita principalmente ad ossido rameico.**

Fig.11.2.a.2: cambiamenti dei rapporti di intensità CuO/Cu e Cu₂O/Cu al variare del tempo di immersione



Per quanto concerne la presenza di altri elementi chimici, mentre si può legittimamente supporre che il sodio, Na, che viene a trovarsi nello strato di ossido neoformatosi, sia in realtà non un elemento costitutivo della reazione, bensì un componente della soluzione alcalina che è rimasto intrappolato nella struttura ossida, ben diverso appare il comportamento del **Berillio**. **Tale elemento essendo molto più attivo degli atomi di Rame tende a fuggire dalla superficie del campione, riuscendo a dissolversi molto più facilmente.**

b) Analisi sulla resistenza alla corrosione delle leghe Cu-Be in ambiente acido.

La ricerca cui qui si farà riferimento, “ il comportamento di resistenza alla corrosione delle leghe Cu-Al e Cu-Al-Be a memoria di forma in 0,5 M H₂SO₄”, si è posta come obiettivo quello di spiegare il comportamento a freddo di tali leghe sottoposte ad ambienti corrosivi di natura acida, riuscendo a definire il ruolo determinante ricoperto in tale ambito dal Berillio: la sua capacità, in funzione della concentrazione con cui esso è presente in lega, di modificare le caratteristiche microstrutturali e le relative proprietà meccaniche delle SMA. Si è scoperto che **l’alta resistenza alla corrosione di tali leghe è strettamente legata alla capacità del Berillio di diffondere all’interno dei bordigrano grazie alla presenza di lacune o vacanze, determinando una sostanziale disattivazione di tali zone e la conseguente resistenza alla corrosione intergranulare propria delle leghe a base di Rame-Alluminio** a memoria di forma.

I test sulla resistenza alla corrosione sono stati condotti su un insieme di campioni della lega CuAlBe aventi ciascuno una differente composizione. Determinata per ciascuno di essi la temperatura di trasformazione martensitica, il materiale è stato sottoposto ad analisi diffrattometrica ai raggi X usando

una irradiazione con $\text{CuK } \alpha$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) in modo tale da capire quali fossero le differenti microstrutture per le diverse tipologie di leghe.

Campione	Classificazione	M_s	M_f	Microstruttura
Cu-10.0wt%Al	100000	535	–	Martensite
Cu-10.0wt%Al-0.55wt%Be	100055	85	58	Martensite
Cu-10.0wt%Al-0.8wt%Be	100080	– 104	–	Fase madre
Cu-10.0wt%Al-1.0wt%Be	100100	– 358	–	Fase madre
Cu-11.4wt%Al-0.47wt%Be	114047	47	24	Martensite
Cu-12.0wt%Al-0.47wt%Be	120047	– 8	–	Fase madre

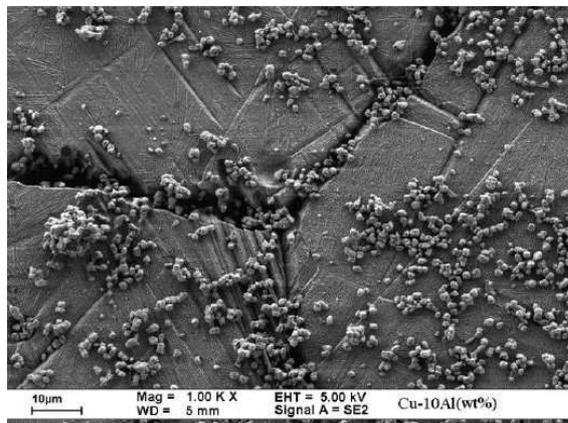
La determinazione della resistenza alla corrosione è stata ottenuta costituendo una cella elettrochimica a tre elettrodi: ciascuna lamina è stata immersa in una soluzione di 0,5 M H_2SO_4 (300 ml) alla temperatura di $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e si è potuto conoscere la loro relativa curva di polarizzazione.

Come ultima analisi, le microstrutture dei campioni sono state esaminate con l'ausilio di un microscopio ad emissione di campo a scansione elettronica.

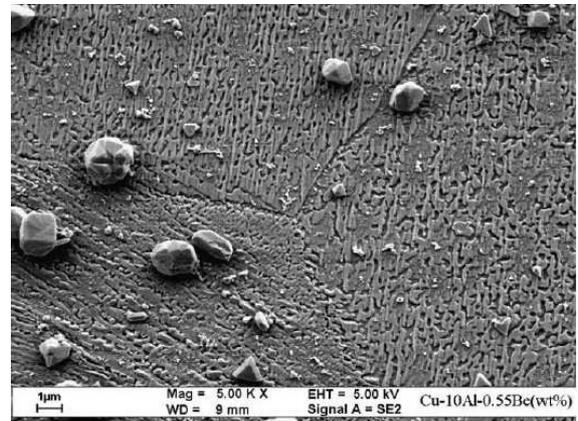
Si è compreso che ad influenzare il dinamismo elettrochimico di un materiale gioca un ruolo importante la natura degli elementi che lo costituiscono: recenti studi hanno dimostrato che la presenza anche di una piccola concentrazione di Nichel o di Alluminio in una lega a base di Rame, impedendo la reazione di dissoluzione-ossidazione, è causa della scarsa reattività del materiale. Allo stesso modo il Berillio è il fattore principale della scarsa reattività delle leghe Cu-Be e di conseguenza della loro buona resistenza anche in ambienti chimicamente ostili.

La stessa osservazione delle diverse micrografie rappresentate dalle figure 11.2.b.1 e 11.2.b.2 dimostra come la resistenza alla corrosione risulti influenzata anche a livello microstrutturale dal livello di presenza del Berillio in lega. Comparando tra loro le prime due micrografie, relative ai campioni 100000 e 100055, si può notare agevolmente come la corrosione intergranulare ben evidente nel primo campione, sia già di molto diminuita nel secondo grazie ad una minima presenza di Berillio, pur non avendo ciò causato una alterazione della fase microstrutturale, in entrambi i casi costituita da martensite.

Fig. 11.2.b.1: morfologia superficiale di: a) del campione 100000 con una struttura scavata; b) del campione 100055 dopo test di impedenza a corrente alternata a 0,6 V.



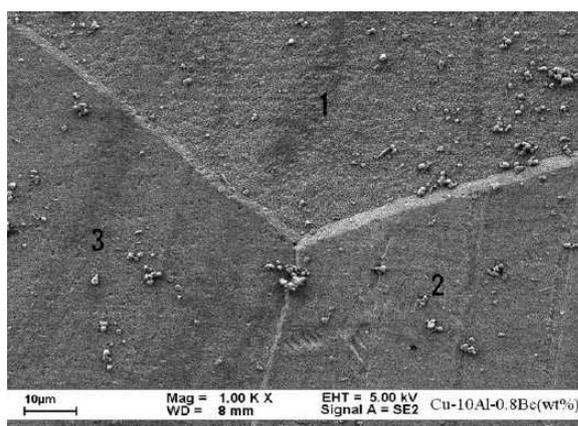
(a)



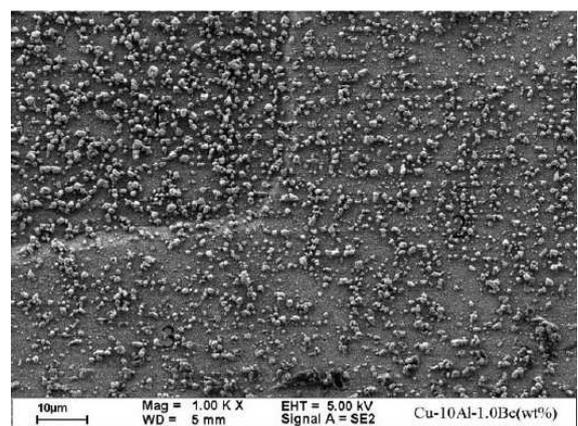
(b)

Aumentando ancora la presenza di Berillio nelle leghe in esame, l'effetto di attenuazione della reattività elettrochimica è risultato ancora più marcato: se nel campione 100080 è ancora possibile delineare un'avvenuta corrosione intragranulare, nel secondo campione, 100100, tale fenomeno è del tutto scomparso, tanto da risultare assai difficile l'analisi degli stessi bordigrano.

Fig. 11.2.b.2: micrografie-FESEM che mostrano i bordigrano dei campioni: a) 100080 e b) 100100 rilevate grazie ad eccitazione intragranulare più che da eccitazione dei bordigrano dopo test di impedenza di corrente alternata a 0,6 V



(a)



(b)

La radice di questa capacità di disattivazione delle leghe a base di Rame da parte del Berillio è stata ora motivata a livello microstrutturale: gli studi condotti da Miki ed altri hanno infatti dimostrato che nelle leghe CuBe, a seguito di un trattamento termico di ricottura o invecchiamento, gli atomi di Be-

berillio sono in grado di diffondere all'interno dei bordi grano grazie al meccanismo delle lacune o vacanze, comportandone di conseguenza la disattivazione e divenendo perciò elemento di resistenza alla corrosione intergranulare nelle leghe a base di Rame-Alluminio a memoria di forma.

c) La cella di combustione all'idrogeno e la resistenza alla corrosione delle leghe CuBe

Le leghe Rame-Berillio sono oggi considerate un elemento indispensabile nella costruzione della cella di combustione ad idrogeno, sistema elettrochimico in grado di convertire l'energia di un combustibile, l'idrogeno, e di un comburente, l'ossigeno, in energia elettrica tramite una reazione di ossido-riduzione. Alla base del suo corretto funzionamento, svolge un ruolo fondamentale proprio la capacità di resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio, materiale con il quale si costruiscono le piastre bipolari, elemento centrale nell'interscambio elettronico tra ossigeno ed idrogeno e di cui si ha una rappresentazione nell'immagine qui sotto riportata.

Fig.11.2.c.1: diagramma schematico della piastra bipolare di una cella a combustione ad idrogeno.

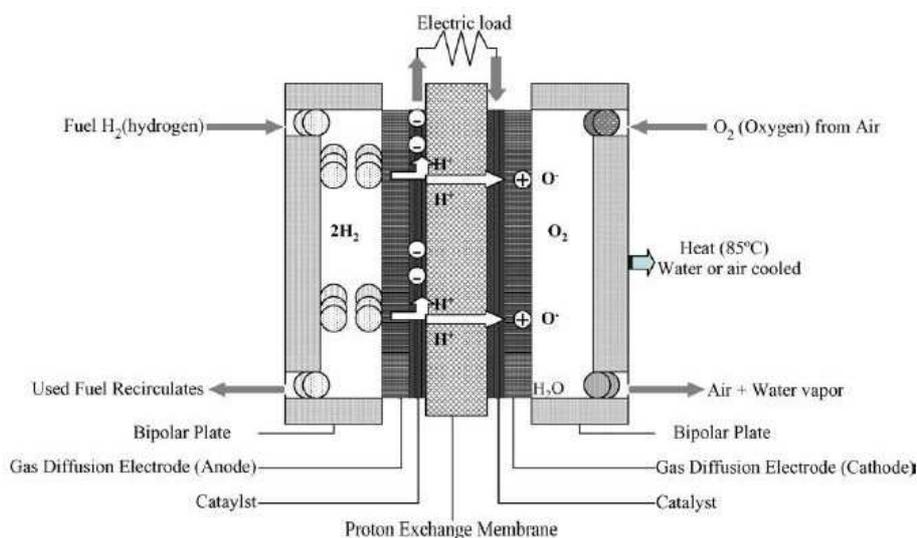


Fig. 1. Schematic diagram of the PEM fuel cell.

Compito della piastra bipolare è quello di offrire dei canali preferenziali per il convogliamento del flusso di idrogeno e di ossigeno alla membrana di interscambio elettronico: operando in ambiente acido ($pH = 3,0 \div 5,0$) data la presenza di ioni quali SO_4^{4-} , Cl^- , F^- ed altri nella membrana Na-

flon, è stato necessario negli anni testare diversi materiali in grado di saper operare in tali condizioni in maniera duratura. La grafite, così come alcuni materiali stampati si sono però dimostrati non adatti allo scopo, proprio per la loro non ottimale capacità di resistere alla corrosione.

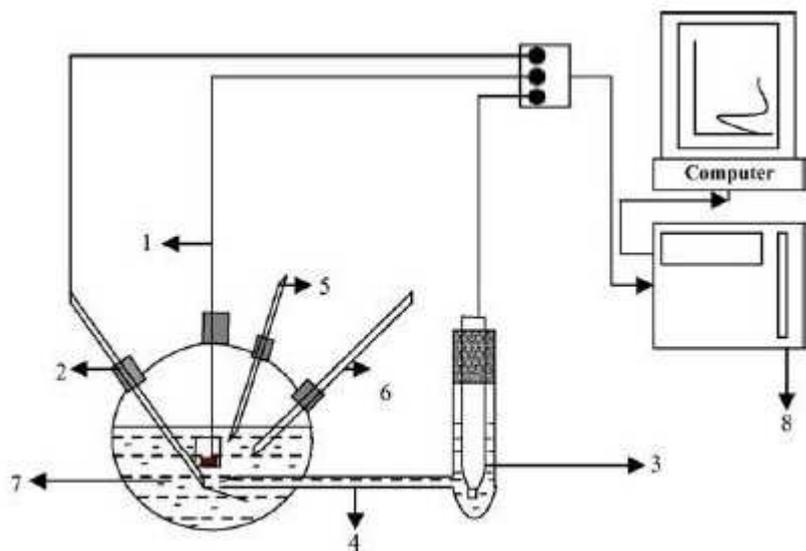
Gli studi sulla corrodibilità delle leghe Rame-Berillio di V.V. Nikam e R.G. Reddy ed altri, rappresentano, rispetto ai precedenti, un netto salto in avanti nella conoscenza di tale fenomeno. Attraverso l'ausilio di una cella elettrochimica in grado di ricreare le condizioni di lavoro in cui è costretta ad operare la piastra bipolare, si sono potute conoscere quali siano le relazioni che intercorrono tra la resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio e quattro variabili che gli studi precedenti non avevano considerato. Ciò ha permesso di capire se la caratteristica meccanica in esame sia stabile al mutare delle condizioni o sia invece ottimale solamente in date circostanze.

Le quattro variabili introdotte sono:

1. la natura dell'atmosfera : ossidante (aria) o non ossidante (argon)
2. il pH, valutando I_{cor} in funzione di pH pari a 3,26; 4,08; 5,17
3. la temperatura per valori pari a 25 °C, 50 °C, 60 °C e 70 °C
4. la diversa natura dell'elettrolita: 0,5 M H_2SO_4 e 5 % (v/v) HCl + 5 % (v/v) Na_2SO_4

Fig.11.2.c.2 : cella elettrochimica:

- 1) elettrodo di lavoro;
- 2) elettrodo contatore;
- 3) elettrodo saturato calomel;
- 4) luggin capillare;
- 5) tubo per il gas gorgogliante;
- 6) termometro;
- 7) soluzione di 0,5 M di H_2SO_4 ;
- 8) potenziostato.



La realizzazione delle due diverse condizioni dell'atmosfera in cui operare ha comportato l'utilizzo di due differenti gas per il gorgogliamento: con una situazione ossidante si è preferito adottare l'aria, mentre con una atmosfera non ossidante la scelta per il gas da usare per il gorgogliamento è ricaduta sull'argon.

I test a carattere elettrochimico:

I test condotti hanno permesso di determinare quanto segue:

- **La natura dell'ambiente, ossidante o non ossidante, non influenza la resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio:** comparando tra di loro i diagrammi dei test condotti in ambiente ossidante e non ossidante, è possibile notare come le curve presentino andamenti piuttosto simili. Si è inoltre osservato che sia con atmosfera ossidante che non ossidante la corrente di corrosione I_{cor} cresce al crescere del pH.

- **Esiste una correlazione di proporzionalità diretta tra la temperatura e la suscettibilità alla corrosione delle leghe Rame-Berillio:** al crescere della temperatura, crescerà proporzionalmente la corrente di corrosione I_{cor} che attraverserà il campione. Di particolare interesse risultano essere i dati ottenuti dai test condotti alle temperature di 60 °C e 70 °C:
 - a 60 °C le curve del potenziale di corrosione assumono un andamento del tutto diverso in relazione al valore del pH: $I_{cor}(\text{pH} = 4,08) > I_{cor}(\text{pH} = 5,17)$. Tale anomalia è stata motivata dalla presenza di un diverso tipo di microstruttura che viene ad originarsi nello strato di corrosione (vedi risultati delle analisi condotte col microscopio a scansione elettronica).
 - a 70 °C la corrente di corrosione viene sostanzialmente annullata, per cui si può ritenere che a tali condizioni il materiale esprima in toto la sua ottima capacità di resistenza alla corrosione.

- **La natura dell'elettrolita influenza in maniera determinante la capacità di resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio:** conducendo gli esperimenti utilizzando una diversa soluzione elettrolitica, 5 % (v/v) HCl + 5 % (v/v) Na₂SO₄, in grado di produrre un'azione corrosiva più simile a quella dell'ambiente in cui opera la cella a combustione, si ricavano delle curve con un'evoluzione del tutto diversa rispetto a quelle ottenute impiegando come elettrolita 0,5 M di H₂SO₄ (non tragga in inganno il fatto che il diagramma di fig. 11.2.c.4 presenti l'ascissa su scala logaritmica).

Le curve, al crescere della temperatura a cui sono condotti i test, presentano un netto incremento del numero di regioni di attivazione – passivazione e viceversa, corrispondenti ad un forte andamento oscillatorio della funzione rappresentata (vedi fig. 11.2.c.4.) ed, ad un livello microstrutturale, ad un comportamento nei confronti della resistenza alla corrosione non costante. Il netto incremento del numero di passaggi da zone di passivazione a zone di attivazione è contraddistinto da picchi di sempre minore intensità confermando

nuovamente come la capacità di resistenza alla corrosione della lega Rame-Berillio vada man mano diminuendo all'aumentare della temperatura.

Fig. 11.2.c.3 : estrapolazione di Tafel
per leghe CuBe C17200 in
soluzione di 0,5 M di H₂SO₄
con pH 3,26; 4,08 e 5,17 a 70 °C
in condizioni ambientali
non ossidanti.

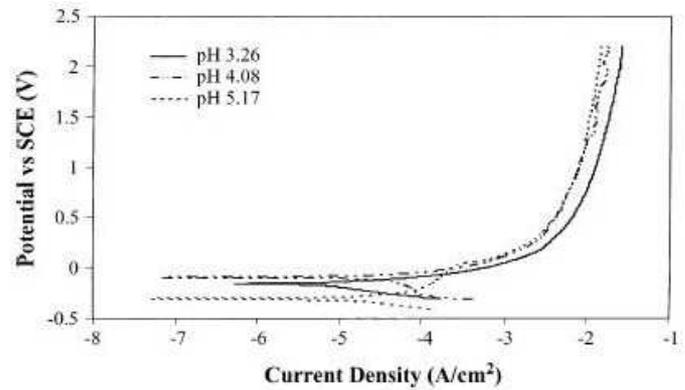
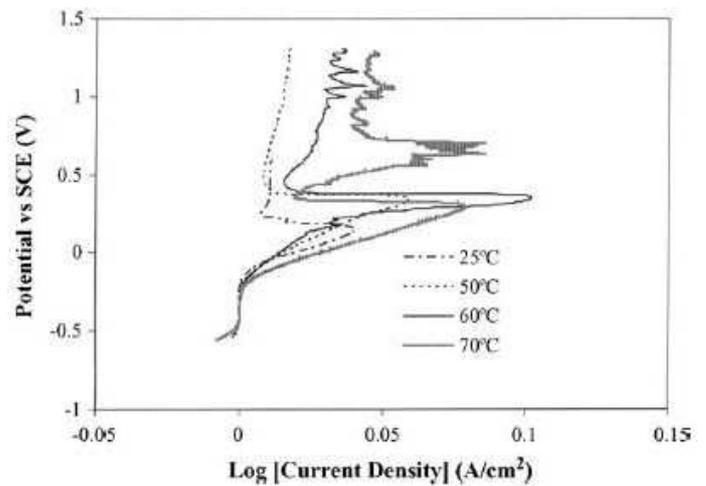


Fig. 11.2.c.4: polarizzazione potenziodinamica
per leghe CuBe C17200 in soluzione di 5 %
di HCl + 5 % Na₂SO₄ a 25 50, 60, 70 ° C in
condizioni ambientali non ossidanti.



La passivazione è infatti un fenomeno di protezione del materiale: il metallo nel subire l'attacco ossidativo esterno si difende dando vita ad uno strato ossidato che funge da barriera protettiva degli strati più interni. Il fatto che vi siano dunque delle frequenti fasi di riattivazione potrebbe essere dovuto ad un superamento dei neo strati ossidati (scoppio delle bolle e delle porosità) formatisi per ostacolare il propagarsi del fenomeno corrosivo sempre più in profondità.

A conferma di quanto sopra esposto in relazione alla resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio vengono di seguito riportate due tabelle riepilogative dei risultati ottenuti.

Tab.11.2.c.1: potenziali e le correnti di corrosione ottenute col metodo di Tafel

Elettrolita	Non ossidante 25 °C		Ossidante 25 °C		Ossidante 70 °C	
	I _{cor} (μ-Acm ⁻²)	V _{cor} (V)	I _{cor} (μ-Acm ⁻²)	V _{cor} (V)	I _{cor} (μAcm ⁻²)	V _{cor} (V)
PH 3,26 (0,5 M di H ₂ SO ₄)	2,422	-0,009	4,203	-0,163	23,13	-0,250
PH 4,08 (0,5 M di H ₂ SO ₄)	2,622	-0,053	4,686	-0,115	23,40	-0,271
PH 5,17 (0,5 M di H ₂ SO ₄)	2,813	-0,051	4,894	-0,114	24,97	-0,373
5 % HCl + 5 % Na ₂ SO ₄	3,905	-0,432	4,132	-0,441	22,015	-0,452

Tab.11.2.c.2: tassi di corrosione per una lega C17200 a differenti condizioni di prova

Elettrolita	Tassi di corrosione (μm year ⁻¹)		
	Non ossidante 25 °C	Ossidante 25 °C	Ossidante 70 °C
PH 3,26 (0,5 M di H ₂ SO ₄)	0,0277	0,0476	0,262
PH 4,08 (0,5 M di H ₂ SO ₄)	0,0297	0,0530	0,2655
PH 5,17 (0,5 M di H ₂ SO ₄)	0,0319	0,05543	0,2829
5 % HCl + 5 % Na ₂ SO ₄	0,0422	0,0486	0,2493

Le analisi microstrutturali condotte al microscopio a scansione elettronica:

Le analisi condotte al microscopio a scansione elettronica a loro volta hanno confermato su base microstrutturale quanto già rilevato dai test di natura elettrica inerenti la resistenza alla corrosione delle leghe Rame-Berillio.

Sottoponendo un campione della nostra lega all'attacco chimico di un elettrolita costituito da 5 % (v/v) HCl + 5 % (v/v) Na₂ SO₄ ed analizzandone al microscopio a scansione elettronica la superficie, si è potuto osservare a livello micrografico la modalità di risposta delle leghe Rame-Berillio all'attacco corrosivo al crescere della temperatura e comprendere quali fenomeni microstrutturali siano alla base dei numerosi passaggi di attivazione-passivazione.

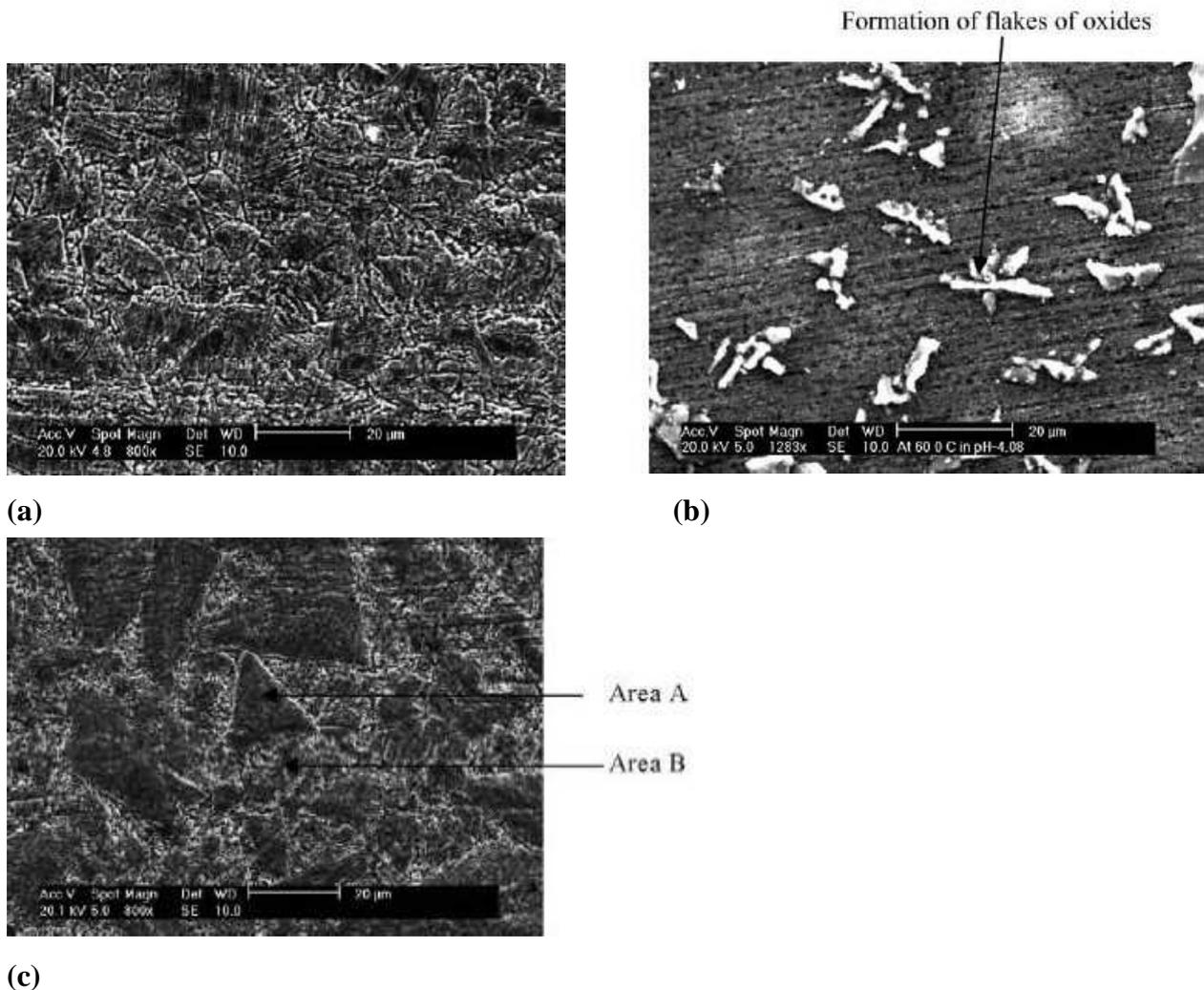
L'aspetto della superficie dei campioni infatti viene a modificarsi al crescere della temperatura:

- a 25 °C la superficie appare molto chiara e priva di porosità, fortemente adesa al substrato. Tale schiarimento è dovuto al film ossido neoformatosi che funge da barriera nei confronti di una ossidazione più profonda (comportamento di passivazione del materiale).
- a 50 °C lo strato ossido appare notevolmente ispessito.
- a 60 °C le numerose bolle e porosità presenti sulla superficie scoppiano e determinano in tal modo l'attivazione di un nuovo attacco corrosivo nei punti non più coperti dallo strato ossido.

- a 70 °C la superficie appare nuovamente meno soggetta a porosità e bolle, più omogenea e compatta, in grado di garantire una protezione migliore del materiale nei confronti di attacchi corrosivi condotti a maggiore profondità.

Alla base dei numerosi passaggi di attivazione-passivazione manifestati dalle leghe Rame-Berillio, cui corrisponde una non costanza nei valori di resistenza alla corrosione, vi è dunque il superamento da parte dell'agente ossidante dello strato ossido che funge da barriera e salvaguarda di volta in volta il materiale da un attacco maggiormente lesivo e più profondo.

Fig. 11.2.c.5: micrografie SEM di lega C17200 da test elettrochimico in soluzione di 5 % (v/v) Na₂SO₄ + 5 % (v/v) HCl: a) a 50 ° C in condizioni di atmosfera non ossidante; b) a 60 ° C in condizioni di atmosfera non ossidante ; c) a 70 ° C in condizioni di atmosfera non ossidante.

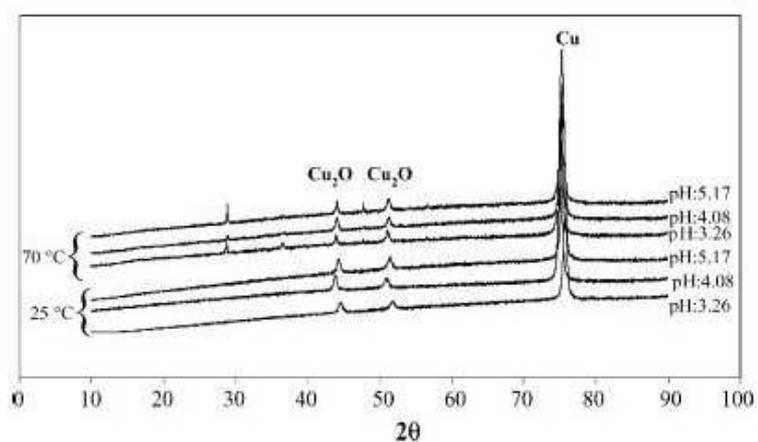


Analisi XRD: analisi diffrattometrica ai raggi x

Le analisi diffrattometriche ai raggi x presentano un andamento del tutto simile per i campioni testati anche se a diverse temperature: si evidenziano elevati picchi dei tre principali costituenti il neostrato ossido formatosi, il Rame, l'ossido rameico e l'ossido rameoso Cu_2O , elemento quest'ultimo tendente ad avere un accrescimento proporzionale rispetto alla temperatura, dovuto ad una maggiore mobilità degli atomi e ad un più agevole superamento dell'energia di attivazione della reazione di ossidazione.

Fig. 11.2.c.8: analisi XRD della corrosione dei campioni di lega C17200 in 0,5 M di H_2SO_4 .

Altro fattore che appare influenzare l'intensità dei picchi di ossido rameoso è il pH: **al crescere del valore di pH, il Cu_2O subisce un netto incremento, manifestando una capacità di ulteriore attivazione della reazione di ossidazione concordemente a quanto fatto dalla temperatura.**



A valori di temperatura e pH bassi, il materiale riesce invece a rallentare il fenomeno corrosivo proprio grazie al substrato neoformatosi, quello stesso substrato che nelle micrografie ci appariva di colore chiaro.

11.3. La resistenza a frattura e l'influenza del sovrainvecchiamento

Le leghe Rame-Berillio, a differenza della gran parte dei materiali metallici che vengono maggiormente rafforzati grazie a trattamenti meccanici, riescono ad esprimere le loro migliori qualità a seguito del trattamento termico di invecchiamento, detto anche rafforzamento per precipitazione. Recenti studi hanno inoltre dimostrato come il sovrainvecchiamento possa anch'esso contribuire in maniera determinante all'accrescimento di alcune delle proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio.

a) L'effetto del sovrainvecchiamento sulla resistenza a frattura delle leghe Rame-Berillio

La ricerca condotta da Kei-Peng Jen ed altri, " L'effetto del sovrainvecchiamento sulla resistenza a frattura delle leghe Rame-Berillio C17200 " partendo da diversi valori di temperatura e durata del trattamento termico di invecchiamento, è riuscita a dimostrare che il sovrainvecchiamento riesce a far acquisire al materiale la migliore resistenza a frattura, a discapito ovviamente di altre proprietà meccaniche.

Ciò non entra in contraddizione con quanto già detto in relazione alla combinazione ottimale di temperatura e durata di invecchiamento, cui abbiamo già accennato. Tale combinazione è così definita perché è in grado di offrire a ciascuna qualità di lega Rame-Berillio un miglior quadro di valori di tutte le proprietà meccaniche, mentre il trattamento termico di sovrainvecchiamento riuscirà a determinare solamente la massimizzazione della resistenza a frattura a discapito ad esempio della durezza.

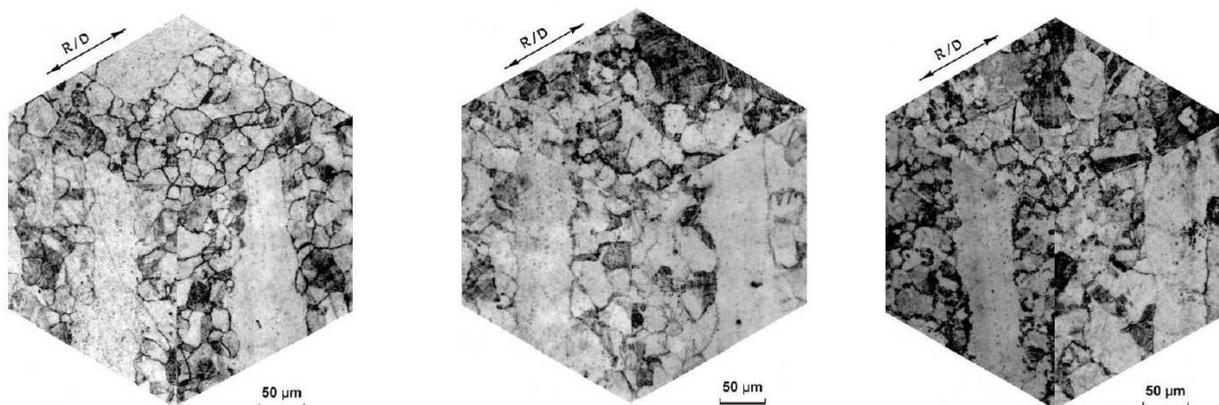
Volendo determinare l'effetto dell'applicazione di diverse temperature e durate di invecchiamento sulla resistenza a rottura di alcuni campioni forgiati in lega Rame-Berillio del tipo C17200, i ricercatori hanno adottato quattro differenti temperature di trattamento per quattro differenti durate (vedi tabella sottostante).

In tal modo è stato possibile determinare la relazione che sussiste tra il carico di rottura, resistenza alla trazione e la durezza, evidenziando la sostanziale anisotropia che interessa tali qualità meccaniche e che tuttavia scompare man mano che il livello di sovrainvecchiamento adottato è più severo.

Denominazione del campione	Temperatura °C	Durata h
R1	340	3
R2	390	6
R3	415	5
R4	445	5,5

Già esaminando le micrografie dei campioni R1, R2, R3 ingrandite a 200x, è possibile osservare che al crescere della temperatura e della durata di invecchiamento vada via via aumentando la quantità di fase γ presente ai bordi grano, divenendo fino a cinque volte superiore in R3 rispetto a quanto presente in R1.

Fig. 11.3.a.1 : microstruttura 3D di R1, R2, R3.



Questo diverso livello di accumulo di fase γ ai bordi grano è alla base delle sostanziali differenze che interessano i valori assunti dalle diverse proprietà meccaniche prese in esame:

- **La proprietà di trazione:** i risultati dedotti con i test effettuati fanno emergere una situazione di sostanziale anisotropia. I valori sono influenzati dalla direzione di applicazione della forza. E' interessante però notare come **al crescere sia della temperatura che della durata del sovrainvecchiamento, la resistenza a trazione e la resistenza allo snervamento diminuiscano, mentre la duttilità, definita dai termini di allungamento, vada progressivamente crescendo.**

Tabella 11.3.a.1: risultati ottenuti con la prova di trazione.

Denominazione del campione-prova	Resistenza a trazione MPa	Resistenza allo snervamento 0,2 % MPa	Allungamento %	Riduzione di area %
A. Risultati dei test a trazione trasversale				
1TT1	1215	1077	2,7	3,2
1TT2	1204	1110	3,0	7,7
R1 TT Avg.	1209	1094	2,9	5,5
2TT1	958	818	9,6	23,2
2TT2	955	828	9,3	21,8
R2 TT Avg.	956	823	9,5	22,5
3TT1	871	699	14,2	27,5
3TT2	905	752	14,0	35,4
R3 TT Avg.	888	726	14,1	31,5
B. Risultati dei test a trazione longitudinale				
1TL1	1255	1085	6,6	10,8
1TL2	1251	1105	5,4	9,3
R1 TL Avg.	1253	1095	6,0	10,1
2TL1	990	818	13,0	26,7
2TL2	997	828	14,0	34,0
R2 TL Avg.	993	823	13,5	30,4
3TL1	843	665	16,6	35,0
3TL2	904	751	16,4	38,1
R3 TL Avg.	874	708	16,5	36,6

- **La resilienza:** anche la proprietà di resilienza misurata subisce un sostanziale incremento all'aumentare della temperatura e della durata del trattamento termico di sovrainvecchiamento. Si manifesta inoltre una relazione di diretta proporzionalità tra la resilienza di e la duttilità: **la resilienza e la duttilità del materiale crescono di pari passo al contrario della resistenza a trazione che diminuisce.**

Tabella 11.3.a.2: risultati ottenuti con il test di resilienza di Charpy.

Denominazione del campione-prova	J
A. Risultati dei test di Charpy a direzione trasversale (TC)	
1TC1	8,1
1TC2	8,1
1TC3	6,8
R1 TC Avg.	7,7
2TC1	13,6
2TC2	14,9
2TC3	13,6
R2 TC Avg.	14,0
3TC1	21,7
3TC2	23,0
3TC3	21,7
R3 TC Avg.	22,1
B. Risultati dei test di Charpy a direzione longitudinale (LC)	
1TL1	8,1
1TL2	8,1
1TL3	8,1
R1 TL Avg.	8,1
2TL1	17,6
2TL2	17,6
2TL3	19,0
R2 TL Avg.	18,1
3TL1	31,2
3TL2	29,8
3TL3	28,5
R3 TL Avg.	29,8

- **La tenacità:** i dati riportati nella tabella confermano sostanzialmente come ogni trattamento di sovrainvecchiamento con condizioni più severe di quelle adottate per i campioni R3 sia in grado di incrementare leggermente la resistenza a frattura del materiale, comportando però l'indesiderabile netta diminuzione del carico di snervamento e di conseguenza della lavorabilità del materiale. I migliori risultati si ottengono dunque con la combinazione temperatura-tempo impiegati per R3: anche il trattamento di sovrainvecchiamento ha dunque una sua combinazione ottimale come già si era detto per il trattamento di invecchiamento.

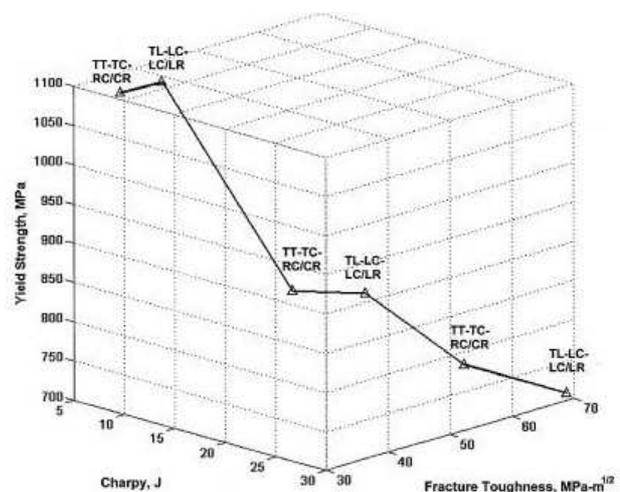
Nel quadro di dati raccolti, si è potuto osservare come il **comportamento anisotropico che emerge dalla lettura dei dati relativi ad R1, venga progressivamente a scomparire incrementando il livello di sovrainvecchiamento impartito al materiale.**

A seguito dell'esecuzione di questo insieme di test è stato possibile **conoscere la correlazione esistente tra il carico di snervamento, la resilienza e la resistenza a frattura** (fig. 11.3.a.2).

In linea di principio, a partire da questo grafico è anche possibile costruire altre due curve che corrono in uno spazio non più tridimensionale ma bidimensionale, risultando perciò di più facile consultazione ed in grado di descrivere la relazione tra σ_{SN} e σ_R e tra la resilienza ed σ_R .

Ai fini della progettazione, qualora la classificazione dei campioni di Rame-Berillio non sia disponibile, queste curve possono risultare utili per la stima dei dati sulla resistenza a frattura, partendo dai dati relativi al carico di snervamento e da quelli relativi alla resilienza dedotti con il test di Charpy.

Fig. 11.3.a.2: diagramma in 3D della resistenza a frattura, resistenza Charpy e del carico di snervamento di C17200.

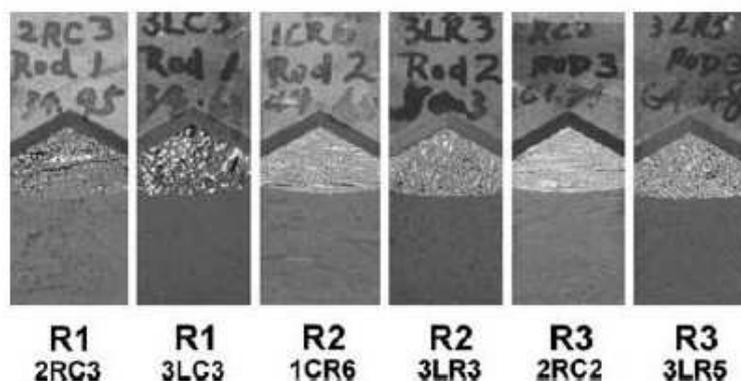


Gli stessi campioni sottoposti dapprima ai diversi trattamenti di sovrainvecchiamento ed alle relative prove per la misurazione dei parametri meccanici citati, sono stati successivamente fatti oggetto di un piccolo intaglio sulla loro superficie al fine di testarne la resistenza a fatica su un idoneo macchinario, un Tester 1125 Universal. Sopraggiunta la frattura, le relative superfici sono state opportunamente trattate per poter essere analizzate tramite microscopio ottico e microscopio a scansione elettronica.

Le micrografie relative ai diversi campioni hanno permesso di rilevare come l'anisotropia che sostanzialmente caratterizza i diversi parametri meccanici si manifesti anche nei valori assunti dalla resistenza a fatica:

- le superfici di frattura dei campioni CR ed RC sono molto più ruvide rispetto alle superfici dei campioni CL ed LR;
- le regioni di pre-cricatura di CR ed RC presentano molte linee lucide, mentre i campioni LC ed LR sono caratterizzati da macchie scure.

Fig. 11.3.a.3: esempi di linee lucide e punti lucidi nelle regioni di fatica di R1, R2, R3.



Dai dati raccolti e dall'analisi delle micrografie effettuate è stato possibile dedurre che

- **l'abbondanza di superficie lucida aumenta nell'ordine, andando da R1 ad R3:** maggiore è la sua presenza sulla regione di pre-cricatura, maggiore è la resistenza a frattura manifestata dal campione.
- **le macchie scure sono presenti con sempre minore intensità passando da R1 ad R2, fino ad R3 dove sono del tutto assenti:** queste macchie scure sono attribuibili a fenomeni ossidativi indotti dalla fatica. Lo sfregamento per fatica determina un incremento della temperatura sulle superfici che, una volta esposte all'aria a seguito di rottura, saranno facilmente oggetto di reazione ossidativa. I campioni RC e CR essendo caratterizzati da superfici di frattura con elevata rugosità, presentano macchie scure ben più grandi ed estese, dato il maggior sfregamento indotto tra le parti.

A livello microstrutturale, si è dunque potuto comprendere quali siano le caratteristiche alla base della maggiore resistenza alle sollecitazioni esterne ed alla rottura per fatica. All'aumentare della severità di invecchiamento impartita al materiale, si è notato che:

- nella zona di pre-cracking ai punti neri accompagnati da sfaldature, proprie dei campioni R1, vanno a sostituirsi strisce lucide accompagnate da river patterns (fig. 11.3.a.4);
- nella regione di sovraccarico alle cavità intergranulari proprie dei campioni che hanno subito un leggero invecchiamento, corrispondono invece, nei campioni R3 a più severo invecchiamento, sia cavità transgranulari ricche di fossette da cui si dipartono cricche secondarie, evidenza microstrutturale della maggiore resistenza a frattura di tali campioni (fig. 11.3.a.5);

Nella medesima regione in tutti i campioni testati si sono potute osservare **un sempre maggiore numero di cavità al crescere della temperatura e della durata del trattamento termico di sovrainvecchiamento: tale caratteristica è strettamente correlata al maggiore livello di duttilità raggiunto dal materiale stesso.**

Fig. 11.3.a.4.: river-patterns nella regione di pre-
cricatura di R1.

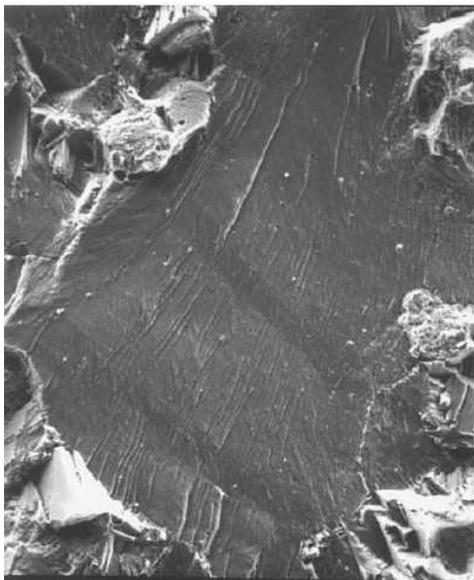
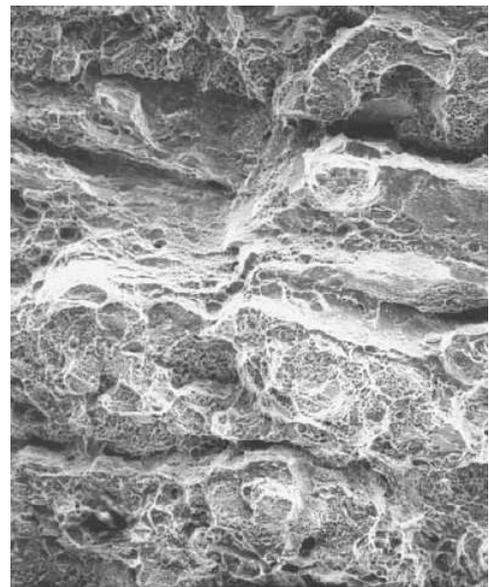


Fig. 11.3.a.5.: fossette nella regione di
frattura R3,



b) L'influenza dei trattamenti termici sulle leghe CuBe saldate con fascio laser

Il trattamento termico di invecchiamento, data la sua ottima capacità di incrementare notevolmente i valori delle proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio, è di solito utilizzato quale trattamento conclusivo cui sottoporre le leghe CuBe saldate. Esiste anche in questo caso una correlazione che lega tra loro le ottime qualità meccaniche di questo materiale, le sue caratteristiche microstrutturali e le modalità di frattura che in esso possono manifestarsi in virtù della diversa severità con la quale è stato invecchiato.

Prima di addentrarci nei dettagli microstrutturali, è bene ricordare che in un materiale metallico sottoposto a saldatura si presentano sempre tre distinte zone che si differenziano tra loro in primis per le loro diverse morfologie strutturali e quindi per le non analoghe caratteristiche meccaniche che da queste derivano. Anche in questo caso dunque è opportuno parlare di:

- **zona di fusione:** caratterizzata per lo più dalla presenza di dendriti di natura direzionale che, all'avvicinarsi al limite di bagno di saldatura (edge of bath), lasciano posto ad una struttura cellulare a carattere planare. L'avvicendamento tra queste due diverse conformazioni è, come noto, dettato principalmente da tre fattori: la velocità di raffreddamento, il contenuto della lega ed il livello di sottoraffreddamento applicabile in loco al materiale.

L'originarsi di queste diverse microstrutture viene anche correlato al valore assunto dal rapporto G / R , dove G indica il gradiente di temperatura nel liquido, mentre R rappresenta il tasso di solidificazione:

- a bassi valori di tale rapporto, correlabili ad alti valori di sottoraffreddamento, è legato l'originarsi di una morfologia di natura dendritica, mentre
- ad alti valori del rapporto G / R , per lo più dovuti ad alto gradiente di temperatura, viene ad originarsi una struttura planare.

La tipologia di frattura riscontrabile in tale zona è quella transgranulare, caratterizzata da fossette e cavità di grosse dimensioni connaturali a quei materiali dotati di buona duttilità.

- **zona termicamente alterata (HAZ):** caratterizzata da incipiente fusione ai bordi grano . La struttura del grano nella zona di fusione è principalmente controllata dal metallo base e dalle condizioni di saldatura, mentre l'iniziale solidificazione si verifica di solito in modalità

epitassiale sui grani parzialmente fusi nella zona termicamente alterata: la crescita del grano avviene privilegiando alcune direzioni di crescita.

La tipologia di frattura riscontrabile in tale zona è dovuta per lo più a coalescenza di vuoti, cavità intergranulari, attorniate da larghe fossette ed aree duttili.

Alla base di tale comportamento sembra esservi probabilmente la rifusione parziale di alcuni bordi grano in tale zona, in grado di dar vita ad aree relativamente duttili.

- **il metallo base:** il metallo base non risente nelle proprie caratteristiche strutturali dell'avvenuta operazione di saldatura. La tipologia di frattura in essa riscontrabile è per lo più di tipo intergranulare, con piccole fossette poco profonde dovute alla coalescenza dei vuoti sulle facce dei bordi grano.

Quanto scritto descrive la microstruttura delle leghe Rame-Berillio saldate senza aver prima subito alcun trattamento termico. A livello industriale i materiali che vengono sottoposti a saldatura in alcuni casi sono già stati sottoposti o a ricottura o ad invecchiamento, in altri casi la saldatura precede l'esecuzione di tali trattamenti sul materiale: è perciò importante conoscere la “ storia metallurgica ” di un pezzo saldato dal momento che ciò influenzerà le sue caratteristiche microstrutturali e di conseguenza le sue qualità meccaniche. Sottoponendo quattro campioni del medesimo materiale, leghe Rame-Berillio C17200, a quattro differenti sequenze di trattamenti (vedi tabella nr. 11.3.b.1.), si è potuto comprendere come l'ordine con i quali sono stati eseguiti tali trattamenti abbia avuto un ruolo fondamentale nel determinare i diversi risultati microstrutturali raggiunti e di conseguenza il valore assunto dalle principali caratteristiche meccaniche (vedi tabella nr. 11.3.b.2.) .

Tabella 11.3.b.1: classificazione dei diversi campioni.

Classificazione	Sequenza dei trattamenti			
SW	Ricottura	Saldatura	.....	.....
AW	Ricottura	Invecchiamento	Saldatura	.....
SWA	Ricottura	Saldatura	Invecchiamento	.....
SWSA	Ricottura	Saldatura	Ricottura	Invecchiamento

Tabella 11.3.b.2: valori delle principali proprietà dei diversi campioni testati.

Proprietà	Carico di snervamento (MPa)	Resistenza alla trazione (MPa)	Allungamento	Modalità di frattura	Localizzazione della frattura
Ricotto	754	799	11,04	Duttile	
AW	516	737	2,01	Duttile – fragile	HAZ
SW	567	742	1,40	Duttile – fragile	HAZ
SWA	888	1108	0,96	Duttile – fragile	Metallo fuso
SWSA *	642	755	9,59	Duttile	Metallo base
SWSA	932	1372	3,18	Duttile	Metallo base

SWSA *:= SWSA senza trattamento termico di invecchiamento finale

Analisi dei campioni AW ed SW: microstruttura, durezza e modalità di frattura

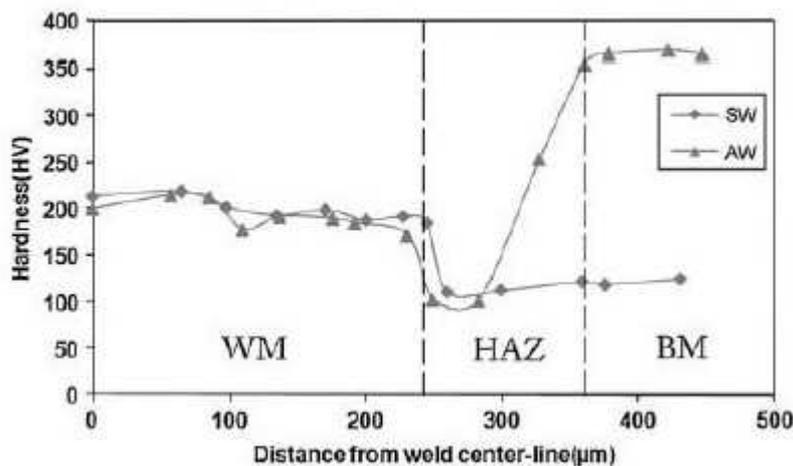
La tabella seguente riporta in maniera schematica le caratteristiche microstrutturali delle tre distinte zone che costituiscono la saldatura dei singoli campioni in lega Rame-Berillio.

Tabella 11.3.b.4: le microstrutture costitutive i campioni SW ed AW.

	Zona del metallo fuso	Zona termicamente alterata	Zona del metallo base
SW	<p>Presenza di:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dendriti equiassiali - dendriti secondarie - struttura colonnare <p>La fase γ si forma durante la solidificazione del metallo di fusione dando però vita a precipitazione incompleta.</p>	<p>Grani di dimensioni molto maggiori rispetto alla limitrofa zona di fusione con incipiente liquefazione ai bordigrano per effetto della segregazione degli atomi di Berillio indotta dalla ricottura: ciò determina una elevata fragilità.</p>	<p>Grani di fase α in cui sono disciolti atomi di Berillio e particelle di color bianco, costituite da una fase intermetallica di Cobalto-Berillio.</p>
AW	<p>Presenza di:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dendriti equiassiali - dendriti secondarie - struttura colonnare che manifesta ispessimento ai bordigrano per l'invecchiamento subito. Le strutture dendritiche presentano invece una grana molto fine a tutto vantaggio delle proprietà meccaniche. 	<p>Grana grossolana caratterizzata da forme irregolari e dentellate ai confini con la zona di fusione, indicativa di un'avvenuta liquefazione ai bordigrano.</p>	<p>Grani di fase γ formatisi a seguito della trasformazione della fase α indotta dall'invecchiamento, causata inoltre dall'ispessimento e della maggiore irregolarità dei bordigrano. Il precipitato avendo dimensioni reticolari minori rispetto alla fase α induce l'originarsi di striature all'interno dei grani stessi.</p>

Osservando il diagramma relativo alla durezza dei campioni SW ed AW è facile notare come le due curve procedano in maniera del tutto simile per un largo tratto, manifestando come i due materiali presentino valori di durezza analoghi sia nella zona del metallo fuso che nella zona termicamente alterata, almeno fino ad una distanza di 300 μm dal centro di saldatura.

Fig. 11.3.b.8: diagramma relativo alla microdurezza Vickers dei campioni SW ed AW.



Tale comportamento trae origine dalla diversa composizione metallogica che costituisce le diverse parti dell'area saldata: nella zona termicamente alterata (HAZ) non è presente alcuna traccia di fase secondaria della lega Rame-Berillio, ritenuta responsabile della debolezza del materiale e che grazie all'applicazione della saldatura è stata invece dissolta.

Entrando maggiormente nel dettaglio, la debolezza strutturale in termini di durezza manifestata dalla HAZ è attribuibile principalmente a due fattori:

- **Le cricature indotte da liquefazione ai bordigrano** che si verificano a seguito della esecuzione della saldatura
- **Il fenomeno di reversion precipitates**, caratterizzato dallo scioglimento di fase γ^{II} e fase γ^{I} nella matrice α per effetto del calore di saldatura. Tale reversione varia di intensità lungo il provino: la reversione della fase secondaria è infatti parziale all'interfaccia HAZ – zona non termicamente alterata, mentre vi è piena reversione dei precipitati vicino al confine della zona di fusione.

Per quanto riguarda la modalità di frattura riscontrabile in queste due tipologie di campioni, la sua natura è sempre duttile-fragile ed indotta dalla coalescenza di microvuoti.

Analisi dei campioni SWA ed SWSA: microstruttura, durezza e modalità di frattura

I campioni SWA ed SWSA si differenziano da quelli appena descritti in virtù della diversa tempistica con la quale vengono eseguiti i trattamenti di ricottura ed invecchiamento: in questi ultimi due provini infatti la saldatura precede i trattamenti di invecchiamento e ricottura e ciò determina la scomparsa del fenomeno di liquefazione ai bordigrano dal momento che la precipitazione viene indotta nelle fasi finali di lavorazione, provocando al più ispessimento dei bordigrano stessi e l'insorgenza di striature.

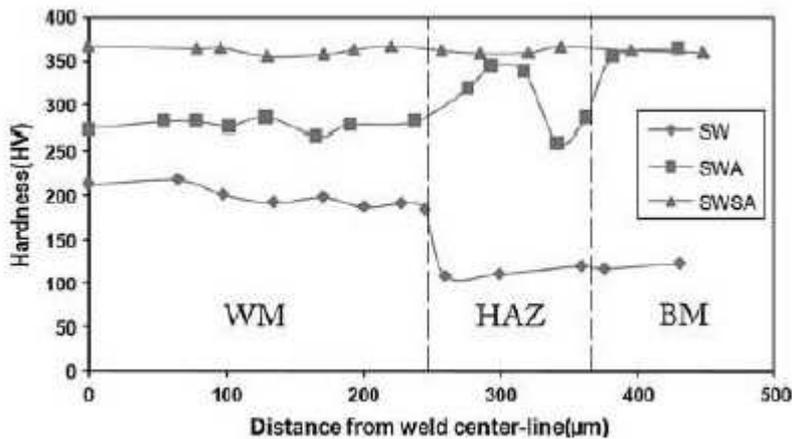
Tabella 11.3.b.5: le microstrutture costitutive i campioni SWA ed SWSA.

	Zona del metallo fuso	Zona termicamente alterata	Zona del metallo base
SWA	<p>Presenza di:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dendriti equiassiali - dendriti secondarie - struttura colonnare <p>L'invecchiamento non produce particolari effetti sul bagno di saldatura essendo la T_{inv} molto inferiore alla $T_{ricottura}$.</p>	<p>Presenta una grana grossolana dovuta alla dispersione termica da cui è investita. Essendo l'invecchiamento fatto al termine non si ha più la liquefazione ai bordigrano, bensì solamente la presenza di striature.</p>	<p>L'invecchiamento terminale determina ispessimento ai bordigrano per effetto della trasformazione della fase α dapprima in fase γ^{II}, γ^I e infine fase γ: ciò determina l'insorgenza di striature all'interno dei grani causato dal minor valore del parametro reticolare del precipitato.</p>
SWSA	<p>Si contraddistingue dalla medesima zona del campione SWA per il fatto che:</p> <ul style="list-style-type: none"> - grani orientati hanno preso il posto della struttura colonnare. - grani a struttura colonnare hanno sostituito le dendriti: ciascun grano è formato da un grappolo di cellule solidificate (cluster) che presentano la stessa orientazione. <p>Non è presente alcuna liquefazione ai bordigrano.</p>	<p>Presenta grana grossolana: scompare ogni segno di liquefazione ai bordigrano dal momento che l'invecchiamento è fatto al termine della preparazione del campione, comportando solamente l'insorgenza di striature.</p>	<p>L'invecchiamento terminale determina ispessimento ai bordigrano per effetto della trasformazione della fase α dapprima in fase γ^{II}, γ^I e infine fase γ: ciò determina l'insorgenza di striature all'interno dei grani causato dal minor valore del parametro reticolare del precipitato.</p> <p>(struttura del tutto analoga a quella presente nella medesima zona nel campione SWA)</p>

Osservando il diagramma relativo alla durezza dei campioni SWA ed SWSA (fig. 11.3.b.12) è possibile notare come i trattamenti termici di post-saldatura riescano a conferire al materiale un notevole miglioramento rispetto a tale proprietà lungo tutto il bagno di saldatura, compresa la zona termicamente alterata.

Sia la ricottura in soluzione che l'invecchiamento, attuati al termine della saldatura, riescono a dare completamento al fenomeno di precipitazione sia che coerente e semicoerente nella zona HAZ, attribuendole dunque una maggiore durezza.

Fig. 11.3.b.12: diagramma relativo alla durezza micro-Vickers dei campioni SWA ed SWSA.



L'invecchiamento che colpisce il campione SWA, in virtù dell'apporto termico speso, riesce a rendere grossolani i precipitati interdendritici, divenendo ostacolo al moto delle dislocazioni indotto durante la prova di trazione, provocandone perciò un accumulo che comporta l'

insorgenza di microcricche: da qui discende la rottura fragile che insorge nelle leghe Rame-Berillio così trattate.

Per quanto concerne i campioni SWSA, è la ricottura a svolgere il ruolo di induttore della diffusione degli atomi di Berillio tra le dendriti e gli spazi interdendritici, comportando una migliore omogeneizzazione del materiale e riuscendo a dissolvere la fase incoerente interdendritica γ . La frattura in tali provini è di natura duttile a carattere transgranulare data la presenza di vuoti superficiali (shallow voids) che si verifica nella zona del metallo base.

c) Applicazioni industriali particolari delle leghe Rame-Berillio invecchiate

L'invecchiamento ed il sovrainvecchiamento, in virtù della loro capacità di incrementare il valore delle proprietà meccaniche delle leghe Rame-Berillio, sono oggi trattamenti termici ampiamente usati nella preparazione di tali materiali per specifici impieghi. In appendice a tale capitolo si è dunque ritenuto opportuno accennare a due differenti ambiti industriali:

- nel primo caso il sovrainvecchiamento è un utile trattamento cui si ricorre per poter incrementare le qualità di resistenza delle spazzole per contatti elettrici scorrevoli e di conseguenza la loro vita utile;
- nel secondo caso, il processo di taglio di parti in Rame-Berillio, l'invecchiamento ed il sovrainvecchiamento indotti dall'incremento di temperatura risultano essere deleteri, dal momento che comportano un maggior dispendio energetico per l'esecuzione del processo di taglio stesso.

c.1) Le spazzole in fibra metallica in CuBe per contatti elettrici scorrevoli

Le leghe Rame-Berillio essendo dotate di ottime caratteristiche meccaniche di resistenza e di ottima conduttività elettrica vengono oggi impiegate anche nella costruzione di spazzole per contatti elettrici scorrevoli ad alta densità di corrente essendo in grado di assicurare loro una adeguata vita utile.

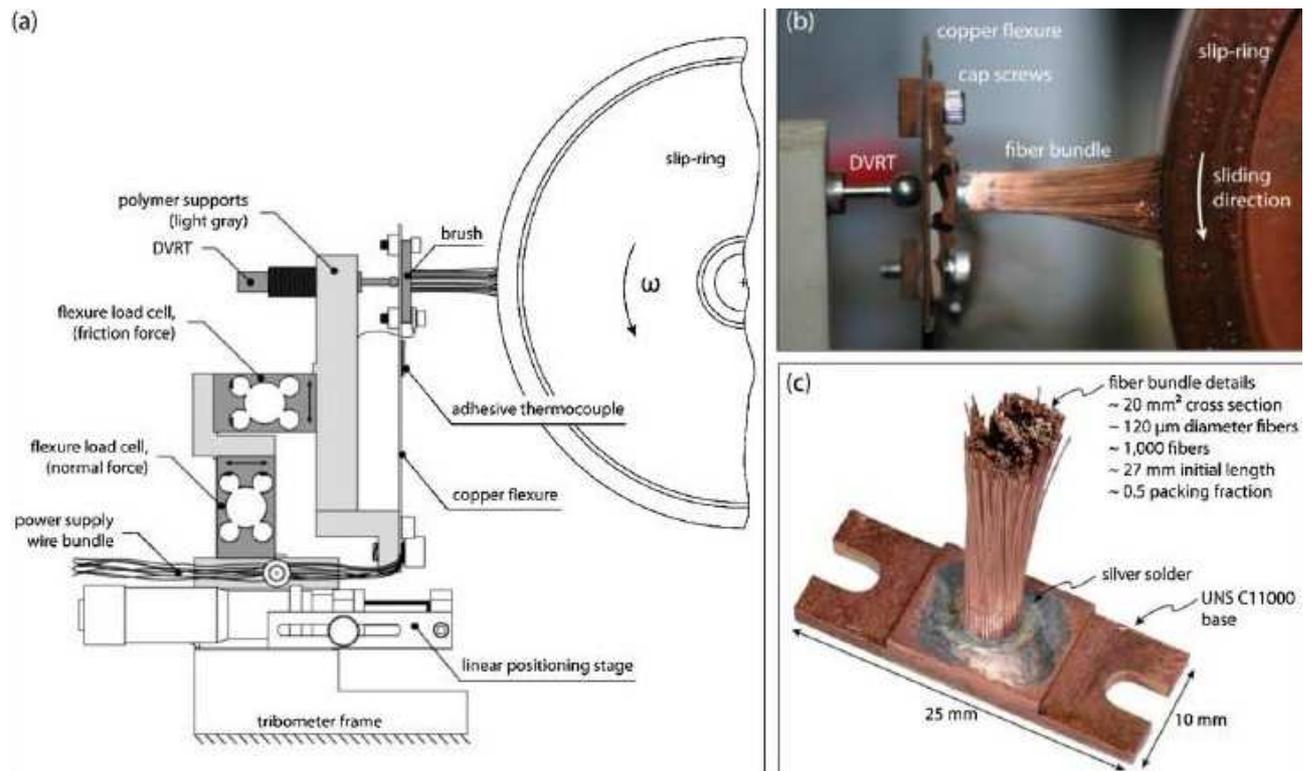
Solitamente costituite da un migliaio di filamenti di CuBe C17200 del diametro di 120 μm , fittamente raccolti a formare un fascio cilindrico con area trasversale di 20 mm^2 , sono soggette ad un forte stato di usura provocato dall'alta densità di corrente che le attraversa. Il trattamento di invecchiamento concorre in questo caso a migliorare la capacità di resistenza delle fibre unitamente ai lubrificanti, la grafite e l'anidride carbonica, in grado di diminuire gli attriti che si manifestano tra la testa dei filamenti ed il collettore ad anello.

Recenti studi condotti su tali dispositivi hanno permesso di determinare quanto segue:

- innanzitutto **l'usura lineare e la resistenza elettrica al contatto presentano andamenti opposti al crescere della durata di utilizzo delle spazzole:** mentre l'usura da esse subita aumenta progressivamente in maniera direttamente proporzionale, la resistenza al contatto viene a diminuire manifestando un comportamento simmetricamente opposto.
- Per quanto concerne **il coefficiente di attrito**, il suo andamento appare di più difficile interpretazione: nelle fasi iniziali di utilizzo delle spazzole, tale parametro solitamente cresce col

trascorrere del tempo, per poi, **acquisire un andamento decrescente** fino a tendere in maniera asintotica per la seconda metà della vita utile della spazzola ad un modesto valore .

Fig. 11.3.c1.1 : rappresentazione schematica del sistema di connessione con spazzole in fibra di lega di Rame.



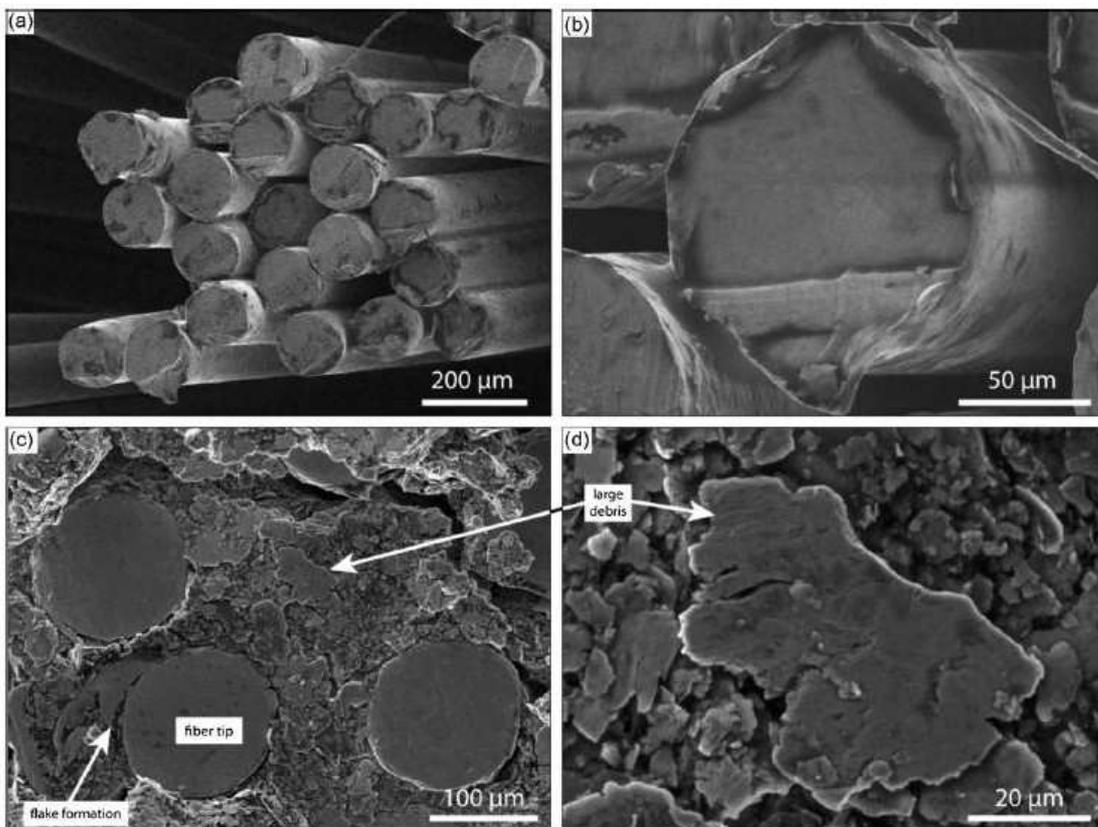
- **la modalità di funzionamento con spazzole positive presenta una velocità di usura lineare che è doppia rispetto a quella presentata dalla modalità di funzionamento a spazzole negative** (con il termine spazzola positiva si identifica quella condizione in cui la spazzola presenta un potenziale elettrostatico superiore a quello che caratterizza il collettore). Anche il comportamento di tale parametro pare caratterizzarsi per una certa asimmetria in funzione della polarità assunta dalla spazzola.

A causa delle notevoli pressioni che le spazzole esercitano sul collettore ad anello, unitamente agli attriti ed al conseguente incremento delle temperature che tra loro si manifesta, le teste delle fibre subiscono progressivamente una alterazione della loro conformazione: se all'inizio del funzionamen-

to del dispositivo il loro aspetto appare liscio nel centro con accenni di deformazione plastica in prossimità dei bordi, al termine della loro vita utile è possibile notare la presenza di una grande quantità di detriti di due differenti grandezze:

- detriti grandi, del diametro di 10 – 100 μm che in qualche caso riescono a spezzare al testa delle fibre e che vengono spinte all'interno del fascio a causa della pressione addotta alle loro spalle da altri detriti neoformati.
- detriti piccoli, con un ordine di grandezza pari a 1 – 10 μm anche loro osservabili negli interstizi tra fibra e fibra e che non solo riescono a coprire le scaglie più larghe, ma contribuiscono a spingere quest'ultime sempre più in profondità.

Fig. 11.3.c1.2 : le figura a) e b) rappresentano le teste delle fibre in Rame-Berillio delle spazzole prima della effettuazione del test. Le teste appaiono relativamente piatte a causa della frattura delle stesse durante la loro preparazione: sono state tagliate su misura usando forbici in fibra ceramica. c) micrografia SEM delle stesse teste al termine del test: le punte appaiono lucide. d) micrografia dei dischi di detriti tra le teste delle fibre al termine della prova.



Per quanto concerne il collettore in Rame, dall'analisi micrografica si può notare che la superficie acquisisce un aspetto a “ scaglie di pesce ”. Anche il collettore subisce l'usura derivante dallo strisciamento tra le parti del contatto ed infatti appare deformato plasticamente e in alcuni punti affetto da piccole rotture che hanno dato vita ad altri detriti e frammenti.

Il trattamento di invecchiamento cui vengono sottoposte le fibre concorre ad allungare la vita utile delle spazzole ma non ne può evitare l'inevitabile deterioramento dopo un certo periodo di impiego.

c.2) L'invecchiamento ed il sovrainvecchiamento indotti dalla temperatura di taglio.

Nell'influenzare i valori acquisiti dalle proprietà meccaniche di un dato materiale, nel nostro caso le leghe Rame-Berillio, esercita un ruolo importante anche la modalità con cui il medesimo materiale viene tagliato. Esistono come è noto due diverse tipologie di taglio:

- **Il taglio a secco:** in cui non viene fatto uso di alcun lubrificante o refrigerante, con conseguente incremento della temperatura indotto dagli attriti.
- **Il taglio umido:** caratterizzato dall'impiego di refrigeranti e lubrificanti in grado di attenuare gli attriti tra lama e materiale e di conseguenza l'incremento di temperatura indotto da quest'ultimi.

La modalità di taglio impiegata ha, in virtù del diverso incremento di temperatura in loco che può comportare, una forte influenza su un insieme di aspetti del materiale, quali ad esempio la lavorabilità, i valori assunti dalle diverse proprietà meccaniche, la modalità di frattura ed anche le caratteristiche microstrutturali assunte. A riprova di quanto detto basti osservare i dati riportati nelle due tabelle sottostanti relativi a test condotti su campioni di leghe Rame-Berillio sottoposti alle due differenti tipologie di taglio.

Tabella 11.3.c.2.1: valori della finitura superficiale per le due tipologie di taglio.

Tipologia di lavorazione	Finitura superficiale
Lavorazione a secco	1, 035 μm
Lavorazione umida (con refrigerante)	0, 77 μm

Tabella 11.3.c.2.2: valori di alcune proprietà meccaniche in base alle due tipologie di taglio.

Tipologia di lavorazione	Resistenza allo snervamento 0,2 % deform.	Resistenza alla trazione (MPa)	Allungamento (%)	Riduzione d'area (%)	Durezza HRC
Lavorazione a secco	1118	1312	6,25	7,8	36,5
Lavorazione umida	1184	1405	7,42	9,4	32,8

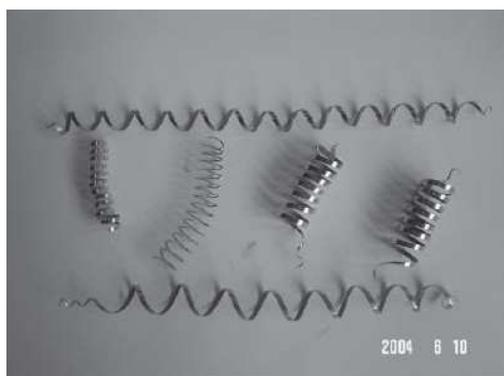
Nello specifico i risultati conseguiti dalle ricerche condotte da K.V. Sudhakar ed altri hanno permesso di fare notevoli passi in avanti nella comprensione dei seguenti aspetti:

1. Influenza della tipologia di taglio sulle caratteristiche meccaniche di lavorabilità:

la lavorabilità in sé di un materiale viene di solito misurata in termini di vita utile degli strumenti, finitura superficiale, potenza consumata per la lavorazione e produttività. Tutti questi parametri vengono influenzati dalla tipologia di taglio adottata nella divisione di un componente. Osservando i dati delle due tabelle riportate in precedenza, si potrà facilmente notare come i campioni sottoposti a taglio umido presentino una finitura superficiale migliore rispetto a quanto accade per il taglio a secco, grazie all'azione del refrigerante in grado di minimizzare le forze di attrito che intervengono tra materiale ed utensile, mantenendo inoltre ad un livello adeguato la temperatura in gioco. Riducendo le forze di impatto e di opposizione al passaggio della lama, sarà minore l'energia spesa per effettuare la medesima operazione e tutto ciò viene rispecchiato dalla stessa diversa natura di trucioli che si possono ottenere da un medesimo materiale adottando le due diverse tecniche.

Fig. 11.3.c.2.1: trucioli di lega CuBe: a) ottenuti con taglio a secco; b) ottenuti con taglio umido.

a)



b)



2. Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura di taglio:

Le prove di trazione hanno manifestato per i campioni tagliati a secco un netto incremento della durezza dovuto ad un eccessivo incrudimento che ha però causato allo stesso tempo una diminuzione della resistenza a trazione. Per quanto riguarda i campioni tagliati con taglio umido appare quasi una situazione opposta, caratterizzata da migliore resistenza a trazione e generalmente da una migliore duttilità. (vedi tabella 11.3.c.2.2).

3. L'influenza della temperatura di taglio sulla durezza:

La sostanziale assenza di una eccessiva deformazione plastica nei campioni tagliati con l'ausilio di refrigerante, permette loro di presentare una minore durezza rispetto ai campioni tagliati a secco.

A livello strutturale poi, tagliando a secco una barra di Rame-Berillio si determina un incremento della temperatura in loco a causa delle notevoli forze di attrito e si procura al materiale un ingrossamento della grana che concorre influenza la modalità con cui lo stesso giungerà a rottura.

- **con taglio umido** la modalità di frattura è tipicamente duttile, dominata da piccole cavità, porosità (dimples) e ad alcune creste duttili (ridges) sia al grano che ai bordi grano (vedi fig.11.3.c.2.2.).
- **con taglio a secco** a causa dell'aumento della temperatura e del conseguente ingrossamento della grana, la modalità di frattura più ricorrente è quella intergranulare e quindi il materiale tende ad avere comportamento fragile a causa dell'effetto di incrudimento subito dalla lega conseguente al surriscaldamento in loco (Fig. 11.3.c.2.3.).

Fig. 11.3.c.2.2.: superficie di frattura duttile con

cavità che presentano porosità e creste.

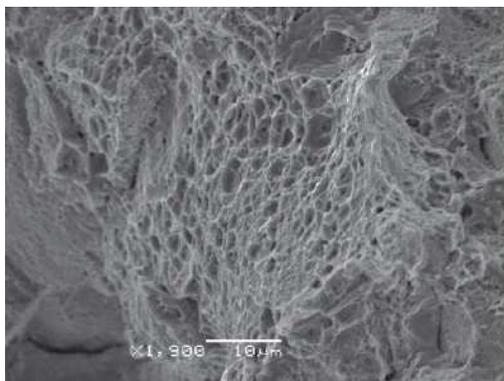
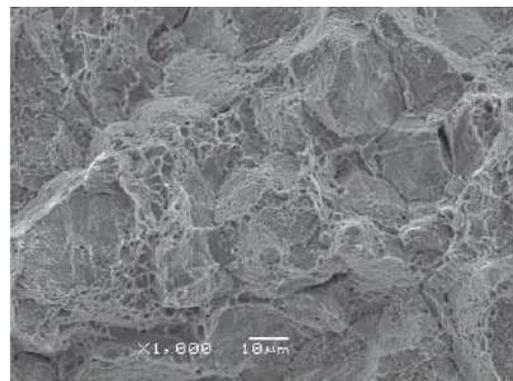


Fig. 11.3.c.2.3: frattura intergranulare con alcune creste duttili.



11.4 La resistenza alla fatica termica : la realizzazione di modelli di assemblati pressati.

L'utilizzo di giunzioni in lega Rame-Berillio, in virtù della loro alta resistenza alla frattura, è stato negli ultimi anni impiegato nella realizzazione di assemblati pressati utili alla realizzazione di pareti altamente resistenti ad elevati stress termici. L'impiego delle leghe Rame-Berillio data la loro buona resistenza alla fatica di natura termica è un elemento essenziale per la realizzazione di tali manufatti, pur presentando una notevole problematica. Il Berillio infatti è un elemento che tende facilmente a diffondere all'interno dei materiali con i quali sia posto a contatto, dando vita solitamente a composti fragili con quasi ogni elemento e minando perciò le ottime qualità espresse dalla lega a base di Rame in termini di resistenza alle sollecitazioni.

Dal momento che tali assemblati sono costituiti da piastrelle di Berillio pressate isostaticamente a caldo su lamine di Rame, la migliore soluzione è stata ricorrere all'interposizione di una o più lamine di altri materiali in grado di fungere da barriera diffusiva nei confronti del Berillio stesso in modo tale che non possa formare alcun composto di natura fragile. Si è dunque ricorsi principalmente a tre tipologie di assemblati:

1) **Modello di tipo A: = giunzione Rame e Berillio con interstrato libero**

Questo tipo di modello rappresenta la situazione di partenza in cui tra le lamine di Rame e le piastrelle di Berillio non veniva interposto alcun materiale in modo tale da bloccarne la diffusione e la reciproca contaminazione.

Con questa soluzione il Berillio non trova alcun ostacolo alla propria diffusione: le analisi ai raggi X confermano la formazione di composti quali ad esempio Cu_2Be e CuBe_2 .

2) **Modello di tipo B: = giunzione Rame e Berillio con interstrato in Cromo e Titanio**

Questa soluzione, pur riuscendo a bloccare la diffusione del Berillio nel Rame, non è in grado di fermare la diffusione del Cromo ed anche del Rame all'interno della lamina di Titanio a causa delle quali si ha la formazione di composti quali Cr_2Ti ed altri con la presenza di Berillio di ancora non chiara identificazione.

3) **Modello di tipo C: = giunzione Rame e Berillio con interstrato di Alluminio**

Diverse analisi condotte confermano che anche in questo caso la barriera interposta tra il Berillio ed il Rame non è in grado di assolvere in maniera completa al proprio compito: se da

un lato la diffusione di Berillio all'interno del Rame viene arginata, altri sono i composti di natura fragile che comunque si originano, quali ad esempio AlCu_2 e Be Cu_2 .

La seconda tipologia di assemblato sembra aver riscosso negli ultimi anni i migliori consensi, tanto che su di essa si sono concentrati gli sforzi di numerosi ricercatori al fine di migliorarne la capacità di resistenza alle sollecitazioni indotte dagli stress termici. Tale modello vede infatti tra le proprie principali applicazioni quella di essere adottata nella realizzazione di moduli di prima parete per termoreattori nucleari.

L'immagine sotto riportata (fig. 11.4.1) rappresenta due delle possibili alternative di assemblato di tipo B che sono state sottoposte a prove di fatica termica accelerata al fine di poterne testare la resistenza che, come abbiamo già accennato, è strettamente correlata alla capacità degli interstrati di fungere da barriera alla diffusione del Berillio in modo da evitare la formazione di composti fragili.

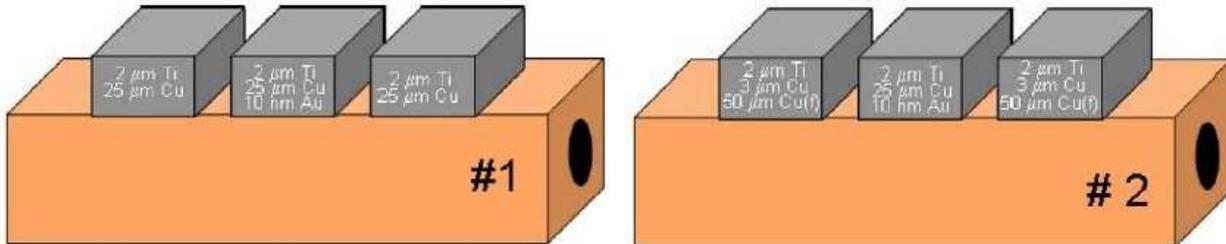
Nel dettaglio:

- **il modello 1:** è costituito da un interstrato di Titanio dello spessore di $2 \mu\text{m}$ che poggia su una lamina di Rame dello spessore di $25 \mu\text{m}$, che viene attentamente pulita da eventuali formazioni osside prima di venire metallizzata superficialmente con 10 nm di Oro. Alla conclusione di questi passaggi le lamine sono state assemblate insieme in una camera a pressatura isostatica a caldo (HIP).
- **Il modello 2:** è costituito da una lamina di Titanio dello spessore sempre di $2 \mu\text{m}$ poggiante su una piastrina di Rame dello spessore di $50 \mu\text{m}$, anch'essa dapprima pulita da eventuali ossidi e quindi metallizzata con 10 nm di Oro, così da poter essere saldata con le altre lamine tramite pressatura isostatica a caldo.

L'immagine dà una rappresentazione delle possibili tipologie di assemblati laminari che si possono originare combinando tra loro le possibili opzioni in termini di spessore dei vari elementi: in tal modo è stato possibile con poche prove ed identici parametri “ambientali” individuare quale fosse la migliore soluzione.

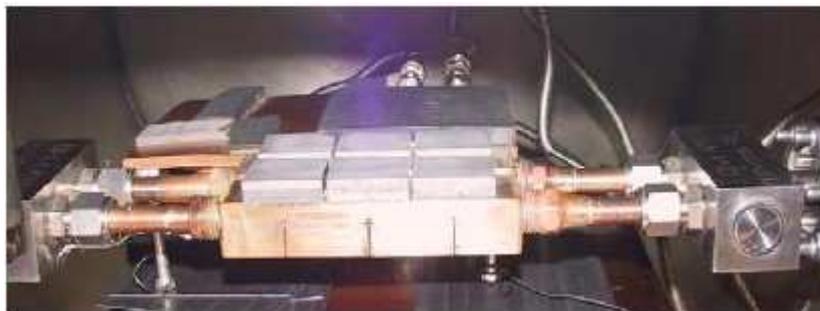
Come si può osservare entrambi i componenti poggiano su un substrato in lega di Rame (Cu Cr Zr) attraversato da cilindro cavo attraverso cui convoglierà l'acqua di raffreddamento del sistema di prima parete del termoreattore.

Fig. 11.4.1.: l'esperimento analizza vari schemi di interstrati. La qualità del materiale ed il relativo spessore usato come interstrato appaiono indicati sulla superficie laterale della piastrina. La notazione (f) indica l'utilizzo di una lamina piuttosto che l'apposizione del medesimo materiale attraverso tecniche di vaporizzazione.



Il test di fatica termica cui sono stati sottoposti hanno cercato di ricreare le condizioni limite in termini di stress termici propri di un termoreattore nucleare. Per raggiungere questo scopo i due modelli di assemblati laminari sono stati inseriti all'interno di una camera a vuoto e colpiti dal fascio elettronico emesso da un cannone elettronico: il flusso di calore fornito è stato di $1,5 \text{ MW} / \text{m}^2$, utilizzando $0,55 \text{ A}$ di corrente a 20 n KeV . All'interno del canale di raffreddamento è stata fatta scorrere acqua ad una pressione di 1 MPa , a temperatura $T_0 = 20 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e ad una velocità di flusso di $2,4 \text{ m/s}$.

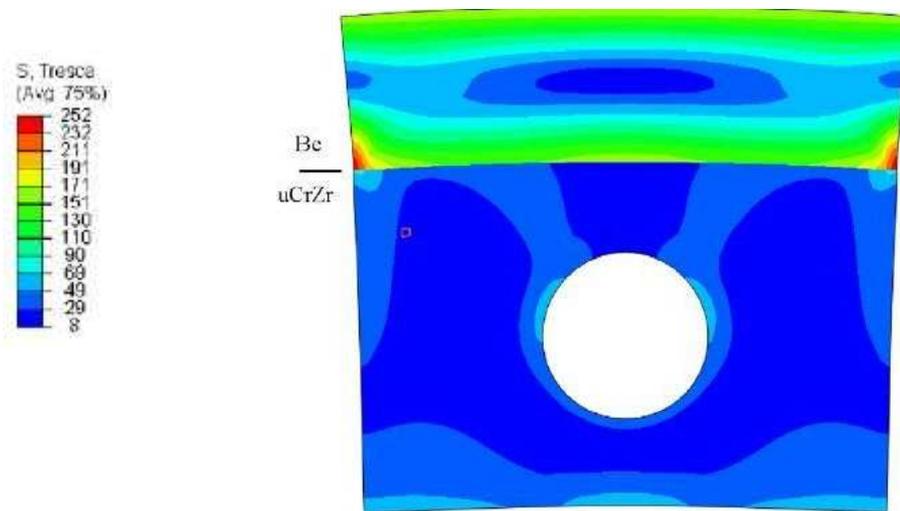
Fig. 11.4.2: modello di doppio modello di assemblato utilizzato in laboratorio in grado di far correre continuamente la corrente da un assemblato all'altro.



Questo insieme di condizioni ha riprodotto lo stesso gradiente termico e lo stato di tensioni all'interfaccia $\text{Be} / \text{CuCrZr}$ in un tempo ciclo di 30 secondi pari a quello riscontrabile nella prima parete del termoreattore, ma solo dopo 60 secondi di tempo ciclo e con flusso termico di $0,5 \text{ MW} / \text{m}^2$, consentendo un estremo accorciamento dei tempi ciclo adottati.

I risultati ottenuti hanno indicato che le sollecitazioni all'interfaccia Cu / CuCrZr hanno avuto un'intensità pari a 150 MPa come indicato (fig. 11.4.5). Questo valore è di circa il 50 % più alto di quello che si avrebbe sui moduli di prima parete per un flusso termico pari a $0,7 \text{ MW} / \text{m}^2$, per cui si è potuto procedere ad un ulteriore incremento fino a $0,875 \text{ MW} / \text{m}^2$ al fine di testare i moduli su condizioni limite ancora più esasperate al fine di massimizzarne la sicurezza in caso di impiego.

Fig. 11.4.5: la distribuzione delle tensioni all'interno del Berillio al termine di un ciclo di riscaldamento di 30 s ad $1,5 \text{ MW} / \text{m}^2$ presenta punti di singolarità computazionale agli angoli inferiori.



Nelle tabelle che seguono sono riportati i valori ottenuti dai test di fatica accelerata: come si può notare le tensioni nella lega di Rame variano tra i 60 MPa ed i 100 MPa, mentre le tensioni all'interfaccia Rame-Berillio nel Berillio è inferiore ai due terzi del carico di snervamento, manifestando dunque una condizione di sicurezza in caso di utilizzo di tali modelli.

Tabella 11.4.1: condizioni proposte per i test di fatica accelerata.

Durata dei tempi ciclo	30s on / 30s off
Temperatura dell'acqua in entrata	25 °C
Pressione dell'acqua in entrata	1 MPa
Flusso del calore	$1,5 \text{ MW} / \text{m}^2$

Tabella 11.4.2: le temperature alla fine dei cicli di riscaldamento e di raffreddamento.

Temperature di confronto	FWQM a 0,7 MW / m²	Be / Cu a 1,5 MW / m²
T di fine riscaldamento *	227 ° C	168 ° C
T di fine ciclo di riscaldamento *	127 ° C	40 ° C
T di fine di riscaldamento **	282 ° C	280 ° C

*: = calcolata al centro ed alla interfaccia Cu-Be.

** : = sulla superficie superiore della piastrina di Berillio.

***: = FWQM è la sigla con cui si indicano i moduli di prima parete dei termoreattori nucleari.

Tabella 11.4.3: = sulla comparazione delle tensioni Tresca

Tensioni a confronto	FWQM a 0,7 MW / m²	Be / Cu a 1,5 MW / m²
Fine del riscaldamento *	103 MPa	150 MPa
Fine del ciclo di riscaldamento **	45 MPa	7,9 MPa

*: = calcolata al centro ed alla interfaccia Cu Be.

** : = calcolata al centro, vicino alla interfaccia Cu Be.

Dall'insieme di dati raccolti con tale ricerca è emerso un quadro ottimale riferito al possibile impiego di questi due modelli di assemblati laminari: entrambi sono resistiti in maniera ottimale a 1000 cicli senza proporre significativi cambiamenti nella risposta, manifestando un comportamento stabile nel tempo. Indagando anche con microscopio ottico i due diversi assemblati, è comunque possibile notare la formazioni di composti intermetallici quali CuTi e Ti₂Cu formatisi durante il processo di pressatura isostatica a caldo con la operazione di saldatura. Analisi ultrasoniche hanno inoltre rilevato la presenza di anomalie acustiche, corrispondenti a zone non perfettamente saldate nella giunzione Cu / CuCrZr, riconducibili però a difetti già presenti in fase di fabbricazione e quindi non attribuibili agli stress termici indotti dalle prove. La natura degli interstrati preposti come barriera diffusiva al fine di limitare la formazione di composti fragili è dunque risultata ottimale.

Bibliografia

“Beryllium Copper and Other Beryllium-Containing Alloys” di John C. Harkness, William D. Spiegelberg, e W. Raymond Cribb, Brush Wellman Inc. da *Specific Metal and Alloys* (pag.403-423).

“Study on the microstructure and mechanical properties of Nd:YAG pulsed laser beam weld of UNS-C17200 copper beryllium alloy” di S.A.A. Akbari Mousavi, S.T. Niknejad dal *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010), (pag.1472-1481).

“An experimental study on electro-discharge machining and polishing of high strength copper±beryllium alloys” di J.C. Rebelo, A. MoraÄo Dias, Ruy Mesquita, Paulo Vassalo, MaÄrio Santos dal *Journal of Materials Processing Technology* 103 (2000), (pag.389-397).

“Copper–beryllium metal fiber brushes in high current density sliding electrical contacts” di Nicolas Argibay, Jason A. Bares, James H. Keith, Gerald R. Bourne, W. Gregory Sawyer dal *Wear* 268 (2010), (pag.1230–1236).

“Corrosion studies of a copper–beryllium alloy in a simulated polymer electrolyte membrane fuel cell environment” di Vaibhav V. Nikam, Ramana G. Reddy dal *Journal of Power Sources* 152 (2005), (pag. 146–155).

“Oxidizing mechanism of beryllium-copper in alkaline solution” di H. Kuroki, H. Kawaray da *Applied Surface Science* 203-204 (2003), (pag. 867-870).

“High-strain-rate testing of beryllium copper at elevated temperatures” di M.F. Quinlan, M.T. Hillery dal *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004), (pag.1051–1057).

“Examination of Be//Cu joints in hipped Be tiles by using Ion Beam Analysis methods” di E. De Vito, H. Khodja, C. Cayron, P. Lorenzetto da *Fusion Engineering and Design* 82 (2007), (pag.1671–1680).

“Thermal fatigue cycling of Be/Cu joining mock-ups” di D.L. Youchison, S.H. Goods, J.D. Puskar, W.A. DeLong, T.T. Martin, M. Narula, A. Ying, M.A. Ulrickson, T.J. Lutz, J.M. McDonald da *Fusion Engineering and Design* 84 (2009), (pag.2008–2014).

“Corrosion behaviour of Al–Cu–Fe alloys containing a quasicrystalline phase” di Elina Hutunen-Saarivirta, Tuomo Tiainen da *Materials Chemistry and Physics* 85 (2004), (pag. 383–395).

“The corrosion behavior of Cu–Al and Cu–Al–Be shape-memory alloys in 0.5 M H₂SO₄ solution” di H.H. Kuo, W.H. Wang, Y.F. Hsu, C.A. Huang da *Corrosion Science* 48 (2006), (pag.4352–4364).

“Machining Characteristics and Fracture Morphologies in a Copper-Beryllium (Cu-2Be) Alloy” di K.V. Sudhakar, J.C. Cisneros, Hector Cervantes, and Cosme Gomez Pineda da *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 15(1) February 2006, (pag. 117-121).

“Fracture characterization of welded copper-beryllium alloy” di S. Zalkind, D. Moreno da Journal of Materials Science Letters 18 (1999), (pag.849– 852).

“Over-Aging Effect on Fracture Toughness of Beryllium Copper Alloy C17200” di Kei-Peng Jen, Liqun Xu, Steven Hylinski, and Nate Gildersleeve da Journal of Materials Engineering and Performance Volume 17(5) October 2008, (pag.714-724).

“Beryllium Copper” di CDA Publication No 54, 1962, (pag.1-50).

“Copper Beryllium health and safety notes” della Copper Development Association, Publication 104, (pag.1-2).