

Dott. E. Olzi (CNR - Milano)

"ESPERIENZE DEL CNR NELLA METALLURGIA DEL TITANIO.  
SUPERCONDUTTIVITA' "

Il nostro Istituto ha iniziato ad occuparsi di titanio alla fine degli anni '60 e all'inizio degli anni '70; è stata infatti organizzata a cura dell' Istituto una giornata sul titanio, alla FAST, nel 1972.

In tale periodo l'Istituto ha condotto parecchi studi sul titanio e sue leghe per applicazioni in materiali strutturali: sono stati fatti studi sulla ossidazione a caldo, sulla corrosione sotto sforzo, e sulla corrosione in fessura. Attualmente il nostro Istituto si occupa ancora di titanio, in due diversi settori: uno è il settore relativo ai materiali a memoria di forma, costituiti principalmente da leghe di nichel-titanio e l'altro riguarda materiali superconduttori.

Perciò che concerne i materiali a memoria di forma (leghe Ni-Ti), l'Istituto è in grado di produrre in via sperimentale lingotti di questa lega e di studiare il loro comportamento alla temperatura di transizione.

L'altro settore di cui ci occupiamo, invece, non riguarda materiali strutturali, sia pure in senso lato, bensì fibre superconduttrici e più in particolare, quelle a base di leghe niobio-titanio.

Queste leghe hanno applicazione industriale solo da poco tempo, e ciò è dovuto ad un certo disinteresse da parte dell'industria ai nuovi materiali e alle novità, disinteresse che si è verificato in passato per il titanio e più recentemente anche per la superconduttività.

Comunque attualmente si hanno già applicazioni pratiche delle fibre superconduttrici: infatti esiste una tecnica che dal punto di vista medico è eccezionale; si tratta della tomografia a risonanza magnetica nucleare a scopo diagnostico.

Tale tecnica offre possibilità relevantissime sia dal punto di vista della risoluzione delle immagini ottenibili rispetto al TAC tradizionale a raggi X, sia per la minore dannosità per il paziente; tale nuova tecnica si sta sviluppando notevolmente ed utilizza, nella maggior parte dei casi, magneti superconduttori.

Il magnete principale all'interno del quale viene posizionato il paziente è molto spesso un magnete superconduttore di grandi dimensioni, (foro utile ~ 60 cm e lunghezza ~ 2 m) avvolto con fibre a base di lega niobio - titanio.

Le fibre in lega niobio-titanio non sono i soli superconduttori esistenti ma, senza dubbio, sono gli unici usati per scopi pratici e senz'altro i più diffusi.

Il fenomeno "superconduttività" è noto fin dal 1911, anno in cui H.K. Onnes trovò che alcuni metalli, a temperature bassissime, perdevano di colpo la loro resistenza elettrica.

La temperatura a cui avviene tale transizione, detta temperatura critica ( $T_c$ ) è riportata nella tabella in fig. 1: come si osserva, il niobio detiene il primato con i suoi 9,46°K.

Lo stesso Onnes provò ad avvolgere un filo costituito da un metallo puro e produsse un solenoide allo scopo di produrre un magnete superconduttore; tale esperienza, però non ebbe successo e fu invece riscontrato che il campo magnetico, anche debole, portava all'estinzione delle proprietà superconduttrici.

Studi più recenti hanno reso possibile la realizzazione di materiali resistenti a campi magnetici anche molto elevati: oltre al già citato niobio-titanio, si hanno a disposizione cavi in fibre in Nb-Ti-Ta, a base di composti intermetallici di tipo A-15 ( $Nb_3Sn$ ,  $Nb_3Al$ ,  $V_3Ga$ ,  $Nb_3Ge$ , ecc.) e nuovi materiali stanno emergendo, quali le "Fasi di Laves", "Fasi di Chevrel".

Come dicevamo, le leghe Nb-Ti sono senza dubbio il materiale più usato per la fabbricazione di cavi superconduttori adatti per l'avvolgimento di magneti in grado di produrre un campo utile fino ad 8,5 Tesla.

Con materiali più sofisticati sono stati realizzati in Giappone e in Europa, magneti superconduttori per campi utili fino a 17 Tesla.

Vediamo ora come viene prodotta e lavorata la lega Nb-Ti; non tratteremo qui per brevità tutte le fasi di lavorazione plastica per arrivare al cavo superconduttore, ma solo le fasi iniziali di preparazione della lega.

**TEMPERATURE E CAMPI MAGNETICI CRITICI DI  
- ALCUNI ELEMENTI SUPERCONDUTTORI**

Elementi	$T_c (^{\circ}K)$	$H_c (\text{tesla} \cdot 10^4)$
Alluminio	1.19	99.
Cadmio	0.56	30
Gallio	1.09	51
Indio	3.404	293
Iridio	0.14	~20
Lantanio $\alpha$	~5	-
Lantanio $\beta$	6.0	1600
Piombo	7.18	803
Mercurio $\alpha$	4.153	411
Mercurio $\beta$	3.95	340
Niobio	9.46	1944
Osmio	0.66	65
Renio	1.698	198
Tantalio	4.482	830
Tallio	2.39	171
Torio	1.37	162
Stagno	3.722	309
Titanio	0.39	100
Tungsteno	0.012	1070
Uranio $\alpha$	0.68	~2000
Uranio $\beta$	1.80	-
Vanadio	5.414	1370
Zinco	0.875	53
Zirconio	0.546	47

Fig. 1

L'obiettivo finale, comunque è il cavo per l'avvolgimento di magneti, mostrato in fig. 2 in cui è visibile la sezione trasversale di una fibra superconduttrice, realizzata nel nostro Istituto, a base di fibre in lega niobio-titanio inglobate in rame; il diametro esterno di tale cavo è di 0,4 mm e, di conseguenza, le fibre in lega niobio-titanio hanno il diametro di circa 30-40 micron.

Poiché la lega niobio-titanio è molto duttile si possono ottenere spezzoni di questi cavi lunghi molti chilometri senza eccessivo pericolo di rottura delle fibre.

In fig. 3 si osserva un particolare ingrandito al microscopio a scansione della sezione trasversale di un cavo superconduttore.

Naturalmente, oltre a questi cavi, ne esistono altri molto più complessi, normalmente usati per avvolgere grossi magneti; in pratica sono degli insiemi di fibre assemblate su un tubo di rame, all'interno del quale circola l'elio liquido per il raffreddamento. In figura 4a è mostrato un cavo prodotto dall'Imperial Metal Industries: si vede dall'ingrandimento di fig. 4b che gli elementi superconduttori, costituiti da cavi di diametro 0,5 mm contenenti ciascuno 61 fibre in lega Nb-Ti, sono alternati con fili di rame. Questi cavi possono portare senza dissipazione di energia correnti di migliaia di Ampere in campi magnetici intensi.

Vediamo ora di descrivere brevemente la preparazione della lega Nb-Ti. Data l'estrema reattività dei componenti con i gas, durante la fusione il rischio di contaminazione della lega è molto elevato; si deve lavorare sotto vuoto o in atmosfere molto pure e perciò, possono essere utilizzati soltanto forni ad arco o a fascio elettronico; inoltre, data la reattività dei componenti ad alta temperatura con i materiali refrattari, la fusione deve avvenire in crogioli in rame raffreddati ad acqua.

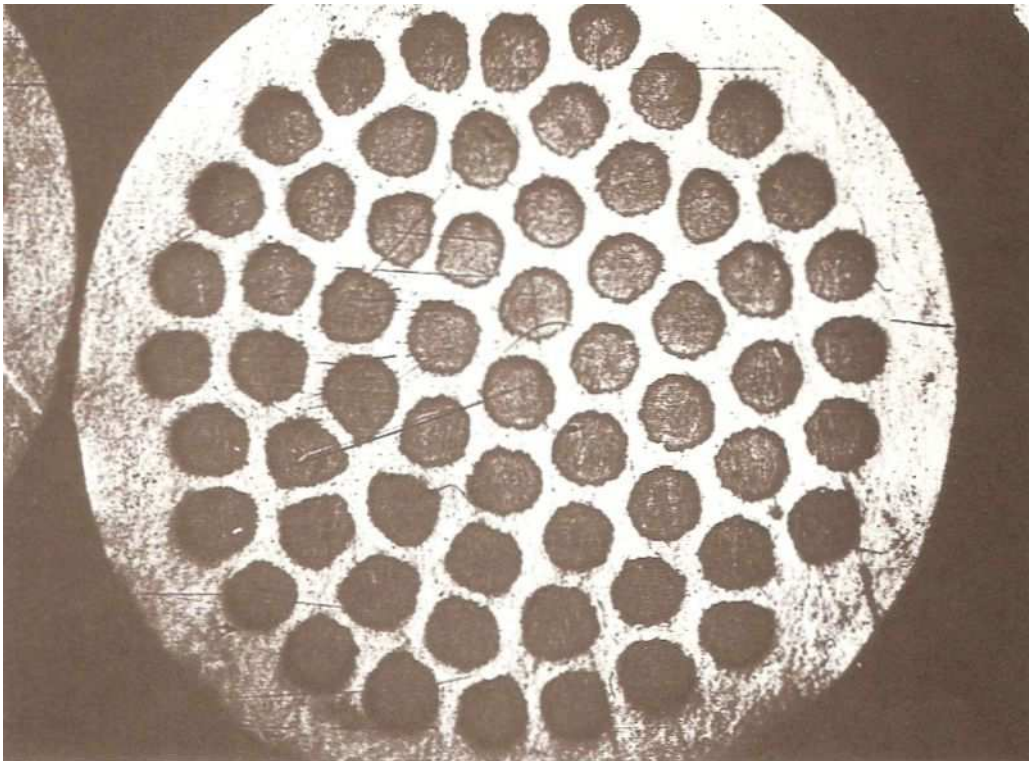


Fig. 2: sezione trasversale di fibra superconduttrice

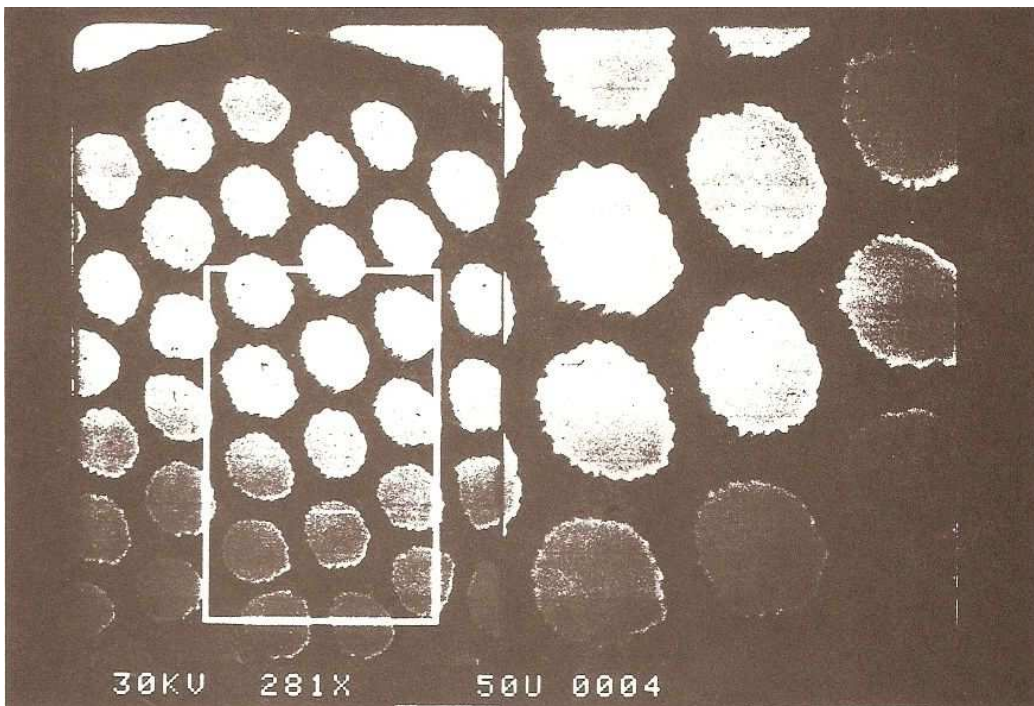


Fig. 3: particolare ingrandito

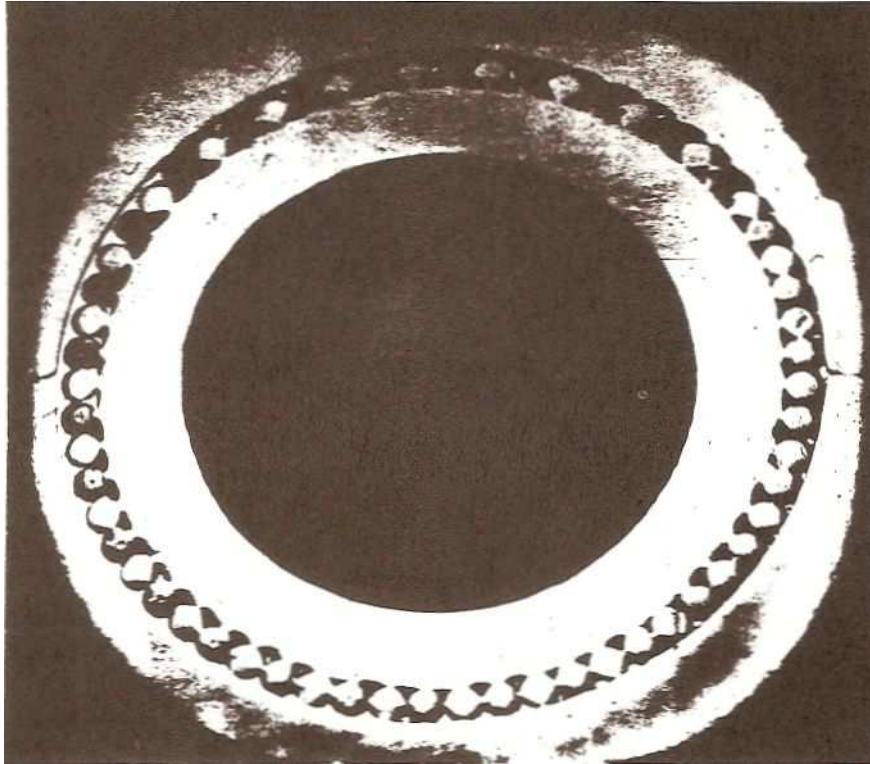


Fig. 4a: cavo dell'Imperial Metal Industries

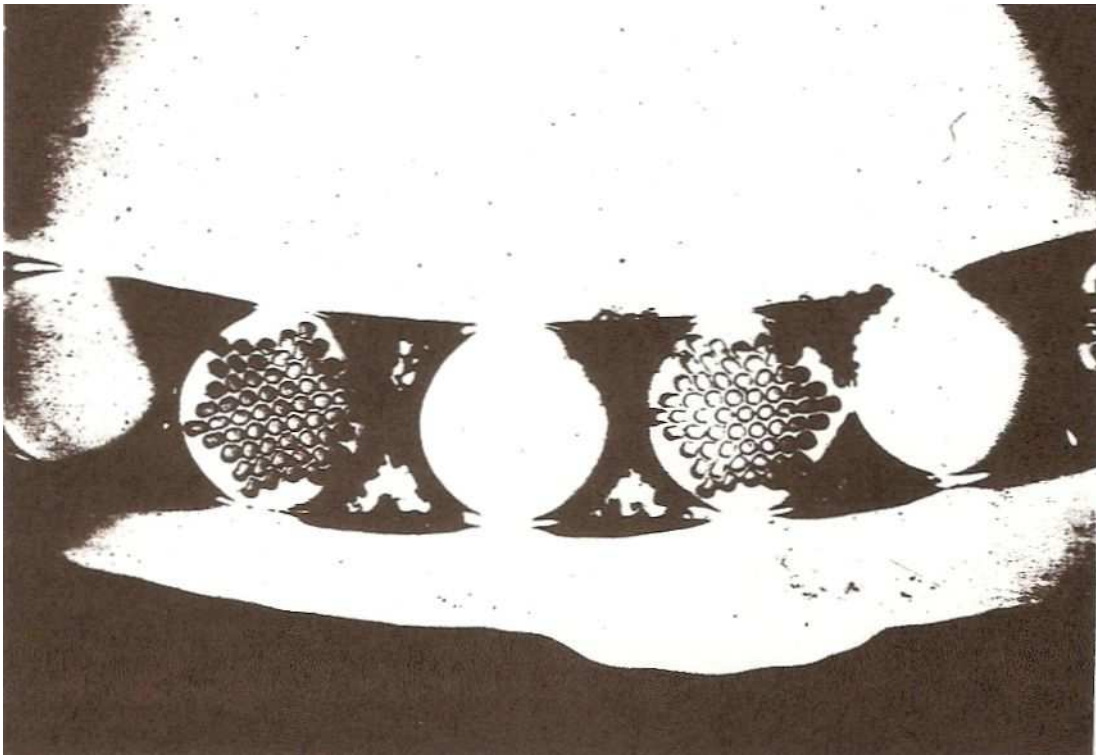


Fig. 4b: ingrandimento

La fig. 5 mostra lo schema di un forno ad arco ad elettrodo consumabile. L'elettrodo è costituito dal materiale da fondere e la massa, dopo fusione, è contenuta dal crogiolo freddo.

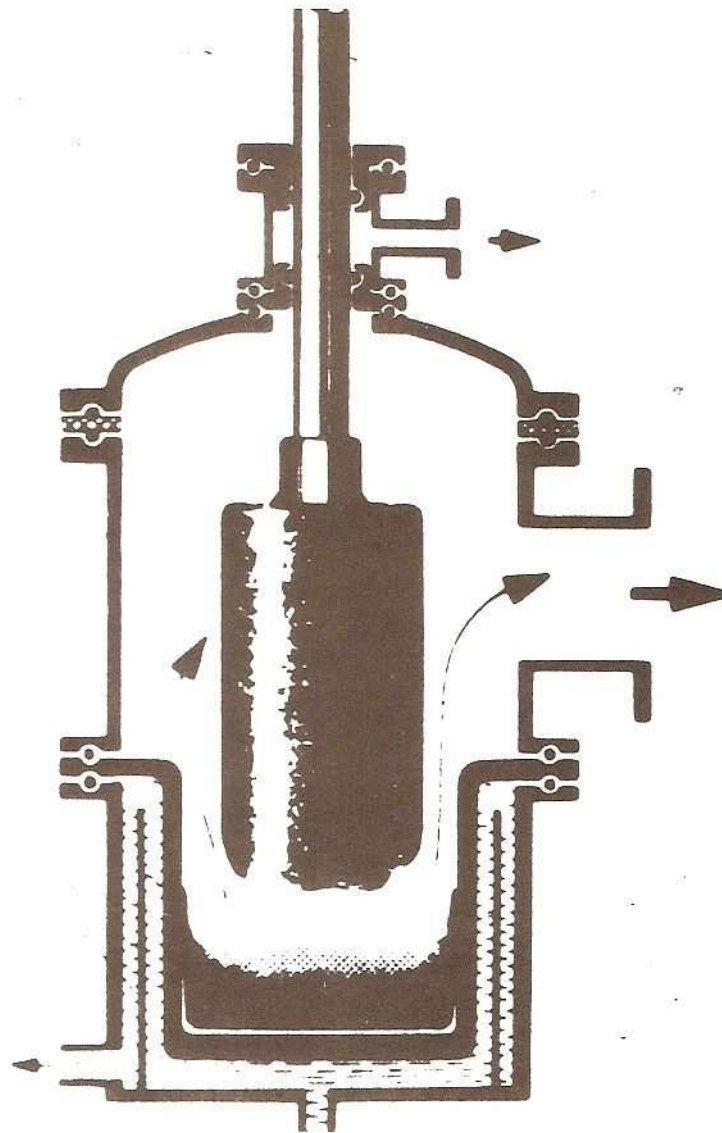


Fig. 5: schema di un forno ad arco

La fusione ad arco non presenta grosse difficoltà, a parte la produzione dell'elettrodo; la lega ottenuta con questo metodo è in genere meno pura dal punto di vista degli elementi interstiziali, cioè dell'ossigeno e dell'azoto, rispetto a quella ottenuta in un forno a fascio elettronico.

Per quanto riguarda il forno a fascio elettronico, il principio di funzionamento è molto semplice: esiste un emettitore di elettroni e un campo elettrico che si viene a stabilire tra l'emettitore di elettroni e la massa che costituisce l'oggetto da fondere; questi elettroni accelerati vengono focalizzati da lenti elettriche, come in un microscopio elettronico, e bombardano il bersaglio fondendolo (fig. 6).

In fig. 7 si vede il principio di funzionamento del forno a fascio elettronico in dotazione al nostro Istituto: esso è costituito dal cannone elettronico che produce un pennello di elettroni che lambisce la punta dell'elettrodo; le gocce fuse cadono nel crogiolo di rame sottostante e si ha quindi la crescita del lingotto. Naturalmente, il nostro forno è da laboratorio e di conseguenza per piccole quantità: il lingotto massimo ottenibile è di circa 40 mm di diametro e di 300 mm di lunghezza (fig. 8).

La fig. 9 riproduce una vista esterna del nostro forno a fascio elettronico, costituito dalla camera fusoria, dall'alimentatore e dalla cabina di comando.



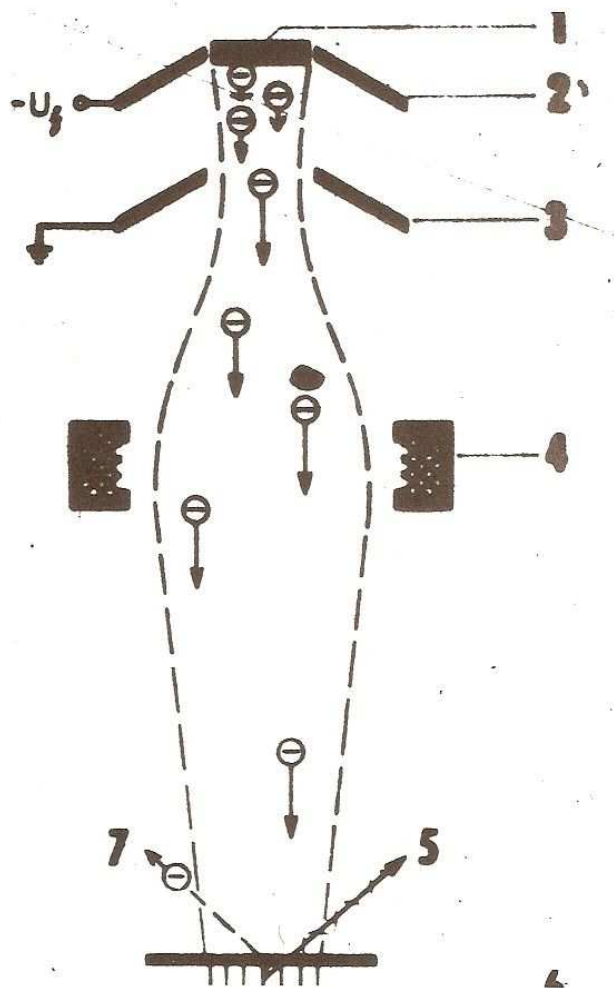


Fig. 6: forno a fascio elettronico

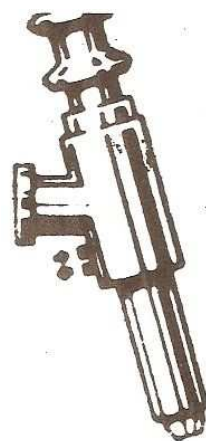
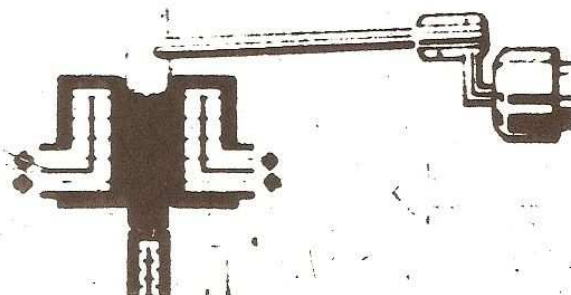


Fig. 7: principio di funzionamento



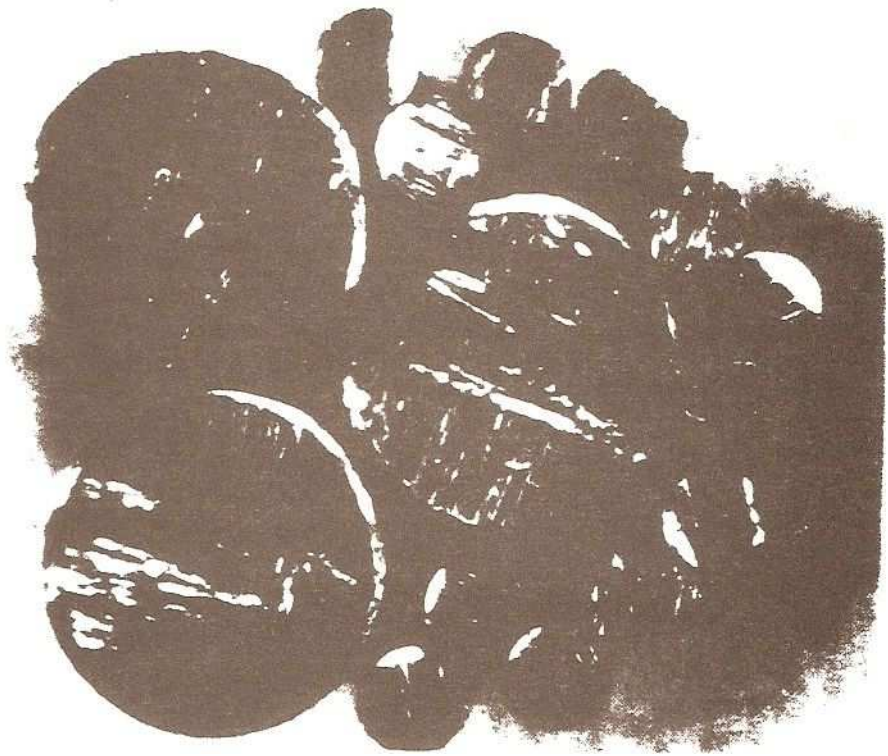


Fig. 8: lingotti

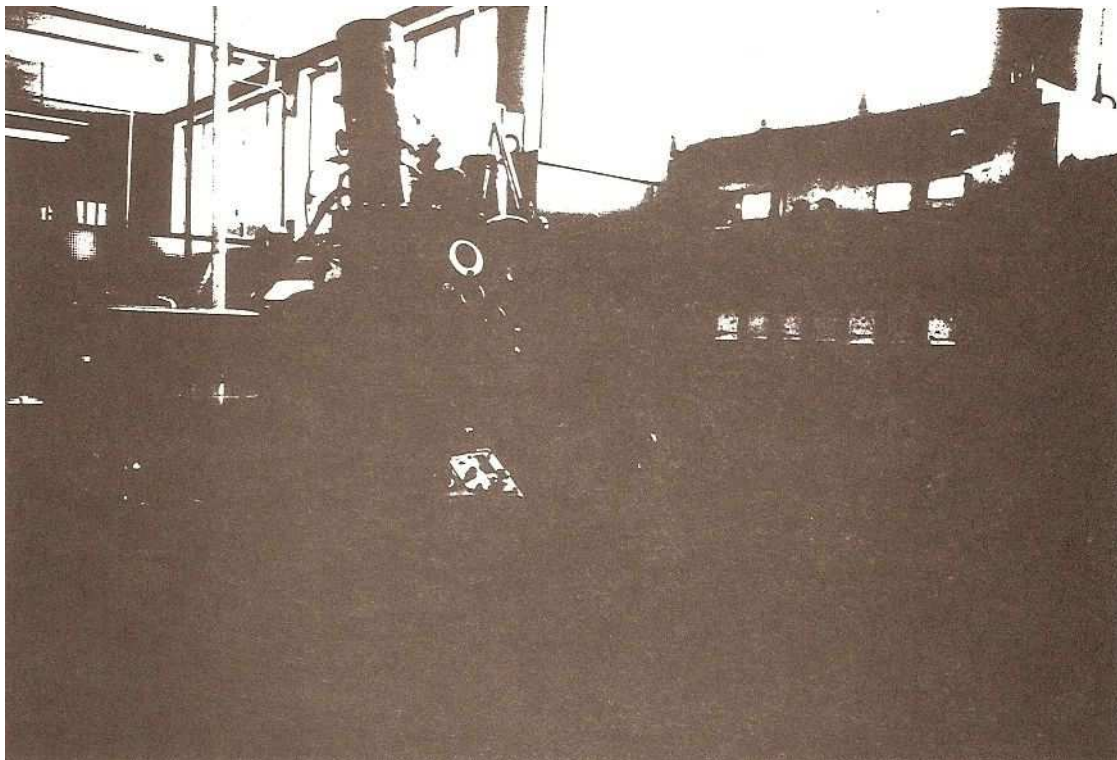


Fig. 9: vista esterna del forno a fascio elettronico

Poiché si fonde sotto vuoto si verifica una evaporazione del metallo a più alta tensione di vapore, nel nostro caso il titanio, e per minimizzare le perdite si deve ricorrere a sistemi particolari; uno di questi è l'uso di un elettrodo composito in cui il niobio, che è l'elemento più altofondente, viene messo nella parte superiore in modo tale che, bombardato dagli elettroni, fonda per primo, e sciolga il titanio: il tutto cade quindi nel crogiolo sottostante (fig. 10).

Mediante analisi alla microsonda sulla sezione trasversale di una goccia "congelata" prima della caduta nel crogiolo è stata riscontrata una discreta omogeneità del fuso già durante la prefusione; in fig. 11 è mostrata la goccia solidificata prima della caduta nel crogiolo.

Il lingotto ottenuto viene comunque rifuso per ottenere una migliore omogeneità e, dopo raffreddamento, estratto dal forno (fig. 12).

Il lingotto così prodotto è caratterizzato da elevato dendritismo: pertanto viene lavorato meccanicamente e poi trattato termicamente per ottenere una struttura interna adatta alla deformazione plastica a freddo. La fig. 13 indica da sinistra a destra, le micrografie del lingotto solidificato con grossi grani, del laminato con le classiche striature e dopo ricottura.

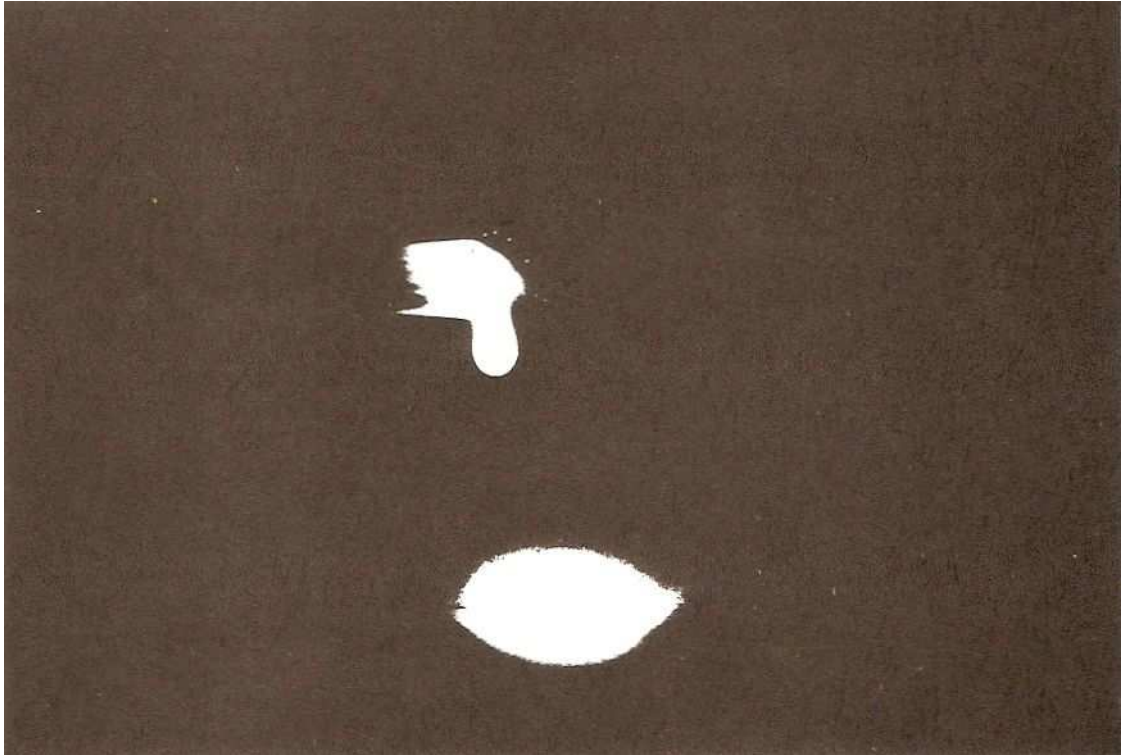


Fig. 10: fusione di un elettrodo

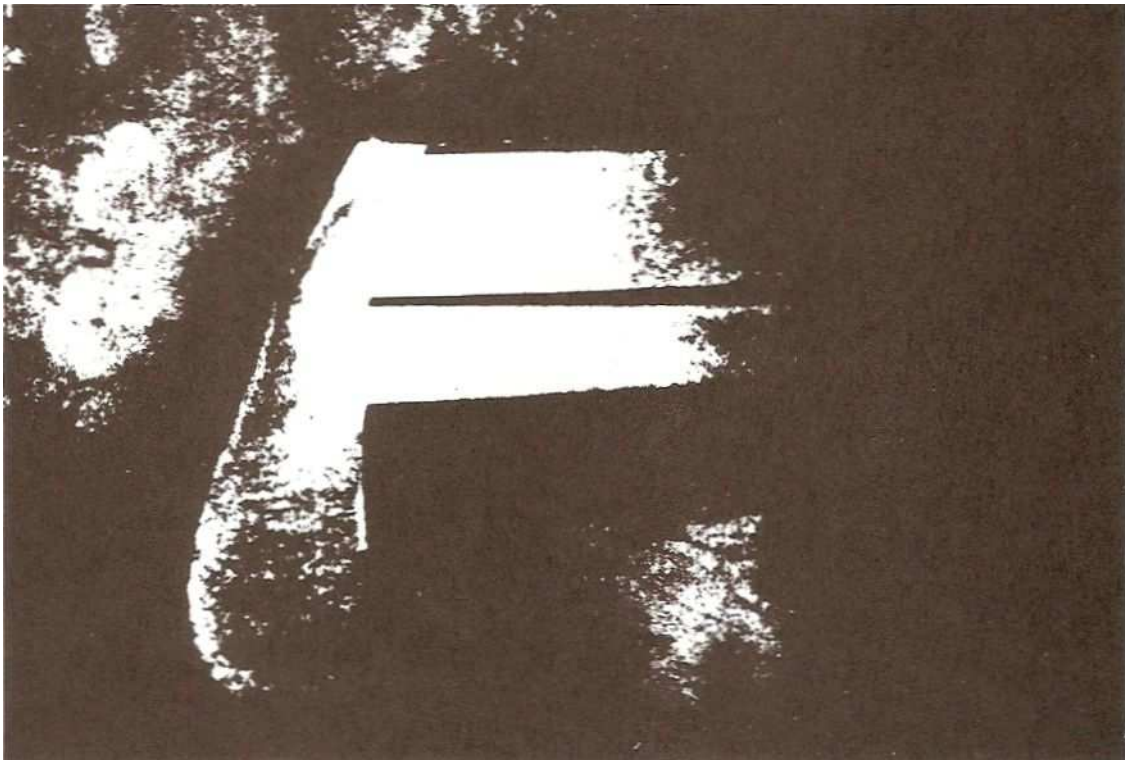


Fig. 11: goccia solidificata prima della caduta nel crogiolo

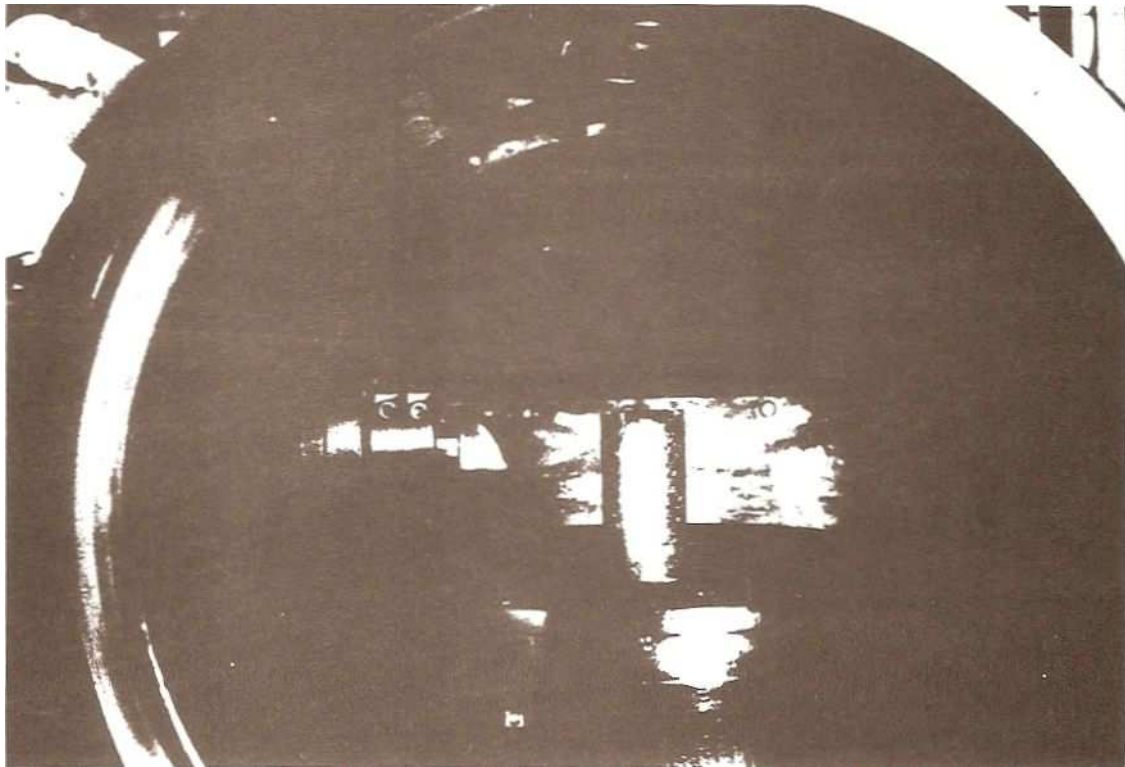


Fig. 12: lingotto ottenuto dopo rifusione e raffreddamento

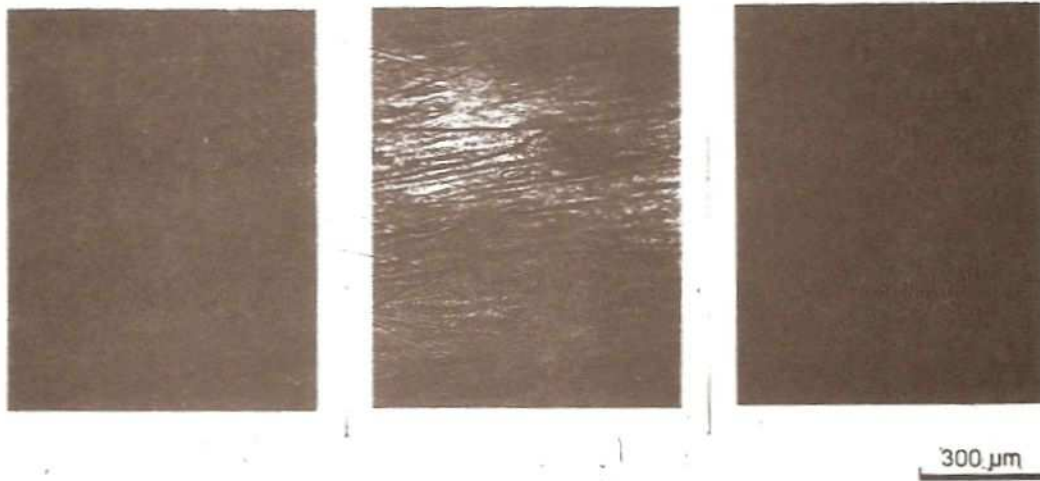


Fig. 13: micrografie

Per quanto riguarda le applicazioni principali dei superconduttori, attualmente si ha la già citata risonanza magnetica nucleare per scopi diagnostici; fra le applicazioni più prossime nel futuro è prevista la magneto - idrodinamica (MHD), cioè una separazione di cariche per mezzo di dipoli superconduttori per ottenere corrente elettrica ad altissimo rendimento. Con un MHD abbinato ad un impianto tradizionale si può arrivare ad un rendimento elettrico superiore al 60%, impensabile per gli impianti tradizionali. Sempre come applicazione futura dei superconduttori si può pensare alla fusione nucleare controllata; forse nel 2040-2050 si potrà usufruire di energia derivante da fusione nucleare controllata. Tale applicazione è classica per la superconduttività in quanto il contenimento magnetico dei plasmi con magneti resistivi richiederebbe una tale quantità di energia che il bilancio energetico risulterebbe nullo, se non negativo.

Nel settore dei trasporti, i giapponesi e gli europei stanno sperimentando dei treni che possono viaggiare in levitazione magnetica a velocità molto elevate; il record attuale, se non è stato superato, è di 540 km/h in completa assenza di rumore e con dispendio energetico limitato, grazie ai magneti superconduttori.

I superconduttori inoltre troveranno sicuro impiego nei molti processi coinvolgenti la separazione magnetica.

Il titanio quindi ha un ruolo fondamentale nelle fibre superconduttrici essendo uno dei componenti della lega niobio-titanio che è oggi la più usata nel campo della superconduttività; per quanto concerne il futuro, inoltre, si prevede che, per l'ottenimento di campi magnetici fino a 6-8 Tesla, ben difficilmente la lega Nb-Ti verrà sostituita con altri materiali.