MODERNI IMPIEGHI DEGLI ACCIAI SPECIALI

Sommario

Si passano in rassegna i principali tipi di acciai speciali richiesti dalle più recenti esigenze della tecnica moderna. Si riportano inoltre le loro caratteristiche di qualità ed i particolari usi a cui detti acciai sono destinati.

Introduzione

L'influenza esercitata dai materiali sulla tecnologia moderna è diventata eccezionalmente evidente in questi ultimi anni; ciò ha portato ad una intensificazione di sforzi al fine di promuovere una più profonda ricerca ed un più vigoroso sviluppo della scienza dei materiali verso le esigenze tecnologiche nel campo delle basse ed alte temperature, delle applicazioni nucleari, della areonautica e della missilistica.

Pur potendo utilizzare per questi scopi una grande varietà di materiali già esistenti, la specificità di alcune applicazioni ha incoraggiato lo studio di nuovi materiali particolari, relativi ad es. a problemi di rivestimento, di giunzioni e di fabbricazione, tra i quali assumono una posizione di notevole importanza gli acciai speciali.

Diamo qui una rapida rassegna di alcuni acciai speciali che vengono usati per particolari quanto delicati impieghi, quali gli acciai per basse e alte temperature, per le costruzioni spaziali, per la costruzione di reattori nucleari.

Acciai per basse temperature

È questa una importante categoria di acciai, che trova molteplici utilizzazioni nell'industria « criogenica » ossia relativa a lavorazioni e ad immagazzinamenti effettuati a basse tempera-

Tornata Accademica del 6 maggio 1967

ture. Il notevole sviluppo attuale di questo settore dell'industria e più ancora il brillante futuro ad esso preconizzato, ha indotto di recente i metallurgisti a studiare nuovi tipi d'acciai capaci di conservare un'apprezzabile tenacità anche a temperature d'esercizio prossime a —200° C. Infatti le esigenze di immagazzinamento e trasporto dei gas liquefatti, nell'industria chimica, nella missilistica, nella petrolchimica etc, richiedevano particolari tipi di acciai dotati di ottima saldabilità, che conservassero, anche dopo la saldatura, convenienti caratteristiche meccaniche ed in particolare una buona tenacità senza dover ricorrere a trattamenti termici particolari — a volte impossibili — dopo la saldatura stessa.

È noto che molti prodotti, che in condizioni normali si trovano allo stato gassoso, sono divenuti così importanti per l'industria moderna da esigere uno sviluppo di attrezzature in grado di far fronte alla crescente richiesta. È ovvio che lo sviluppo di queste utilizzazioni è legato alla economicità ed alla praticità dei mezzi di magazzinaggio e di trasporto e da ciò scaturisce evidente la necessità di ridurre le spese di stoccaggio e di movimento dei prodotti gassosi, immagazzinandoli a temperature prossime al punto di ebollizione ed alla pressione di 1 atmosfera.

Per dare un'idea delle prospettive di sviluppo aperte a questa categoria d'acciai basta citare la dichiarazione di uno dei responsabili delle costruzioni navali nazionali, secondo la quale l'industria cantieristica pone grande fiducia nelle navi da trasporto di gas liquefatti per la sua attività futura.

Altri concreti esempi di applicazione degli acciai per basse temperature riguardano contenitori fissi, cisterne di carri ferroviari e di autocarri, recipienti per rigeneratori di impianti a freddo, impianti per la produzione di aria liquida, di metano e gas di città, impianti ad ossigeno liquido in acciaierie, impianti per rigassificazione di gas liquidi. Appartengono a questa categoria di acciai ad es. quelli al nickel denominati BT9, BT3, BT2, nei quali la cifra che segue le lettere indica approssimativamente il contenuto percentuale di nickel.

Il primo di essi, che è anche il più importante, presenta le seguenti caratteristiche chimiche e maccaniche:
C 0,10; Mn 0,90 max; Si 0,15÷0,30; S 0,04 max; P 0,035 max; Ni 8,50÷9,50; R≧70 Kg/mm², K (-196°C) = 2,5÷4,0Kgm/mc²

A differenza dei normali acciai da costruzione esso presenta un'elevata resistenza e duttilità, insieme ad una notevole tenacità, a temperature molto basse, comprese quelle di liquefazione

di alcuni gas di vitale importanza per la moderna industria, quali ad es.:
Etilene (—104°C), Metano (—162°C), Ossigeno (—183°C), Acido fluoridrico (—188°C), Azoto (—196°C).

Si può valutare l'importanza di questo acciaio con un esempio di stoccaggio di 700.000 m³ di ossigeno. Un serbatoio sferico che contenesse tale elemento allo stato gassoso alla pressione di 6 atmosfere ed a temperatura ambiente, avrebbe un diametro di 60 m e peserebbe 2.000 tonn. se fosse fabbricato con acciaio ad alta resistenza. Invece con ossigeno allo stato liquido alla temperatura di —183°C ed alla pressione di 1 atmosfera peserebbe solo 150 tonnellate se fabbricato con acciaio BT9 in duplice involucro, con diametro interno di 11,60 m. ed esterno di 14 m. È evidente il vantaggio in peso ed ingombro nel secondo caso, vantaggio che si traduce anche in termini di costo finale del serbatoio pari a meno di 1/10 di quello del primo.

L'impiego di tale acciaio nel campo dello stoccaggio soddisfa non solo l'aspetto economico, ma anche quello, non meno importante, della sicurezza. Infatti il vantaggio di lavorare a pressione atmosferica, nel caso di acciaio BT9, è messo in evidenza dal fatto che nel primo esempio l'energia di compressione contenuta nel serbatoio, pieno di ossigeno a 6 atm., equivarrebbe energeticamente a 6,8 tonnellate di tritolo.

Le prove di resistenza eseguite su tale tipo di acciaio hanno dimostrato che una sfera pesante 2 tonnellate possa colpire ripetutamente, anche cadendo da 6 m., un recipiente di acciaio BT9 riempito con azoto liquefatto a —196°C senza produrre alcun inconveniente.

Altre prove hanno inoltre dimostrato che recipienti di tale acciaio possono sopportare pressioni 6 volte superiori a quelle di progetto. È naturale però che non è sempre necessario disporre di un acciaio come il BT9 in grado di sopportare convenientemente temperature così basse. Esistono infatti altri tipi di acciai, come il BT2 e BT3, capaci di costituire apparecchi e recipienti per la lavorazione, lo stoccaggio ed il trasporto di gas liquefatti fino a —60°C (fra cui propano, solfuro di carbonio, propilene, idrogeno solforato) nel caso di acciaio BT2 e fino a —100°C (fra cui l'anidride carbonica, freon 13, acetilene, etano) nel caso di acciaio BT3.

La saldatura degli acciai menzionati non presenta particolare difficoltà. I tipi BT2 e BT3 si saldano usando elettrodi rivestiti

e di composizione analoga a quella delle lamiere; saldature a gas inerte o ad arco sommerso sono state vantaggiosamente eseguite su acciai BT3. Per acciai BT9 invece si usano elettrodi di lega Inconel o di acciaio inossidabile. Anche la tecnica in gas inerte con filo continuo di lega Inconel può essere utilmente impiegata. La classe di acciai tipo BT viene fabbricata fino dal 1965 presso le Acciaierie Valbruna ed è contrassegnata con le sigle: T 60 - T 100 - T 200 dove la cifra che segue la lettera sta ad indicare la temperatura, sotto zero, alla quale essi acciai possono essere impiegati e cioè: —60°C, —100°C, —200°C.

L'acciaio T 200 (corrispondente al tipo BT9) è stato da noi fornito al Tubificio di Brescia per la fabbricazione di contenitori di gas liquido per temperature prossime a —200°C.

Le prove di resilienza eseguite alla temperatura di —196°C presso il Laboratorio Prove dei materiali dell'Istituto di Scienza delle costruzioni della Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Padova hanno dato — su barrette Charpy con intaglio ad U — valori sensibilmente superiori a quelli che si incontrano nella letteratura.

Acciai per alte temperature

La necessità di poter disporre industrialmente di leghe resistenti alle alte temperature, si rese particolarmente impellente durante l'ultima guerra, in considerazione anche della loro vantaggiosa applicazione nei turboreattori.

Da allora profondi studi sono stati effettuati nel settore di queste leghe ed il loro risultato ha portato alla messa a punto di materiali speciali più o meno legati, con o senza ferro, aventi tutti come denominatore comune, resistenza meccanica, termica, chimica. Si è costituita quindi una categoria di superleghe comprendente acciai variamente legati.

Degli elementi presenti, alcuni sono aggiunti intenzionalmente per influire sul procedimento di produzione e sulle proprietà. Tali elementi leganti veri e propri, che hanno ciascuno uno specifico effetto sulle caratteristiche degli acciai appartenenti a questa categoria, sono: cromo, nichel, molibdeno, cobalto, tungsteno, vanadio, titanio.

Le proprietà principali da considerare nella scelta di un materiale adatto per resistere alle alte temperature sono:

1) resistenza meccanica a temperature elevate;

2) dilatazione termica e distorsione;
3) resistenza all'ossidazione ed alla corrosione;
4) stabilità strutturale.

Oltre a queste che definiremo caratteristiche comuni, ne esistono altre specificamente importanti a seconda del tipo di applicazione, ad es.: resistenza all'usura, conducibilità termica, saldabilità, ecc. Chiariamo meglio le diverse caratteristiche summenzionate per l'impiego di questi materiali.

1. Resistenza meccanica a temperature elevate

È noto che la capacità di resistenza sotto carico diminuisce al crescere della temperatura, passando il materiale da uno stato elastico ad uno plastico. Da questo momento il tempo diventa un fattore critico e la prova a trazione convenzionale non ha più significato. Sorge invece la necessità di determinare il carico sotto il quale, per una certa temperatura, la deformazione non supera un determinato valore (di solito per calcolare le sollecitazioni consentite si applica lo sforzo che produce uno scorrimento minimo, comunemente una deformazione di 0,01% o 0,1% o 1%, in 1000 ore).

2. Dilatazione termica e distorsione

Il problema della fatica termica è strettamente legato alla dilatazione, alla distorsione ed alla piegatura, che, trascurate nella progettazione, producono nel materiale pericolose sollecitazioni dovute a brusche variazioni di temperatura che possono provocare la rottura.

3. Resistenza all'ossidazione ed alla corrosione

Oltre alla temperatura ha notevole importanza anche l'ambiente in cui il materiale opera. Spesso questo ambiente è l'atmosfera normale, altre volte invece si è in presenza di atmosfere speciali ossidanti, riducenti o di prodotti chimici sia liquidi che gassosi. Naturalmente l'effetto corrosivo è in questi casi esaltato dalla concomitanza con l'alta temperatura. Se poi l'attacco corrosivo è molto forte, lo spessore del metallo può essere ridotto al punto da non potere più sopportare le sollecitazioni imposte.

4. Stabilità strutturale

A temperature elevate i materiali non sono strutturalmente stabili come a temperatura normale. La mancanza di stabilità strutturale può comportare precipitazione di carburi, sferoidizzazione, grafitizzazione, formazione della fase sigma, infragilimento, carburazione, ecc.

Mentre gli acciai ordinari trovano applicazione fino a 500° ÷ 550°C e quelli al solo cromo resistono bene all'ossidazione fino a 1180°C, ma già oltre i 650°C perdono gran parte della resistenza meccanica, gli acciai inox austenitici presentano un ottimo comportamento sotto carico anche oltre i 650°C.

Tali acciai austenitici al cromo-nichel sono stati divisi in 3 categorie:

— tipi 18/8 e tipi modificati al molibdeno, al titanio ed al colombio.
— tipi 25/12.
— tipi 25/20

dove la prima cifra definisce la percentuale di cromo presente in lega e la seconda quella di nichel.

Tutti questi acciai hanno in generale un'ottima resistenza alla corrosione a temperature elevate, resistenza tanto migliore quanto maggiore è il quantitativo di cromo presente. Il 25/20 ed il 25/12 resistono alla corrosione a caldo fino a 1100°C; il 18/8 fino a 870°C. Riguardo alla resistenza sotto carico hanno uguale comportamento fino a 815°C, salvo il 18/8 modificato al molibdeno che presenta una maggiore resistenza allo scorrimento ed alla rottura. Oltre gli 815°C i tipi con più cromo 25/12 e 25/20 sono di solito più soddisfacenti, poiché un'eccessiva corrosione del tipo 18/8 può portare alla rottura.

Tutti gli acciai inox austenitici, salvo i 18/8 modificati, sono soggetti a precipitazione dei carburi per effetto del riscaldamento nell'intervallo fra i 480°C e 700°C. Se pertanto questi acciai si trovano esposti a certe condizioni corrosive anche a temperatura ambiente, tale precipitazione di carburi può portare a corrosione od ossidazione intercristallina. Questi acciai vengono da noi prodotti con particolare cura e sono seguiti, nel loro meccanismo corrosivo, dai nostri laboratori in collaborazione con l'Istituto di Chimica Industriale dell'Università di Padova.

Il coefficiente di dilatazione di questi acciai austenitici è elevato, mentre bassa è la conduttività termica rispetto ad altri acciai per alte temperature; di conseguenza la resistenza all'urto termico è relativamente scarsa.

La saldatura degli acciai al cromo-nichel è facile e normale. Nel caso essa sia indispensabile, ma esista il pericolo della precipitazione dei carburi, è opportuno tenere il carbonio al di sotto dello 0,05% ovvero ricorrere ad un acciaio inox stabilizzato.

Gli acciai inox austenitici infine si prestano ad essere facilmente lavorati alle macchine o stampati normalmente.

Acciai per la tecnologia spaziale

Le esigenze di progettazione imposte ai materiali nel campo dell'ingegneria spaziale sono in un certo qual modo singolari, così che singolari sono state spesso le soluzioni trovate, ma molti problemi possono essere considerati come un'estensione di quelli incontrati in aeronautica, suscettibili quindi di simili soluzioni con i medesimi materiali.

L'alta resistenza e tenacità degli acciai sono fattori che hanno avuto una particolare importanza sull'evoluzione della tecnologia di questi settori. In campo areonautico il fattore peso ha esercitato un'influenza a tal punto che fino a qualche tempo fa i materiali di più resistente struttura erano le leghe leggere (peso specifico circa 2,8 gr/cm^3 e modulo di elasticità 7000 Kg/mm^2) invece di acciai (peso specifico circa 7,9 gr/cm^3 e modulo di elasticità prossimo a 21.000 Kg/mm^2). Il rapporto modulo di elasticità su peso specifico è a favore delle leghe di alluminio ed è per questo che tali leghe hanno avuto tanta diffusione come materiali strutturali. Per contro, in alcuni casi di elementi strutturali particolari, gli acciai esercitano una certa superiorità, dato che, con le attuali velocità dei veicoli e l'aumento delle relative sovrastrutture, le leghe leggere invecchiate ad alta resistenza hanno dato seri motivi di preoccupazione sotto sforzi dinamici.

Esaminando l'applicazione degli acciai nella tecnologia spaziale può essere d'aiuto presentare uno schema generale su cui basare la scelta delle proprietà per le leghe da impiegare. Divideremo pertanto il volo spaziale in 3 fasi:

1) lancio nello spazio
2) viaggio spaziale vero e proprio
3) rientro nell'atmosfera terrestre e recupero.

Nella prima fase le principali considerazioni riguardano il funzionamento dei motori a razzo, la separazione degli stadi e soprattutto l'integrità strutturale del sistema sotto le condizioni imposte. Ciò comporta inconvenienti dovuti a surriscaldamenti locali (per es. 90 secondi dopo il lancio la temperatura superficiale può raggiungere i 200° C) ed a sforzi considerevoli, comprese le sollecitazioni a fatica ad alta frequenza cagionate dalle vibrazioni del razzo, anche se per breve durata. La scelta cade pertanto su una struttura leggera, ma rigida; ciò porta alla scelta di materiali ad elevato modulo, oltre a quelli per strutture e per il rivestimento dei motori a razzo.

La seconda fase crea una serie di problemi speciali, per la risoluzione dei quali non ci si può avvalere di esperienze precedenti; infatti il comportamento dei materiali nel vuoto molto spinto dello spazio cosmico (ad es. a 4.000 miglia dalla terra la pressione è di 10^{-12} mmHg) non è noto, né riproducibile in laboratorio.

La leggerezza è ancora un requisito fondamentale per sfruttare convenientemente la spinta dei razzi; ma l'esposizione del veicolo alle radiazioni cosmiche ed al bombardamento di meteoriti rende necessaria l'adozione di efficienti misure precauzionali, incompatibili di solito con la leggerezza. Inoltre insorgono problemi di emissività ed evaporazione superficiali, di lubrificazione etc. difficilmente simulabili.

Nella terza fase essenziale è la sopravvivenza del veicolo in condizioni di surriscaldamento, dovuto alle altissime velocità, con punte di temperatura prossime a 8.000°, oltre alla velocità di perdita del materiale influenzata dal grado di reazione con l'atmosfera e dalla erosione diretta dei gas ad alte velocità. Necessitano pertanto speciali precauzioni e materiali particolari sia strutturali che termicamente isolanti.

La realizzazione dei grandi serbatoi di combustibile aventi basso peso e sufficiente rigidità in un intervallo tra i 100° e 400°C comporta l'utilizzazione di acciai inossidabili. Un confronto fra questi, leghe di alluminio e di titanio parla a favore degli inossidabili, migliori sia come rapporto modulo di elasticità/peso specifico, sia come intervallo di temperatura di scorrimento fluido, ed intermedi come resistenza alle sollecitazioni termiche.

Sono da prendersi in considerazione più classi di acciai inox:

invecchiati artificialmente, basso legati temprabili, al Ni-Cr, martensitici e da utensili; la scelta finale poi è, alla luce dei requisiti aerospaziali legata ad un compromesso tra resistenza meccanica, resistenza alla corrosione e formabilità.

I particolari svantaggi per ciascuna classe sono:

— insorgenza di tensioni interne per raffreddamento e corrodibilità negli acciai basso legati.
— limitata possibilità di stampaggio negli acciai inox austenitici
— difficoltà di giunzione negli acciai martensitici.
— corrodibilità e difficoltà di produzione negli acciai rapidi, anche se le caratteristiche meccaniche sono le migliori.

La scelta pertanto cade sugli acciai inossidabili invecchiati artificialmente, data anche la loro resistenza al calore dopo esposizione prolungata a temperature comprese tra i 200° e 400°C.

L'acciaio tipo di questa classe, il 17-7 PH, ha la composizione seguente:
0,07% di C - 0,4% di Si - 0,6% di Mn - 17% di Cr - 7% di Ni - 1,1% di Al e la cui resistenza ad alte temperature migliora con l'aggiunta del 3% circa di Mo. In questo caso il rapporto Cr/Ni viene leggermente variato e il miglioramento delle proprietà ad alta temperatura è ottenuto per trasformazione martensitica piuttosto che per invecchiamento, anche se di conseguenza ciò comporta qualche sacrificio nella resistenza a temperatura ambiente.

In definitiva gli acciai di questa classe possiedono un'eccellente combinazione di proprietà meccaniche, facilità di fabbricazione, di lavorazione e di saldatura. La resistenza alla corrosione non è delle migliori, specialmente in atmosfera marina, ma per contro l'effettiva velocità di corrosione è bassa.

Il tipo modificato di acciaio è AM 355, la cui analisi è:
0,14% C - 0,95% Mn - 0,37% Si - 15,50% Cr - 4,35% Ni - 2,75% Mo; esso presenta un carico di rottura, un carico di snervamento ed un allungamento percentuale di 165 Kg/mm^2, 140 Kg/mm^2 e 20%, contro rispettivamente i 125 Kg/mm^2, 105 Kg/mm^2 e 6% dell'acciaio 17-7 PH precedente.

Ricordiamo ancora l'acciaio 420 dalle seguenti caratteristiche: 0,35% C - 1% mx Mn - 1% mx Si - 13% Cr - 0,5 mx Mo, carico di rottura 160 Kg/mm^2, carico di snervamento 124 Kg/mm^2, allungamento percentuale 6%, modulo di elasticità 20.500 Kg/mm^2.

Acciai per reattori nucleari

La realizzazione pratica dello sfruttamento dell'energia nucleare ha posto il tecnico di fronte ad una serie di nuovi problemi pertinenti i materiali da impiegare nella costruzione dei reattori. Infatti in questo particolare settore le classiche proprietà fisiche, chimiche, meccaniche ed economiche — come l'alta conduttività termica, il basso coefficiente di dilatazione, le convenienti caratteristiche meccaniche alle temperature di esercizio, la facilità di lavorazione, la disponibilità ed il costo ragionevole — non sono più sufficienti per caratterizzare questi materiali, in quanto la loro utilizzazione dipende essenzialmente anche dalle proprietà nucleari.

La principale e generale caratteristica dei materiali per reattori è la capacità di assorbimento di neutroni, espressa come sezione di cattura (in barn) e misurante la probabilità che un neutrone possa essere assorbito dal nucleo bombardato; oltre a questa si deve dare risalto ad altre proprietà nucleari, come la suscettibilità alla radioattività, la resistenza alla corrosione ed alla degradazione sotto l'azione delle radiazioni.

La costruzione di un impianto per lo sfruttamento dell'energia nucleare comporta l'utilizzazione di una vasta gamma di materiali destinati alle specifiche operazioni che si svolgono nel processo.

L'impiego di acciai è rivolto prevalentemente ad assolvere funzioni strutturali per la costruzione dell'intelaiatura dell'impianto e come materiale di controllo per regolare la reazione di fissione.

A) Nella scelta di materiali strutturali bisogna tenere conto di due proprietà peculiari: basse caratteristiche di assorbimento dei neutroni (cioè piccola sezione di cattura) ed apprezzabili proprietà meccaniche e chimiche. Trovano pertanto applicazione in questo settore (insieme con l'alluminio, lo zirconio, le leghe di nichel e i materiali ceramici) gli acciai inossidabili austenitici.

Questi ultimi sono usati come materiali di rivestimento del combustibile nucleare, negli scambiatori di calore e nelle apparecchiature ausiliarie.

Nel fare la scelta di un particolare tipo di acciaio inossidabile austenitico bisogna tener conto della sua suscettibilità alla corrosione intercristallina, a quella sotto carico, alla separazione della fase sigma, data la rilevante presenza di cromo, alla corrosione accelerata per effetto del passaggio di liquidi ad alta velocità che rimuovono lo strato superficiale protettivo.

Gli acciai inossidabili, a differenza di altri materiali — Molibdeno, Tantalio, Titanio, Zirconio e Tugsteno — offrono una buona resistenza all'ossidazione atmosferica fino a 900°C. Rispetto allo zirconio hanno una minore resistenza alla corrosione a bassa temperatura ed una maggior sezione di cattura, inconvenienti peraltro compensati dalle migliori caratteristiche meccaniche ad alta temperatura.

È stata anche notata un'analogia di comportamento tra l'effetto dell'incrudimento e quello delle radiazioni, per quanto quest'ultimo non risulti direzionale, tal che la degradazione degli acciai inossidabili austenitici con radiazioni a 80°C fa aumentare la durezza del 10% circa, con conseguente aumento del carico di rottura e diminuzione dell'allungamento.

B) L'altra importante utilizzazione degli acciai rientra nel settore dei materiali di controllo.

La regolazione dei reattori viene eseguita in modo continuo con l'introduzione, controllata automaticamente o comandata, di elementi costituiti da materiali ad elevato coefficiente di assorbimento per i neutroni. I requisiti cui detti materiali devono corrispondere sono i seguenti:

1° = elevata sezione di cattura, come già accennato
2° = resistenza meccanica
3° = resistenza alla corrosione
4° = stabilità al calore ed alla degradazione sotto l'azione delle radiazioni.

Tra gli elementi di possibile impiego va menzionato il boro che soddisfa apprezzabilmente alla prima condizione. Non presentando esso però anche gli altri requisiti, si è preferito usarlo in lega con gli acciai.

Per scopi nucleari si può arrivare a produrre acciai comuni o speciali contenenti fino a qualche unità % di boro, eventualmente arricchito nell'isotopo B^{10}. Tale elemento viene aggiunto al ferro sotto forma di lega ferro-boro o manganese-boro contenente circa il 20% di B. In generale tale lega viene aggiunta al ferro fuso in presenza di ossido di ferro, in modo da ridurre al minimo nel prodotto sia il contenuto in manganese sia il contenuto in carbonio. Infatti tali acciai contengono al max 0,10% di carbonio, 0,5% di manganese e 2÷5% di boro.

Il materiale è poi colato in lingotti, forgiato e laminato intorno ai 1000°C.

Per tenori in boro superiori al 4% la fusione deve essere eseguita in crogioli di zircone.

La saldatura di tali acciai non presenta difficoltà.

Sono state studiate anche leghe di acciaio inossidabile contenente titanio con europio e gadolinio.

Le prime risultano però di difficile manipolazione a causa dell'elevata volatilità dell'europio.

Le leghe a base di acciaio inossidabile e gadolinio (fino al 25%) sono prodotte più facilmente all'arco elettrico con elettrodo di tungsteno ed hanno mostrato ottima resistenza alla corrosione da parte dell'acqua e del vapore anche ad alta temperatura.

Nonostante siano piuttosto dure e fragili, con tenori di gadolinio fino al 10% possono essere laminate a 850° con riduzione del 10% circa ad ogni passaggio. Per contenuti di gadolinio più elevati sono necessarie temperature di lavorazioni più alte.

ERNESTO GRESELE

BIBLIOGRAFIA

G. GUZZONI, *Acciai comuni e speciali*, ed. Hoepli, Milano (1966).

A. J. KENNEDY, *The materials background to space tecnology*, George Newnes Limt., London, (1964).

E. CREPAZ, *Materiali per reattori. Corso Informativo sui fenomeni nucleari e problemi applicativi connessi*, ed. Borghero, Padova, (1957).

Bollettino FINSIDER, n. 5, (1966).

IL NICKEL, n. 71, pp. 1-12, dicembre (1957); n. 72, pp. 1-8 febbraio (1958); n. 94, pp. 1-13, ottobre (1961).