



6. LEGHE DI COBALTO PER APPLICAZIONI BIOMEDICALI

6.1. Introduzione

Esistono sostanzialmente quattro tipologie di leghe a base di cobalto normalmente impiegate nell'ambito delle applicazioni biomedicali, in particolare per la realizzazione di impianti chirurgici:

- Lega CoCrMo (F76);
- Lega CoCrWNi (F90);
- Lega CoNiCrMo (F562);
- Lega CoNiCrMoWFe (F563).

La lega F76 viene generalmente lavorata con metodi di colata/fusione, mentre le leghe F90, F562 e F563 vengono solitamente lavorate con utensili o per forgiatura. In tabella 6.1.1 viene riportata la composizione chimica di ciascuna delle precedenti leghe.

	Cast CoCrMo (F76)		Wrought CoCrWNi (F90)		Wrought CoNiCrMo (F562)		Wrought CoNiCrMoWFe (F563)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Cr	27.0	30.0	19.0	21.0	19.0	21.0	18.00	22.00
Mo	5.0	7.0	—	—	9.0	10.5	3.00	4.00
Ni	—	2.5	9.0	11.0	33.0	37.0	15.00	25.00
Fe	—	0.75	—	3.0	—	1.0	4.00	6.00
C	—	0.35	0.05	0.15	—	0.025	—	0.05
Si	—	1.00	—	1.00	—	0.15	—	0.50
Mn	—	1.00	—	2.00	—	0.15	—	1.00
W	—	—	14.0	16.0	—	—	3.00	4.00
P	—	—	—	—	—	0.015	—	—
S	—	—	—	—	—	0.010	—	0.010
Ti	—	—	—	—	—	1.0	0.50	3.50
Co	Balance							

Tab. 6.1.1. Composizione chimica delle leghe di cobalto impiegate per realizzare impianti chirurgici.

Attualmente, solamente due delle quattro leghe vengono impiegate intensivamente per la realizzazione di impianti chirurgici, ossia la lega CoCrMo e la lega CoNiCrMo. L'impiego degli altri due tipi di lega risulta abbastanza marginale.

I due principali elementi costitutivi delle leghe a base di cobalto, ossia il cobalto e il cromo, formano una soluzione solida solo per percentuali in peso di Cr inferiori al 35%, come è possibile osservare dal diagramma di stato Co-Cr riportato in figura 6.1.1.

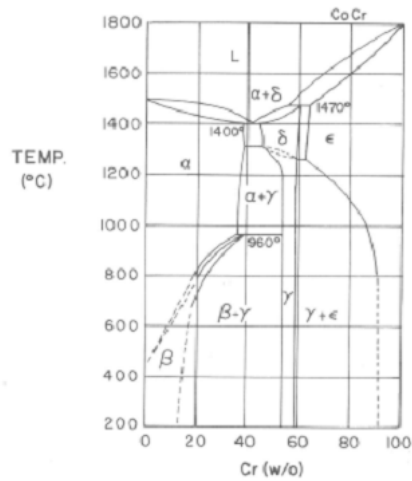


Fig. 6.1.1. Diagramma di stato Co - Cr.

L'aggiunta del molibdeno permette l'ottenimento di una grana fina che a sua volta si traduce in un'elevata resistenza meccanica delle leghe anche dopo il processo di colata o di forgiatura.

La lega CoNiCrMo presenta un'elevata resistenza alla corrosione, anche in presenza di cloruri e sotto sforzo. Inoltre, la lavorazione a freddo ed il conseguente incrudimento possono aumentare considerevolmente la resistenza meccanica di tale lega, come viene messo in evidenza nel grafico di figura 6.1.2.

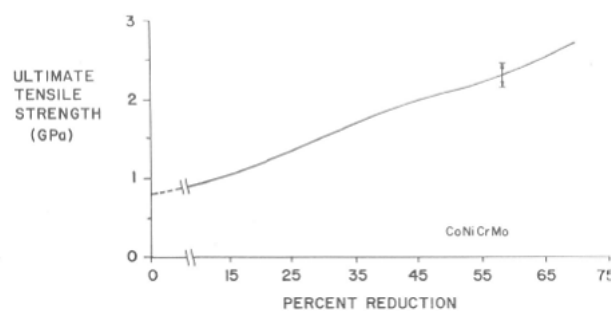


Fig. 6.1.2. Andamento della resistenza ultima (UTS) della lega CoNiCrMo in funzione dell'ammontare di incrudimento.

Tuttavia esistono notevoli difficoltà correlate alla lavorazione a freddo della lega F562, in particolare per la realizzazione di grossi componenti, come gli steli per le protesi d'anca. Solamente il processo di forgiatura a caldo permette di lavorare la lega senza grosse difficoltà.

Un altro metodo per incrementare le proprietà resistenziali, utilizzato in particolare per la lega CoCrMo, è rappresentato dalla pressatura isostatica a caldo (*hot isostatic pressing*), effettuata una volta che la lega sia stata "atomizzata" sotto forma di piccolissime particelle in un'apposita camera (figura 6.1.3).

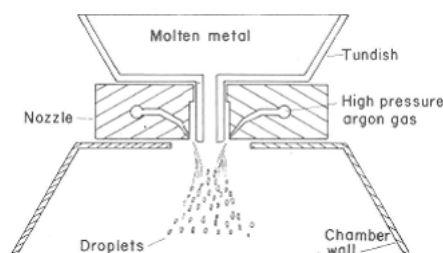


Fig. 6.1.3. Processo di atomizzazione della lega CoCrMo.

Le particelle ottenute per mezzo dell'atomizzazione, vengono poi setacciate per ottenere una distribuzione granulometrica uniforme ed inserite infine in una camera di pressatura isostatica a caldo (figura 6.1.4). La temperatura della camera è inferiore rispetto alla temperatura di fusione della lega.

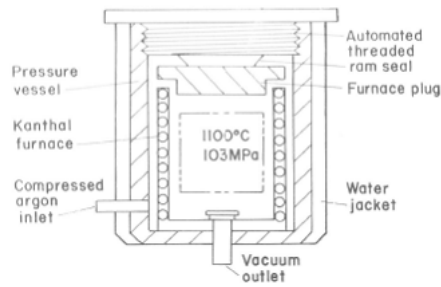


Fig. 6.1.4. Camera di pressatura isostatica a caldo.

Il legame che si stabilisce tra le varie particelle, dovuto all'innescarsi di fenomeni di diffusione allo stato solido, porta alla formazione di una grana molto fina, come mostrato in figura 6.1.5.

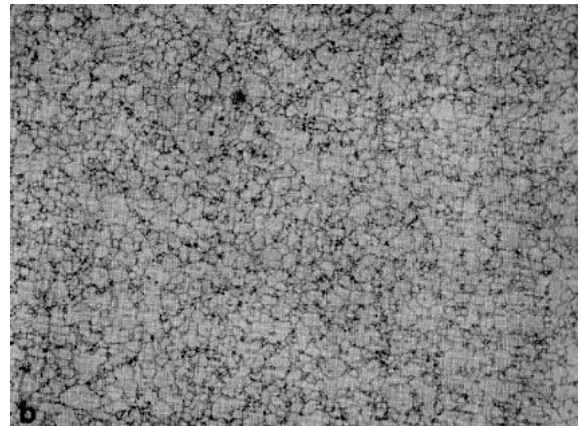
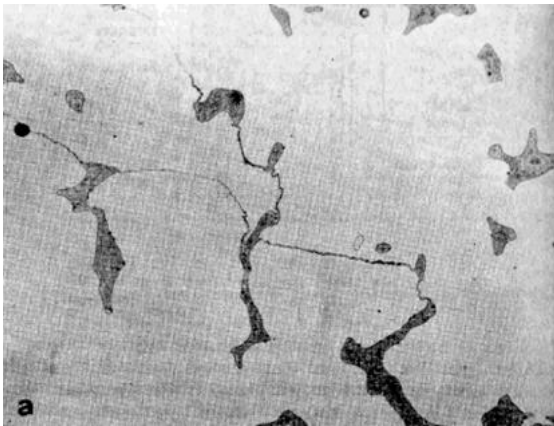


Fig. 6.1.5. Microstruttura della lega CoCrMo ottenuta per: a) colata (500x), b) pressatura isostatica a caldo (500x).

Per quanto riguarda la lega CoNiCrMo, nella soluzione solida omogenea in condizioni di completa ricottura è possibile osservare una struttura austenitica caratterizzata da un reticolo cubico a facce centrate (figura 6.1.6a). Questa struttura si mantiene anche in seguito a forgiatura a caldo realizzata a temperatura superiore a 650°C , con la differenza che i grani risultano allungati (figura 6.1.6b).

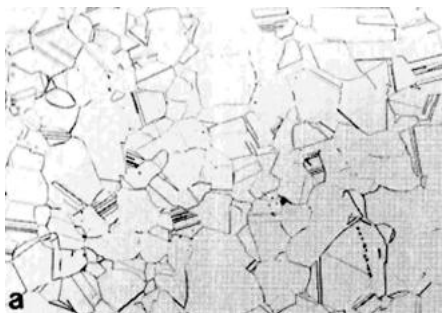


Fig. 6.1.6. Microstruttura della lega CoNiCrMo: a) condizioni di soluzione solida omogenea, grani austenitici completamente ricristallizzati (500x), b) dopo forgiatura a caldo (500x).

Le caratteristiche di usura delle CoCrMo e CoNiCrMo sono simili, ma quest'ultima presenta coefficienti di attrito superiori, sia per quanto riguarda accoppiamenti con se stessa, sia con altri materiali. Per questo motivo, l'utilizzo di tale lega è sconsigliato nel caso si debbano avere zone superficiali di contatto di protesi di giuntura. La lega CoNiCrMo presenta tuttavia una maggiore resistenza a fatica rispetto alla lega CoCrMo. In tabella 6.1.2 vengono mostrate le principali proprietà meccaniche delle leghe a base di cobalto per applicazioni in dispositivi impiantabili.

Proprietà	F75	F90	F563	F562
Densità di massa [g/cm ³]	7.8 f 9.15 lf			
Modulo di Young [GPa]	195	210	195	195
Sforzo per 0.2% di deformazione plastica [MPa]	450 g 890 f	310 t	276	240 t 1585 lf
Sforzo a rottura [MPa]	65 g 1400 f	860 t	600 t 827 lf	795 t 1790 lf
Allungamento a rottura [%]	8 g 28 g	30 t	50 t 18lf	50 t 8 lf

Tab. 6.1.2. Principali proprietà meccaniche di leghe di cobalto per applicazione in dispositivi impiantabili (t = temprato, f = forgiato, lf = lavorato a freddo, g = in getto).

6.2. Produzione delle leghe Co-Cr

Si è visto che le leghe cobalto-cromo possono essere sostanzialmente suddivise in due categorie in base alla tecnologia di produzione:

1. leghe Co-Cr colate;
2. leghe Co-Cr lavorate (all'utensile o per forgiatura).

Entrambi le tipologie di leghe contengono più del 20% in peso di cromo, che fornisce un'ottima resistenza alla corrosione grazie alla formazione di uno strato di ossido passivante superficiale.

Le leghe ottenute per colata contengono una piccola percentuale di carbonio (0,35-0,5% in peso) che ha lo scopo di aumentare la loro "colabilità" abbassando la temperatura di fusione da 1450-1500°C (tipica del sistema binario Co-Cr) a 1350°C. Normalmente tali leghe vengono formate con il processo di "investment casting" (o "colata a cera persa"). Per incrementare la qualità del prodotto è possibile eseguire il processo di fusione e colata sotto vuoto. In questo caso si ha un incremento dei costi ma è possibile ridurre la porosità ed evitare la formazione di ossidi. Una schematizzazione di quest'ultimo processo è riportata in figura 6.2.1.

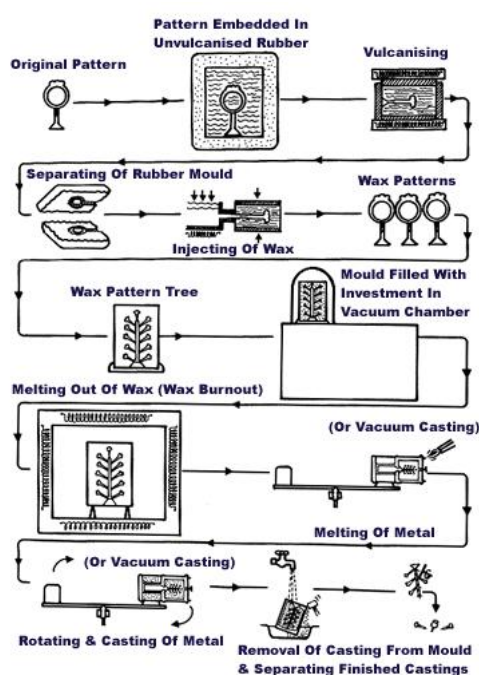


Fig. 6.2.1. Schematizzazione del processo di colata a cera persa sotto vuoto.

La più bassa temperatura di fusione dovuta all'aggiunta di carbonio permette la formazione di una grana fina e consente di ridurre la temperatura iniziale dello stampo da 1000 a 900°C. La temperatura di colata varia all'interno dell'intervallo 1350-1450°C a seconda della composizione della lega.

La microstruttura di colata consiste in una matrice dendritica contenente dei carburi dispersi ($M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C , dove $M = Co, Cr, Mo$) e altri composti intermetallici. Dopo il semplice trattamento di colata, le leghe presentano una ridotta resistenza e duttilità. Di conseguenza si rende necessaria l'esecuzione di un trattamento termico condotto a 1210-1250°C, che permetta la completa dissoluzione dei carburi all'interno della matrice. La dissoluzione dei carburi porta alla formazione di elementi che rafforzano per soluzione solida la matrice. Per non ottenere un'eccessiva crescita dei grani, si evita di disciogliere completamente i carburi. Queste poche particelle residue si localizzano a bordo grano esercitando un effetto di "pinning" (= ancoraggio) sullo stesso.

Un'altra via per ottenere pezzi "near net shape" consiste nell'utilizzare la metallurgia delle polveri. La compattazione delle polveri avviene mediante pressatura isostatica a caldo (HIP), applicando una pressione di circa 10000 MPa ed una temperatura di 1100°C. A causa del costo relativamente elevato di questa metodologia di produzione, essa viene impiegata esclusivamente per i componenti che debbano resistere a carichi molto elevati, come ad esempio le protesi di steli femorali.

Le leghe Co-Cr lavorate sono caratterizzate da un minore contenuto di cromo rispetto alle leghe Co-Cr per colata, generalmente compreso tra il 19 e il 21% in peso. In tali leghe parte del cromo è sostituito dal molibdeno o dal tungsteno. Al fine di stabilizzare la fase fcc è inoltre necessario un certo contenuto di nickel, ferro o manganese. A causa dell'elevata resistenza di queste leghe, anche alle elevate temperature, è necessario applicare sollecitazioni molto elevate durante il processo di forgiatura. Per ottenere deformazione plastica, le leghe Co-Cr lavorate devono essere sottoposte a ricottura ("annealing") per ottenere una struttura fcc che possa essere mantenuta anche dopo il successivo raffreddamento a temperatura ambiente. La trasformazione hcp, che provoca un incremento delle proprietà meccaniche, può essere indotta mediante la deformazione meccanica impressa. Dopo la lavorazione a caldo (forgiatura), la microstruttura comprende una matrice cubica a facce centrate (fcc) contenente delle piccole piastrine con struttura esagonale compatta (hcp). Un ulteriore incremento delle proprietà meccaniche, in particolare della durezza, può essere ottenuto effettuando una lavorazione a freddo (che produce incrudimento) seguita da un invecchiamento condotto a 500-600°C per 1-4 ore. In tal modo si ottiene la precipitazione di particelle di Co_3Mo ed il conseguente aumento della durezza della lega.

La tabella 6.2.1 mostra l'influenza delle lavorazioni a caldo e dei trattamenti termici, mentre la tabella 6.2.2 mette in evidenza gli effetti sulle proprietà meccaniche delle leghe Co-Cr indotti dalle lavorazioni a freddo.

Trattamento	Resistenza a snervamento tensile [MPa]	Resistenza tensile ultima [MPa]	Rapporto sforzo di snervamento/resistenza tensile	Deformazione a rottura [%]
Colata	430-490	716-890	0,55-0,60	5-8
Ricottura di solubilizzazione (1230°C, 1h) + tempra in acqua	450-492	731-889	0,55-0,62	11-17
Ricottura di solubilizzazione + invecchiamento (650°C, 20h)	444-509	747-952	0,47-0,68	10-13,5
Colata ed estrusione (1200°C) + ricottura (1100°C, 2h)	731	945	0,77	17
Colata + forgiatura a caldo + rullatura (1175°C) + rullatura a freddo (10%) + 1050°C, 40 min + raffreddamento in aria	876	1360	0,64	19

Tab. 6.2.1. Influenza delle lavorazioni a caldo e dei trattamenti termici sulle proprietà meccaniche di una lega Co-Cr-Mo per colata.

Trattamento	Resistenza a snervamento tensile [MPa]	Resistenza tensile ultima [MPa]	Rapporto sforzo di snervamento/resistenza tensile	Deformazione a rottura [%]
Ricottura	450-650	950-1200	0,47-0,54	37-60

Lavorazione a freddo (17,5%)	1180	1350	0,87	22
Lavorazione a freddo (4%)	1610	1900	0,85	10
Lavorazione a freddo	1300	1520	0,85	-

Tab. 6.2.2. Influenza delle procedura di lavorazione a freddo sulle proprietà meccaniche della lega Co20Cr15W10Ni.

La lega Co20Cr35Ni10Mo è formata per forgiatura a caldo o rullatura a temperatura compresa tra 870 e 1125°C. Tale lega multifasica possiede un'elevata resistenza ed elevata duttilità. Generalmente dopo il processo di lavorazione a caldo viene fatta invecchiare ad una temperatura compresa tra 540 e 590°C. La tabella 6.2.3 evidenzia l'influenza che possono avere una deformazione od un trattamento termico sulle proprietà meccaniche di questa lega.

Trattamento	Resistenza a snervamento tensile [MPa]	Resistenza tensile ultima [MPa]	Rapporto sforzo di snervamento/resistenza tensile	Deformazione a rottura [%]
Ricottura (T > 1050°C)	300	800	0,37	40
Lavorazione a freddo (50%)	650	1000	0,65	20
Lavorazione a freddo (55%)	1413	1827	0,77	12
Lavorazione a freddo (55%) + invecchiamento + 538°C, 4h	1999	2068	0,97	10
Forgiatura (T > 650°C) al di sotto della temperatura di ricristallizzazione (950°C)	-	1300	-	-

Tab. 6.2.3 Influenza delle deformazioni o di trattamenti termici sulle proprietà meccaniche della lega Co20Cr35Ni10Mo.

6.3. Processi metallurgici per la produzione di leghe CoCrMo lavorate

Verranno ora affrontati in maniera un po' più approfondita i processi metallurgici per la produzione di leghe CoCrMo lavorate (wrought) da utilizzare nell'ambito biomedicale.

6.3.1. Introduzione

Per soddisfare i severi requisiti necessari per l'utilizzo biomedicale, la produzione delle leghe lavorate prevede una serie di stadi del tutto simili a quelli sviluppati per la produzione di superleghe da impiegare in settori particolarmente critici, come nel campo aeronautico.

La fusione per induzione sotto vuoto ("Vacuum induction melting" - VIM) è utilizzata per lo stadio iniziale di fusione, poiché permette di controllare con molta accuratezza la purezza e la composizione chimica della lega. Viene anche condotta una fusione secondaria, realizzata con il metodo "electroslag", con lo scopo di migliorare la pulizia della lega e la struttura dei lingotti. Tali lingotti possiedono in genere geometria cilindrica con diametro abbastanza ridotto (circa 30 - 45 cm di diametro), a causa delle ridotte dimensioni possedute dai prodotti finali e per minimizzare eventuali problemi di segregazione. Una volta prodotti, i lingotti vengono omogeneizzati, forgiati fino ad ottenere delle billette intermedie ed infine sottoposti a laminazione fino al raggiungimento delle dimensioni desiderate.

Le proprietà meccaniche della lega sono fortemente dipendenti dalla microstruttura e dalle condizioni di lavoro. Generalmente il prodotto finale risulta uniforme, con grani di dimensioni ridotte e contenente una piccola quantità di carburi e, occasionalmente, di fase sigma.

6.3.2. Fusione

Il processo di fusione primaria per le leghe a base di cobalto è rappresentato dalla fusione per induzione sotto vuoto (VIM).

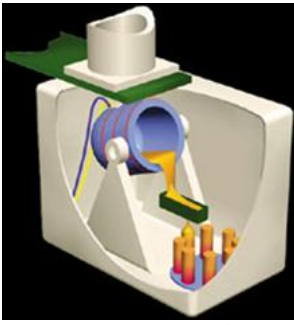


Fig. 6.3.2.1. Fusione VIM.

Le materie prime da sottoporre a fusione VIM devono essere selezionate molto attentamente. Tale processo ha una produttività molto inferiore rispetto ai processi di fusione mediante forno elettrico ad arco o convertitore. La produzione delle leghe CoCrMo è costituita di solito da materie prime vergini (recuperi interni o rottame acquilone). Le materie prime vengono portate a fusione all'interno di un crogiuolo rivestito in refrattario e posto all'interno di una camera a vuoto dell'ordine di $10^{-1} - 10^{-2}$ Pa). La raffinazione del fuso avviene per mezzo dell'insufflaggio di ossigeno, per evaporazione e in alcuni casi per reazioni tra scoria e metallo. Il tenore degli elementi indesiderati, come l'ossigeno e lo zolfo, viene portato a livelli molto bassi (< 30 ppm).

Una volta terminato il processo di affinazione, vengono fatte le ultime aggiunte e vengono prelevati dei campioni per l'analisi chimica. Piccole aggiunte di materie prime possono servire per aggiustare la composizione prima di effettuare il processo di colata. Le leghe CoCrMo tipicamente contengono anche un discreto tenore di azoto.

La rifusione "electroslag" (ESR) è il tipico processo di fusione secondaria utilizzato per incrementare la pulizia e l'omogeneità chimica e strutturale delle leghe a base di cobalto. La fusione della lega viene realizzata per mezzo di un elettrodo, dalla cui punta scocca un arco elettrico che fornisce il calore necessario per l'operazione. Al di sopra del metallo fuso vi è uno strato di scoria, tipicamente a base di CaF_2 - $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, che permette di controllare la concentrazione di diversi elementi della lega. Sperimentalmente si è riscontrato che il processo ESR è particolarmente efficace per rimuovere le inclusioni a base di ossidi formati a seguito del processo di fusione primaria (VIM). Talvolta l'ESR può portare anche a desolfurazione del metallo base.

In figura 6.3.2.2 è riportato uno schema riassuntivo del processo di produzione delle leghe CoCrMo lavorate.

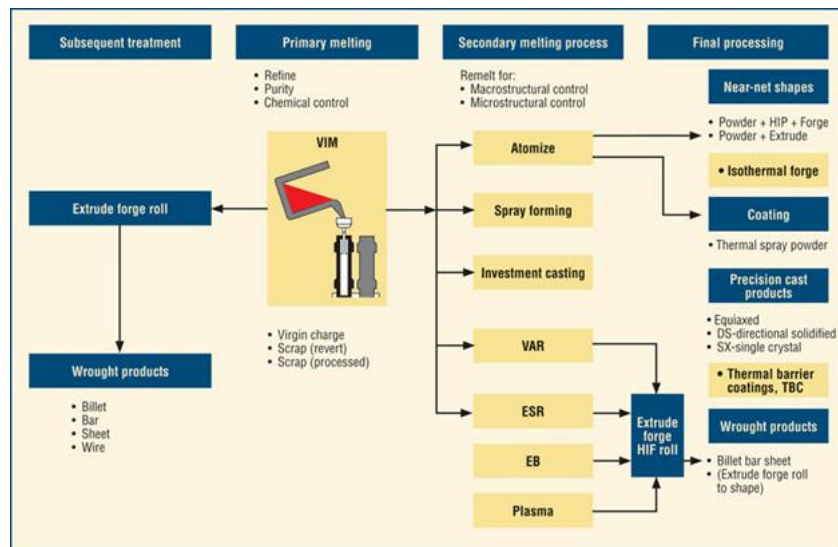


Fig. 6.3.2.2. Schematizzazione dei processi metallurgici per la produzione di leghe CoCrMo lavorate.

6.3.3. Processi termo-meccanici

Una volta solidificati, i lingotti possono essere affetti da fenomeni segregativi (soprattutto micro segregazione). Per questo motivo è necessario per prima cosa sottoporli a trattamento di omogeneizzazione. Successivamente viene effettuata una prima forgiatura a caldo ($T = 925 - 1190^\circ\text{C}$) per ottenere billette con diametro di 10 - 12 cm. Tale processo conduce inoltre ad una ricristallizzazione ed all'ottenimento di una struttura cristallina relativamente fina. Per evitare l'insorgere di difetti o cricche superficiali durante le successive lavorazioni, vengono eseguiti su ciascuna billetta dei trattamenti superficiali ("peeling" o "grinding"). A questo punto le billette possono essere ispezionate per rilevare eventuali difetti interni, ad esempio per mezzo della tecnica ad ultrasuoni.

I pezzi vengono portati alle dimensioni finali mediante laminazione a caldo. Il profilo di temperatura durante tale operazione può essere variato

agendo sulla temperatura della billetta prima dell'ingresso in laminatoio, sulla velocità di laminazione e utilizzando un sistema di raffreddamento a getti d'acqua. La laminazione permette di passare da billette con diametro di 10 - 12 cm a barre dritte con diametro variabile da 1 a 8 cm o fili avvolti su bobine con diametro da 0,5 a 2.5 cm. Il raffreddamento può avvenire per semplice contatto con l'aria o mediante tempra in acqua.

6.3.4. Finitura e ispezione:

Il prodotto in uscita dal laminatoio viene tagliato con delle cesoie, privato dello strato superficiale più esterno e sottoposto a trattamento termico. Tipicamente per essere sicuri di rimuovere la maggior parte dei difetti superficiali provenienti dalla laminazione, si rimuove uno strato di circa 2,5 - 17 mm. Esistono svariati metodi di ispezione per la valutazione della qualità del prodotto finale. I più utilizzati riguardano l'utilizzo di liquidi penetranti fluorescenti o l'analisi agli ultrasuoni.

6.3.5. Trattamenti termici e proprietà:

Le leghe di cobalto CoCrMo lavorate vengono prodotte con due distinte composizioni chimiche che si differenziano unicamente per il contenuto di carbonio (tabella 6.3.5.1.).

Element, wt%	Low Carbon	High Carbon
Cobalt	Bal.	Bal.
Chromium	27.7	27.7
Molybdenum	5.7	5.7
Manganese	0.7	0.7
Iron	0.5	0.5
Nickel	0.7	0.7
Silicon	0.7	0.7
Nitrogen	0.18	0.18
Carbon	0.05	0.25

Tab. 6.3.5.1. Composizione chimica delle leghe CoCrMo "wrought" a basso e ad alto tenore di carbonio.

La composizione ad elevato tenore di carbonio è utilizzata principalmente per impianti riguardanti periferiche "metallo su metallo", dove la bassa duttilità è un requisito fondamentale per limitare la formazione di cricche durante le operazioni di lavorazione a caldo. Tali leghe vengono solitamente prodotte con le convenzionali tecniche metallurgiche; in alcuni casi è tuttavia possibile realizzarle per metallurgia delle polveri. Le proprietà meccaniche delle leghe CoCrMo sono fortemente dipendenti dal processo di lavorazione subito. La figura 6.3.5.1 evidenzia la dipendenza delle proprietà meccaniche di una lega CoCrMo a ridotto tenore di carbonio dalla temperatura e dalla percentuale di riduzione indotta dalla laminazione.

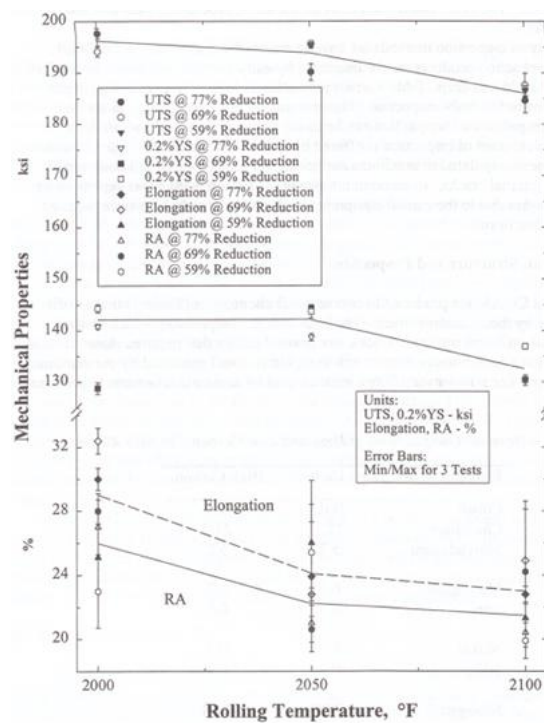


Fig. 6.3.5.1. Dipendenza delle proprietà meccaniche di una lega CoCrMo a ridotto tenore di carbonio dalla percentuale di riduzione e dalla temperatura.

Si nota facilmente come le proprietà meccaniche siano fortemente dipendenti dalla percentuale di riduzione imposta alla billetta, mentre sono influenzate relativamente poco dalla temperatura, per l'intervallo considerato (1090 - 1150°C).

Le leghe ad alto tenore di carbonio evidenziano un comportamento simile, ma sono più sensibili alla formazione di carburi in corrispondenza del bordo grano, soprattutto alle temperature più elevate, dove il carbonio si trova solo parzialmente in soluzione.

In tabella 6.3.5.2 vengono confrontate le proprietà meccaniche (intervallo di confidenza al 95%) di barre circolari con diametro pari ad un pollice (2,54 cm) ottenute per laminazione continua. (1 ksi = 6,895 MPa).

Condition	Ultimate Tensile Strength, ksi	0.2% Yield Strength, ksi	Elongation, %	Reduction in Area, %
Low Carbon – Annealed	162.6 ±2.8	88.6 ±1.7	28.5 ±2.0	24.1 ±1.2
Low Carbon – Warm Worked	194.1 ±1.0	146.5 ±1.2	21.4 ±0.5	19.2 ±0.4
High Carbon – Warm Worked	193.5 ±1.0	146.7 ±1.3	15.2 ±0.8	13.7 ±0.9
ASTM F 1537 Specification				
Annealed	130	75	20	20
Hot Worked	145	101	12	12
Warm Worked	170	120	12	12

Tab. 6.3.5.2. Proprietà meccaniche di barre in lega CoCrMo con diversa composizione e sottoposti a diversi trattamenti.

Le proprietà meccaniche di tali barre superano di gran lunga i livelli minimi fissati dalla normativa ASTM F 1537.

La lega ad alto contenuto di carbonio possiede la stessa resistenza ultima di quella a basso tenore di carbonio (in condizioni di lavorazione a caldo), tuttavia presenta una minore duttilità, sempre a causa del maggior numero di carburi precipitati a bordo grano. L'effetto della dimensione dei grani sulla resistenza della lega è governato dalle legge di Hall-Petch: la resistenza meccanica aumenta al diminuire della dimensione dei grani cristallini.

In figura 6.3.5.2 è mostrata l'influenza della temperatura di annealing sulle proprietà meccaniche di una lega CoCrMo a basso tenore di carbonio lavorata a caldo mentre nella figura 6.3.5.3 viene mostrata la micrografia di barre a basso tenore di carbonio lavorate a caldo o sottoposte ad annealing.

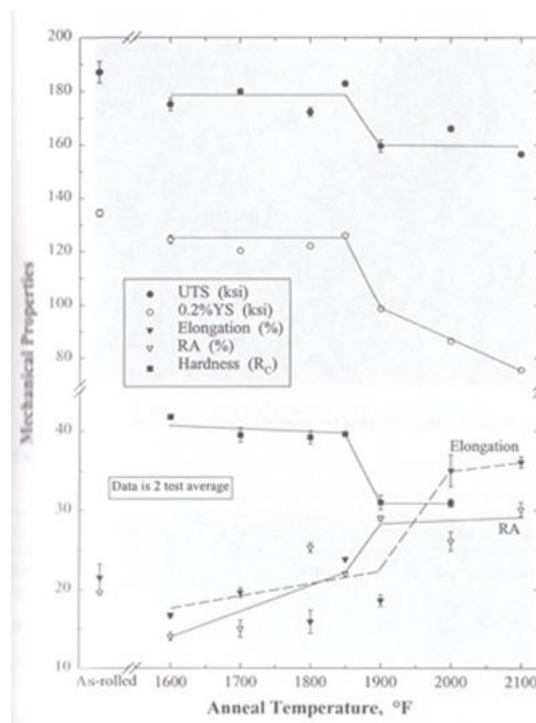


Fig. 6.3.5.2. Dipendenza delle proprietà meccaniche dalla temperatura di annealing.

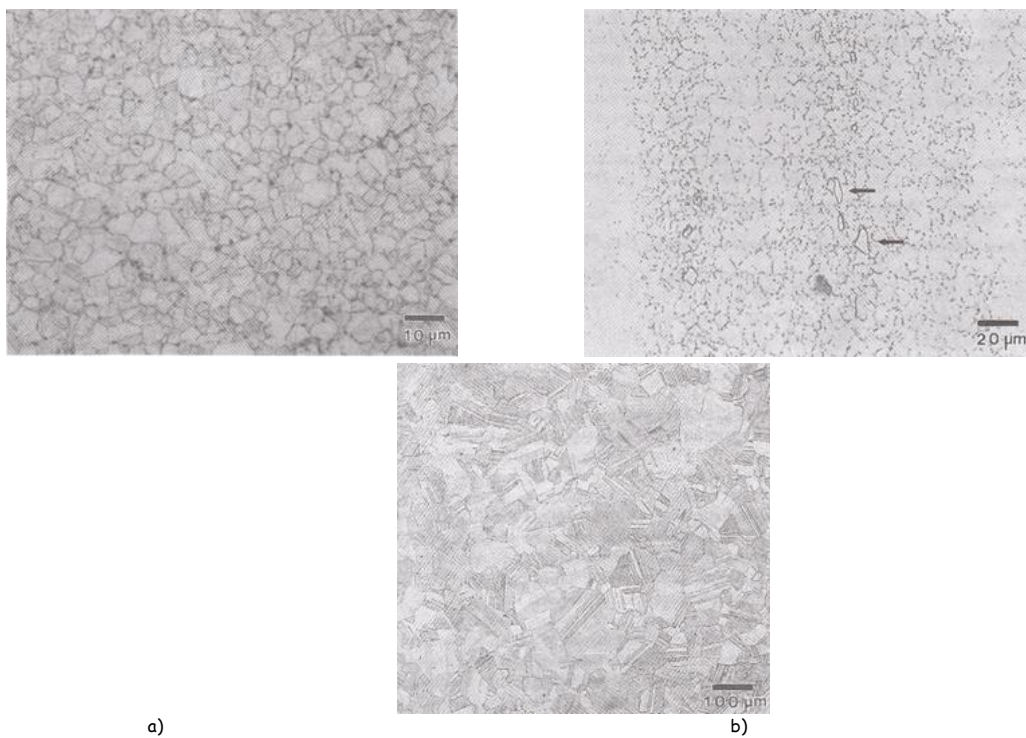


Fig. 6.3.5.3. Micrografia di barre in lega CoCrMo a basso tenore di carbonio: a) lavorata a caldo, b) lavorata a caldo, mettendo in evidenza i carburi e la fase sigma, c) sottoposta ad annealing.

6.4. Proprietà meccaniche delle principali leghe di cobalto

In tabella 6.4.1 sono riportate le principali proprietà meccaniche delle più comuni leghe di cobalto destinate all'utilizzo biomedicale.

	Wrought CoNiCrMoWFe (F563)							
	Cast CoCrMo (F76)	Wrought CoCrWNi (F90)	Wrought CoNiCrMo (F562)		Fully annealed	Cold-worked or cold-worked and aged		Cold-worked and aged extra hard
			Solution annealed	Cold-worked and aged		Medium hard	Hard	
Tensile strength (MPa)	655	860	795–1000	1790 ^b	600	1000	1310	1586
Yield strength (0.2% offset) (MPa)	450	310	240–655	1585 ^b	276	827	1172	1310
Elongation (%)	8	10	50.0	8.0	50	18	12	—
Reduction of area (%)	8	—	65.0	35.0	65	50	45	—
Fatigue strength ^c (MPa)	310, 793 ^d	—	—	—	340	400	500	400

Tab. 6.4.1. Proprietà meccaniche delle principali leghe di cobalto per utilizzo biomedicale.

L'elevata resistenza tensile della lega CoNiCrMo, unita all'elevata resistenza a cicli di fatica (non riportata in tabella 6.4.1), rendono tale lega particolarmente adatta alle applicazioni che richiedono elevati periodi di utilizzo senza che si verifichino fratture. Questo è ad esempio il caso degli steli per la realizzazione di protesi d'anca. La manutenzione di una protesi danneggiata creerebbe infatti non pochi problemi, sia dal punto di vista della difficoltà dell'operazione che dal punto di vista dei costi.

La resistenza alla corrosione è in generale elevata per qualunque tipologia di lega riportata nella tabella precedente.

Un altro aspetto interessante riguarda il confronto tra la velocità di rilascio di nickel in una soluzione di Ringer (soluzione salina fisiologica contenente 130 mEq di sodio, 4 mEq di potassio, 2,7 mEq di calcio, bilanciati da 109 mEq di cloruro e 28 mEq di lattato) a 37°C da parte della lega CoNiCrMo e di un acciaio inossidabile 316L. Nonostante la lega di cobalto abbia un rilascio iniziale di ioni di nickel nella soluzione molto maggiore rispetto all'acciaio, la velocità di rilascio dopo 5 giorni è circa la stessa ($3 \cdot 10^{-10}$ g/cm² al giorno) per entrambi i tipi di leghe, come mostrato in figura 6.4.1. Questo fatto risulta abbastanza sorprendente visto che il contenuto di nickel nella lega CoNiCrMo è circa il triplo rispetto a quello nell'acciaio inossidabile.

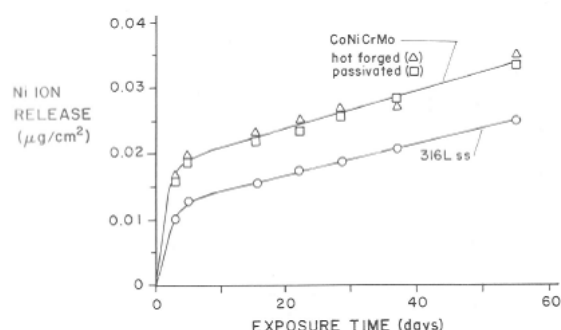


Fig. 6.4.1. Rilascio di ioni di nickel in funzione del tempo in una soluzione di Ringer a 37°C da parte della lega CoNiCrMo forgiata a caldo e passivata e dell'acciaio inossidabile 316L.

Merita attenzione anche il fatto che il modulo elastico delle leghe a base di cobalto non varia a seguito di cambiamenti della loro resistenza ultima. I valori di modulo sono compresi nell'intervallo tra i 220 e i 234 GPa (gli acciai inossidabili hanno modulo elastico solitamente compreso tra 200 e 210 GPa). Il modulo elastico di un impianto chirurgico ha un'importanza fondamentale, in quanto determina il modo in cui i carichi vengono trasferiti dall'impianto stesso alle ossa. La relazione che lega tale trasferimento dei carichi con la rigidità del materiale protesico non è tuttavia ancor bene definita.



