

Franco Pratesi

Dal rame al titanio



Copyright © MMVIII
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-1522-3

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: gennaio 2008

Indice

<i>Indice delle figure</i>	7
<i>Abbreviazioni e simboli</i>	9
<i>Prefazione</i>	11
<i>1. Designazione di metalli e leghe</i>	13
Il sistema UNS.....	13
Designazione delle leghe.....	16
Complementi sui sistemi di designazione	20
<i>2. Rame</i>	29
Proprietà e principali applicazioni.....	29
Rame metallico.....	31
Ottoni.....	35
Alpacche e metallo bianco	42
Cupronichel	43
Sistema rame-silicio	44
Bronzi tradizionali.....	45
Bronzi innovativi.....	47
<i>3. Alluminio</i>	53
Proprietà e principali applicazioni.....	53
Generalità sulle leghe leggere	57
Leghe da fonderia.....	58
Leghe da deformazione plastica	60
Polvere d'alluminio sinterizzata	69
<i>4. Titanio</i>	73
Proprietà e principali applicazioni.....	73
Titanio metallico.....	76
Generalità sulle leghe di titanio.....	78

Leghe alfa e quasi-alfa	81
Leghe alfa-beta	83
Leghe beta	84
<i>5. Altri metalli non ferrosi</i>	87
Magnesio	87
Zinco	90
Stagno	92
Piombo	94
<i>Bibliografia</i>	99

Indice delle figure

Figura 1. Schema di purificazione a zone.	32
Figura 2. Composizione e conducibilità.	33
Figura 3. Diagramma di fase Cu-Zn.	36
Figura 4. Ottoni: proprietà meccaniche e composizione.....	38
Figura 5. Ottoni: carico di rottura e incrudimento.	39
Figura 6. Diagramma di fase Cu-Ni.....	43
Figura 7. Diagramma di fase Cu-Si.	45
Figura 8. Diagramma di fase Cu-Sn.....	46
Figura 9. Diagramma di fase Cu-Al.....	48
Figura 10. Diagramma di fase Cu-Be.	50
Figura 11. Trattamento termico e durezza.	51
Figura 12. Conducibilità elettrica dell'Al e composizione. .	55
Figura 13. Densità e composizione per l'alluminio.	55
Figura 14. Schema delle leghe leggere.	57
Figura 15. Diagramma di fase Al-Si.	59
Figura 16. Diagramma di fase Al-Mn.	64
Figura 17. Stadi di precipitazione e durezza.	66
Figura 18. Diagramma di fase Al-Mg ₂ Si.	67
Figura 19. Famiglie di leghe leggere della serie 7000.	68
Figura 20. Diagramma di fase Ti-Al.	78
Figura 21. Diagrammi di fase Ti-V e Ti-Mo.	79
Figura 22. Diagrammi di fase Ti-Cr e Ti-Fe.	79
Figura 23. Diagramma di fase Pb-Sn.....	96

Abbreviazioni e simboli

Per indicare le composizioni chimiche si usano per maggiore chiarezza espressioni del tipo Cu-27Zn-18Ni, ma le convenzioni correnti vorrebbero invece il numero dopo il simbolo e la soppressione del trattino, cioè nell'esempio: CuZn27Ni18.

Per la densità si usano le tradizionali unità g/cc invece delle corrette kg/mc del sistema SI (con valori numerici quindi che sarebbero da moltiplicare per mille).

A allungamento percentuale a rottura, spesso A%

AA *Aluminium Association Ltd.*

ASTM *American Society for Testing Materials*

CCC cubico a corpo centrato

CEN Comitato Europeo di Normazione

CFC cubico a facce centrate

DHP *Deoxidised High Phosphor*

DLP *Deoxidised Low Phosphor*

EC esagonale compatto

ELI *Extra Low Interstitials*

ETP *Electrolytic Tough Pitch*

H *Hardness* durezza

h *hours* ore

MPa megapascal, cioè 10^6 N/m²

ODS *Oxide Dispersion Strengthened*

OFE *Oxygen Free Electronic*

OFHC *Oxygen Free High Conductivity*

ppm parti per milione

R carico di rottura a trazione, invece di σ_R o altri simboli

S% riduzione percentuale dopo incrudimento

SAP *Sintered Aluminium Powder*

T_F temperatura di fusione

UNS *Unified Number System*

Y (*yield*) carico di snervamento, invece di σ_y , R_s , R_p , $R_{p0,2}$ ecc.
(se sono presenti due valori il primo si intende per materiale ricotto, il secondo incrudito o trattato termicamente)

ρ densità (qui in g/cc, cioè g/cm³)

Prefazione

Il titolo del libro potrebbe far pensare a uno sviluppo storico che parte dal tardo neolitico con il primo uso di rame e bronzo e arriva all'attuale diffusione del titanio e delle sue leghe in numerose applicazioni industriali. In realtà la struttura del testo è organizzata in maniera descrittiva, sulla base degli elementi metallici interessati. Tuttavia lo sviluppo storico è presente nella successione scelta che per i metalli principali va da rame a titanio passando per l'alluminio. Se non si considerasse lo sviluppo storico, tale ordine potrebbe essere diverso e forse altri metalli prenderebbero il posto del titanio; in particolare, se si guarda il consumo globale, il titanio si dovrebbe inserire qui nella parte finale, insieme ad altri metalli di interesse generale un po' minore.

Nel complesso, il presente libro è dedicato ai principali metalli non ferrosi e alle loro leghe di più comune utilizzazione industriale. Particolare attenzione è rivolta alle proprietà meccaniche ma sono considerati anche metalli e leghe che sono usati per altre loro caratteristiche peculiari. Non sono presi qui in esame gli acciai e le superleghe a base di Fe, Co o Ni, che saranno descritti, sperabilmente, in un volume successivo, e nemmeno, all'altra estremità, i metalli preziosi sui quali è già stato pubblicato un volume della serie.¹

Per la comprensione del testo si considerano noti i fondamenti della metallurgia fisica, presentati in altri volumi, sempre appartenenti a questa serie, dedicati alla struttura cristallina, elettronica, e in particolare alle proprietà meccaniche dei metalli.²

¹ F. Pratesi, *Dall'oro al platino*, Aracne, Roma 2007.

² F. Pratesi, *Struttura cristallina dei metalli*, Aracne, Roma 2007; F. Pratesi, *Struttura elettronica dei metalli*, Aracne, Roma 2007; F. Pratesi, *Proprietà meccaniche dei metalli*, Aracne, Roma 2007.

Anche la conoscenza dei diagrammi di stato si dà per nota, in quanto sono stati di solito introdotti in corsi precedenti. In caso contrario, gli elementi indispensabili si possono trovare nella prima parte del libro citato.¹

Come per gli altri libri della serie, la compilazione è stata pensata per studenti universitari di diversa esperienza e indirizzo, cercando costantemente di mantenere un livello e uno stile adatti anche per uno studente delle medie superiori. In particolare, le possibili applicazioni delle varie leghe sono state indicate, volutamente, solo in termini generici, senza scendere nei particolari delle innumerevoli utilizzazioni specifiche. Similmente, per quanto riguarda le proprietà fisiche dei materiali descritti l'attenzione è stata focalizzata quasi esclusivamente sulle proprietà meccaniche e, fra queste, sul carico di snervamento, scelto come parametro più significativo per indicarne la resistenza.

In conclusione un lavoro didattico di questo genere non potrà servire come manuale tecnico: alcuni dati importanti sono riportati, ma di regola nell'uso pratico ne servono molti di più e ci si dovrà quindi riferire alle opere maggiori, come il volume *ASM Handbook* citato nella bibliografia finale. Nella stessa bibliografia sono anche indicati alcuni testi universitari in cui il lettore interessato potrà trovare utili complementi sulla materia.

Firenze, Novembre 2007

1. Designazione di metalli e leghe

Del centinaio abbondante di elementi chimici elencati nel sistema periodico la stragrande maggioranza sono metalli. Normalmente si pensa però ai metalli industriali o ai metalli preziosi, che evidentemente rappresentano solo dei sottoinsiemi di tutti gli elementi metallici; di molti altri elementi metallici del sistema periodico teniamo a mente, se è il caso, solo nome e simbolo.

D'altra parte, anche fra i metalli industriali e quelli preziosi esistono grandi variazioni per quanto riguarda l'importanza relativa del singolo elemento base e bisognerà quindi prima di tutto trovare un criterio per dedicare a ognuno il giusto spazio nella descrizione e nello studio. Si può allora pensare a una specie di graduatoria basata su uno di diversi parametri più o meno collegati fra loro, come il costo, la distribuzione percentuale sulla crosta terrestre, la quantità prodotta, e così via.

Il sistema UNS

Un sistema che si è diffuso anche a livello internazionale (nell'attesa per l'Europa di un sistema simile definitivamente accettato) è il sistema UNS, introdotto negli USA e che di tale origine chiaramente risente.

Il sistema UNS classifica tutti gli elementi metallici e le loro principali leghe con una lettera seguita da cinque cifre. In pochi casi esiste una corrispondenza biunivoca fra lettera assegnata e simbolo chimico; così A sta per Al e raccoglie quindi tutte le leghe leggere assegnando a ognuna uno dei centomila possibili numeri diversi. Similmente C sta per Cu, N per Ni e Z per Zn. Se il sistema continuasse così, tanto varrebbe utilizzare direttamente i simboli chimici degli elementi, ma come preannunciato si tratta di eccezioni e non di regola.

Gli elementi metallici citati sono fra i più importanti e danno origine a leghe numerose e largamente utilizzate. Da questo punto di partenza si procede in due direzioni opposte.

Da una parte troviamo il Fe, l'unico elemento chimico per il quale sono previste più lettere, anzi tante lettere quante sono utilizzate per tutti gli altri elementi presi insieme, come si può controllare nella tabella seguente.

Sigle UNS	Leghe
A00001 a A99999	Alluminio e sue leghe
C00001 a C99999	Rame e sue leghe
D00001 a D99999	Acciai, da proprietà meccaniche
E00001 a E99999	Terre rare e simili
F00001 a F99999	Ghise
G00001 a G99999	Acciai specificati AISI e SAE
H00001 a H99999	Acciai H da AISI e SAE
J00001 a J99999	Acciai per getti
K00001 a K99999	Acciai e leghe ferrose misti
L00001 a L99999	Metalli bassofondenti e leghe
M00001 a M99999	Metalli non ferrosi misti e leghe
N00001 a N99999	Nichel e sue leghe
P00001 a P99999	Metalli preziosi e leghe
R00001 a R99999	Metalli refrattari e leghe
S00001 a S99999	Acciai resistenti a caldo e corrosione
T00001 a T99999	Acciai da utensili
W00001 a W99999	Metalli per saldature
Z00001 a Z99999	Zinco e sue leghe

Che gli acciai siano di gran lunga le leghe più utilizzate è ben noto: la produzione mondiale delle leghe ferrose si avvicina a un milione di tonnellate l'anno, contro poche decine o più spesso unità o frazioni di migliaia per gli altri metalli. Quantitativamente, tutti i metalli e le leghe non ferrose non arrivano nel loro insieme a una decima parte della produzione

degli acciai. In particolare lettere diverse sono riservate ad acciai designati solo in base alle proprietà meccaniche, alle ghise, agli acciai da fonderia, agli acciai inossidabili, agli acciai per utensili. Un paio di lettere sono inoltre riservate ad acciai che già hanno ricevuto una sigla numerica nelle designazioni AISI (*American Iron and Steel Institute*) e SAE (*Society of Automobile Engineers*) usate negli USA. La sigla di tre o quattro cifre in uso comune viene trasformata nella sigla UNS semplicemente con aggiunta di una lettera e di una o due cifre iniziali (come vedremo qui per l'alluminio). Infine esiste anche una lettera, K, per i casi che non rientrano nei precedenti.

Dall'altra parte troviamo gli elementi di minore utilizzazione, che quindi non si "meritano" nemmeno una lettera ciascuno e vengono raggruppati in famiglie per quanto possibile omogenee; a ognuna di queste famiglie viene assegnata una lettera con i centomila numeri collegati (spesso di questi possibili numeri viene utilizzata solo una piccola parte).

Si trovano in particolare metalli bassofondenti indicati con L (*low*), refrattari con R (*refractory*), preziosi con P (*precious*), terre rare con E (*earth*), misti con M (*miscellaneous*), con numeri diversi di elementi, come mostrato nella tabella alla fine della Parte prima.

A noi qui il sistema UNS serve principalmente per uno scopo preliminare: per esaminare i vari metalli non ci possiamo basare sul sistema periodico degli elementi che assegna una casella a ognuno del centinaio di elementi metallici, mettendoli tutti sullo stesso piano. Il sistema UNS è importante perché ci dà subito un'idea delle importanze relative! Il Fe da solo ha un'importanza pari grosso modo a quella di tutti gli altri: in questo libro non lo prendiamo in esame e riserviamo un libro solo per le sue leghe.

Possiamo proseguire limitando l'attenzione a tutti i metalli non ferrosi. Fra questi e le relative leghe principali si potranno selezionare i casi più importanti e dare al massimo un'attenzione limitata alla stragrande maggioranza degli elementi metallici, quelli che nella pratica industriale hanno importanza tutt'al più

come possibili aggiunte di lega nei metalli base che ci limiteremo a studiare.

A questo punto possiamo rimandare agli esempi aggiunti nel capitolo di complementi e con quelli considerare terminata la presentazione del sistema UNS e la sua utilizzazione a scopo didattico. Tuttavia si deve capire che questo sistema non fu certo proposto a scopo didattico! L'importanza della designazione di metalli e leghe è ben più vasta e finisce con il coinvolgere enormi interessi tecnici e commerciali.

Designazione delle leghe

Finora la maggiore attenzione è stata rivolta a come distinguere nella maniera più conveniente i tanti elementi metallici e prevedere un sufficiente numero di sigle per le loro leghe. Ovviamente il problema non si esaurisce qui perché si devono ancora trovare criteri adatti per assegnare le sigle alle varie leghe.

Di leghe possibili ne esistono innumerevoli varianti e quindi ci si imbatte subito in due esigenze contrapposte. Da una parte si deve poter utilizzare al bisogno, anche in futuro, anche per leghe non ancora esistenti, una sigla per una lega non ancora designata e ciò porta ad aumentare di molto le sigle a disposizione. Dall'altra parte è sentita ovunque l'esigenza pratica di ridurre il numero delle leghe di possibile produzione e utilizzazione: si deve in particolare rinunciare alla possibilità di variare con continuità la composizione e scegliere opportuni salti nelle concentrazioni, tali da fornirci un ventaglio sufficiente di caratteristiche con una differenza equilibrata fra una lega e la "successiva".

Una volta fissata la concentrazione adatta di un'aggiunta di lega la questione non è ancora definita perché si deve ulteriormente fornire un intervallo di variazione in meno e in più ammesso per tale concentrazione.

Per molte leghe inoltre l'assegnazione di una sigla comporta l'ulteriore necessità di precisare la concentrazione non solo degli elementi aggiunti ma anche di quelli... che non ci sono. La cosa potrebbe sembrare assurda, ma non lo è perché la formazione di una lega non consiste mai nell'aggiunta di un metallo iperpuro a un altro parimenti iperpuro. I metalli commerciali hanno sempre un certo numero di impurezze che sarebbe troppo costoso eliminare. Il problema è che queste impurezze variano di qualità e quantità a seconda dei minerali o dei rottami di partenza e dei processi utilizzati nella produzione. Di solito per i principali elementi che possono essere presenti e avere un effetto dannoso sulle proprietà della lega viene fissato un limite superiore oltre il quale la lega non si considera più idonea per ricevere la sigla in questione.

I numerosi sistemi adottati per queste designazioni hanno basi diverse e soprattutto in genere validità nazionale. Sappiamo bene che non tutte le nazioni hanno pari importanza, e allora possiamo per intenderci paragonare i vari sistemi di designazione alle varie monete. Lo strapotere del dollaro nei confronti delle numerose monete europee si è ridimensionato con l'accettazione dell'euro. Anche nel nostro settore sta accadendo qualcosa di simile. Esiste un organo europeo di unificazione, il CEN, che sta introducendo un sistema unico anche in questo caso. Presto nell'Unione Europea qualsiasi lega prodotta e utilizzata avrà (almeno in un primo tempo) una doppia sigla, quella europea e quella nazionale corrispondente. Se la corrispondenza non si trova, è la lega nazionale a uscire di produzione entro breve tempo.

Ricapitolando, il sistema UNS, o uno simile, è molto importante come sistema di nomenclatura delle leghe e potrebbe essere riconosciuto valido su scala internazionale, in grado di sostituire vantaggiosamente gli innumerevoli sistemi nazionali di designazione, con tutte le difficoltà che si incontrano nei passaggi (spesso solo approssimativi) da una sigla nazionale a un'altra, tali da richiedere elenchi di sigle delle dimensioni di un grande vocabolario. Un sistema efficace di designazione

semplifica anche la domanda e l'offerta dei materiali metallici, definendo meglio la varietà delle leghe in commercio a livello mondiale. Perciò troveremo spesso nel seguito le sigle UNS di metalli e leghe, e anche, alla fine di questa Parte prima, un'elencazione delle principali leghe che saranno descritte nel libro.

Familiarizzandosi con il sistema UNS si riesce a ottenere una visione equilibrata dell'insieme dei metalli e delle leghe di maggiore interesse e in seguito se uno dovrà trasferire questa conoscenza a un sistema diverso, ma che abbia parimenti l'intento di coprire in maniera ragionevole l'intero campo della designazione di metalli e leghe, il passaggio risulterà verosimilmente immediato (almeno se non diventerà indispensabile usare lingue dell'Estremo Oriente).

In particolare, le probabilità che proprio il sistema UNS ottenga un riconoscimento universale appaiono oggi piuttosto piccole e i motivi sono più di uno. Non è difficile, volendo, trovare difetti in questo sistema, come probabilmente in qualsiasi altro. Alla base, può risultare ostico accettare proposte normative provenienti dai tecnici statunitensi, gli stessi che continuano imperterriti a usare pollici, onces, galloni e tante altre misure che in Europa sono un antico ricordo. Il fatto stesso che il sistema UNS sia nato principalmente come il tentativo di riunire in un solo sistema precedenti sistemi americani già impostati separatamente su base numerica per acciai, leghe di rame e di alluminio porta direttamente (con l'aggiunta di una o due cifre mancanti, tipicamente degli zeri) dentro al nuovo sistema designazioni che di internazionale possono avere solo forse il desiderio dei proponenti.

A noi interessa ovviamente la normativa italiana e quella europea che si muovono da anni in parallelo. Un grosso passo fu fatto nel 1990 con una nuova normativa europea, ISO/TR 7003; modifiche alle designazioni tuttavia sono state introdotte prima e dopo. Le tradizioni nazionali sono dure da sostituire e si comincia appena a intravedere un sistema in grado di ottenere un'accettazione generale in Europa.

L'ente europeo per la standardizzazione è il CEN (Comitato Europeo di Normazione). Le proposte recenti sulla designazione dei metalli hanno dei punti che sono considerati di miglioramento rispetto al sistema UNS, che in fondo non è comunque molto diverso. Si propone ancora una sigla di sei cifre (che però contengono anche lettere) con una lettera iniziale che indica subito l'elemento base, come segue:

Prima lettera del sistema di designazione CEN.

A	Alluminio
B	Metalli leggeri
C	Rame
F	Leghe ferrose
G	Oro, argento, platino
H	Metalli altofondenti
J	Getti di ferro e ghisa
L	Metalli bassofondenti
N	Nichel e cobalto
P	Metalli per metallurgia delle polveri
S	Acciai
T	Acciai
Z	Zinco e cadmio

Si considera poi che la presenza di qualche altra lettera invece di tutti numeri nel seguito della sigla sia utile per moltiplicare il numero delle sigle disponibili per un dato metallo (un po' lo stesso ragionamento che ha portato in Italia alle nuove targhe automobilistiche, anche se poi per le leghe le lettere effettivamente utilizzate sembrano solo un numero assai limitato). In particolare ci sono lettere nella seconda e nella sesta posizione, con tre cifre numeriche intermedie, come si può controllare negli esempi alla fine del capitolo seguente.

Complementi sui sistemi di designazione

Si può iniziare con un elenco completo della corrispondenza fra elementi chimici di base e sigla UNS.

Sigle UNS di metalli non ferrosi

- A00001-A99999 Aluminio e leghe
- C00001-C99999 Rame e leghe
- E00001-E99999 Terre rare e leghe (18)
 - E00000-E00999 Attinio
 - EO1000-E20999 Cerio
 - E21000-E45999 Miscela di terre rare
 - E46000-E47999 Disprozio
 - E48000-E49999 Erbio
 - E50000-E51999 Europio
 - E52000-E55999 Gadolinio
 - E56000-E57999 Osmio
 - E58000-E67999 Lantanio
 - E68000-E68999 Lutezio
 - E69000-E73999 Neodimio
 - E74000-E77999 Praseodimio
 - E78000-E78999 Promezio
 - E79000-E82999 Samario
 - E83000-E84999 Scandio
 - E85000-E86999 Terbio
 - E87000-E87999 Tulio
 - E88000-E89999 Itterbio
 - E90000-E99999 Ittrio
- L00001-L99999 Metalli bassofondenti e leghe (13)
 - L00001-L00999 Bismuto
 - L01001-L01999 Cadmio
 - L02001-L02999 Cesio
 - L03001-L03999 Gallio
 - L04001-L04999 Indio
 - L06001-L06999 Litio
 - L07001-L07999 Mercurio
 - L08001-L08999 Potassio
 - L09001-L09999 Rubidio
 - L10001-L10999 Selenio
 - L11001-L11999 Sodio