



**GUIDA TECNICA SULLA
BRASATURA DELL'ACCIAIO INOX**



SOMMARIO

1. Introduzione (principi base della brasatura)

- 1.1 Bagnabilità**
- 1.2 Capillarità**
- 1.3 Definizioni**

2. L'Acciaio

- 2.1 Generalità**
- 2.2 Acciai al carbonio**
- 2.3 Acciai inossidabili**
 - 2.3.1 Acciai inox ferritici (serie AISI 4XX)*
 - 2.3.2 Acciai inox martensitici (serie AISI 5XX - 4XX)*
 - 2.3.3 Acciai inox austenitici (serie AISI 3XX - 2XX) e superaustenitici)*

3. Lega brasante

- 3.1 Scelta della lega**
- 3.2 Principali leghe brasanti**
 - 3.2.1 Leghe brasanti base Ag*
 - 3.2.2 Leghe brasanti base Ni*
 - 3.2.3 Leghe brasanti base Cu*

4. Il processo in vuoto e i parametri di brasatura

- 4.1 Il vuoto**
- 4.2 Il sistema**
 - 4.2.1 Pre-vuoto*
 - 4.2.2 Alto vuoto*
 - 4.2.3 Camera termica*
 - 4.2.4 Schermatura*
- 4.3 Meccanismo di rimozione degli ossidi**

5. Crevice corrosion

- 5.1 Generalità**
- 5.2 Parametri di brasatura**
 - 5.2.1 Prove pratiche*
 - 5.2.2 Leghe brasanti speciali*
 - 5.2.3 Disossidanti*

1. Introduzione (principi base della brasatura)

La brasatura è un processo di unione di materiali metallici, realizzato per fusione del solo metallo d'apporto, detto lega, il cui punto di fusione è più basso di quello del metallo base. La brasatura si suddivide in *brasatura forte* in cui il materiale d'apporto ha una temperatura di fusione superiore ai 450 °C, *brasatura dolce* nella quale la temperatura di fusione è inferiore ai 450 °C e *saldobrasatura*. La brasatura forte e dolce sono in grado di assicurare un legame metallurgico tra i materiali in virtù del fenomeno della bagnabilità e della capillarità, nella saldobrasatura è presente solo il fenomeno della bagnabilità.

1.1 Bagnabilità

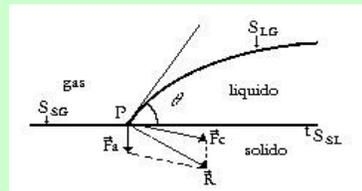
Un metallo si definisce bagnabile da una lega, quando ad una determinata temperatura, la lega è in grado di penetrare a livello intermolecolare nel metallo stesso, creando quindi uno strato superficiale intermedio tra lega e metallo che genera la giunzione degli stessi.

Di solito tale fenomeno avviene sempre alla temperatura di fusione della lega brasante, quindi la bagnabilità avviene quando il metallo di base è ancora allo stato solido, mentre la lega brasante è allo stato liquido. A questa determinata temperatura, la lega è in grado di penetrare a livello intermolecolare nel metallo di base e, viceversa, il metallo di base penetra nella lega fusa. In questo modo si forma uno strato intermedio superficiale tra metallo di base e lega che, al momento del raffreddamento, rappresenta la giunzione stessa. Ovviamente non tutte le leghe sono in grado di bagnare i metalli, devono essere scelte leghe e metalli compatibili, inoltre la superficie di base, per essere bagnata dalla lega, deve essere libera da ossidi e pulita da qualsiasi residuo di olio o sporcizia. Generalmente, per eliminare gli ossidi dalla superficie dei metalli si usano i disossidanti.

La teoria: La bagnabilità è regolata dalle tensioni superficiali agenti secondo piccoli angoli di contatto solido-liquido; le forze di coesione tra le molecole della lega liquida fanno sì che lo strato superficiale sia soggetto ad una forza attrattiva verso l'interno facendone assumere l'estensione minima ovvero quella sferica.

Le molecole sulla superficie della lega liquida possiedono una energia potenziale superiore a quelle dell'interno pertanto per aumentare l'estensione della superficie libera di un liquido occorre spendere un'energia proporzionale all'aumento di superficie. La tensione superficiale di un liquido rappresenta la quantità di energia richiesta per aumentare l'estensione della superficie di una unità mantenendo costante la temperatura del sistema. In presenza del metallo base, esso ha influenza sui valori della tensione superficiale ovvero le sue molecole svolgono attraverso le forze di adesione delle azioni sulle molecole dello strato superficiale del liquido. Quando solido e liquido vengono a contatto a causa delle interazioni tra diverse fasi (solido-liquido) si stabilisce una tensione interfacciale; il profilo di una parte della lega liquida posta sulla superficie del metallo base solido, formerà con essa un angolo θ , che sarà maggiore o minore di 90 ° a seconda che nel punto di contatto P prevalga la risultante delle forze di adesione F_a o quella delle forze di coesione F_c . In definitiva si avranno le seguenti condizioni:

- $F_a > F_c \Rightarrow \theta < 90^\circ$ la superficie è bagnabile
- $F_a < F_c \Rightarrow \theta > 90^\circ$ la superficie è difficilmente bagnabile
- Casi limite: $\theta = 180^\circ$ assenza totale di bagnabilità
 $\theta = 0^\circ$ bagnabilità completa.



La bagnabilità è quindi favorita da: basse tensioni interfacciali, elevate energie superficiali, stato di levigatezza e presenza di impurità sulla superficie del materiale stesso.

1.2 Capillarità

La forza di capillarità rappresenta la capacità della lega fusa di penetrare all'interno di tutte le intercedini presenti nei giunti che si vogliono unire. In questo modo la lega è in grado di riempire tutti gli interstizi realizzando una giunzione completa senza lasciare fori o porosità. La lega, infatti, alla temperatura di brasatura (stessa della bagnabilità) viene attratta all'interno dei giunti che si vogliono unire e può vincere anche la forza di gravità. E' evidente che le tolleranze del giunto che si vuole unire devono essere corrette (né troppo strette, né troppo larghe), e che, quello che fa fede, sono le tolleranze alla temperatura di brasatura e non quelle a temperatura ambiente.

Si è dimostrato che anche la forma del giunto può influire sulla forza di capillarità, infatti forme di giunti triangolari o angolari hanno una forza maggiore rispetto a giunti rotondi o quadrati. In questo caso, per forma geometrica si intende la forma della luce all'interno della quale deve infilarsi la lega brasante al momento della brasatura.

1.3 Definizioni

Acciaio al carbonio: acciaio costituito essenzialmente da ferro e carbonio senza altri elementi intenzionalmente aggiunti.

Atmosfera: ambiente gassoso nel quale il metallo da trattare è riscaldato per il processo. Atmosfere particolari sono utilizzate per proteggere la superficie del metallo o per modificare l'attività chimica degli elementi sulla superficie.

Austenite: è il nome attribuito a qualunque soluzione solida nel quale il ferro α sia il solvente. E' il nome di una struttura e non indica nulla a proposito della composizione chimica.

Corrosione intergranulare: corrosione che avviene preferibilmente al bordo del grano, solitamente con un attacco trascurabile o nullo dei grani adiacenti.

Cricca: discontinuità microscopica o macroscopica di un metallo in cui due dimensioni sono decisamente più importanti della terza. La presenza di questa discontinuità in un manufatto sollecitato implica all'apice della cricca l'incremento delle sollecitazioni locali.

Diagramma di equilibrio o di stato: rappresentazione grafica di temperatura, pressione e composizione dei limiti di esistenza delle fasi in una lega in condizioni di completo equilibrio.

Eutettico: una lega avente la composizione indicata dal punto eutettico nel diagramma di equilibrio.

Ferrite: è il nome dato alla soluzione solida nella quale il ferro alfa (CCC) svolge il ruolo di solvente. La ferrite denomina una struttura e non una composizione.

Martensite: prodotto di trasformazione estremamente duro che si forma nel caso in cui l'acciaio sia raffreddato rapidamente dalla sua temperatura di austenitizzazione (tempra) fino solitamente alla temperatura ambiente.

Modulo di elasticità: è una misura della rigidità, definito come il rapporto fra la sollecitazione unitaria, al di sotto del limite di proporzionalità, ed il corrispondente valore della deformazione unitaria. Nel caso in cui la sollecitazione è di trazione prende il nome di modulo di Young.

Ossidazione: reazione di corrosione nella quale il metallo corroso forma l'ossido.

Tenacità: capacità di un metallo di assorbire energia e di deformarsi plasticamente prima di rompersi.

2. L'Acciaio

2.1 Generalità

Gli acciai sono leghe ferrose contenenti un tenore di Carbonio inferiore al 2%. Essi si distinguono in “non legati” e “legati”. Per quanto riguarda le fasi e i costituenti strutturali, si veda il diagramma di stato Ferro-Carbonio riportato in figura n.1. L'acciaio costituisce il più importante prodotto della siderurgia mondiale, ed è commercializzato in varie tipologie, ciascuna con caratteristiche diverse, classificabili secondo la composizione chimica, la struttura, il processo di produzione o l'impiego prevalente.

Le proprietà fisico-strutturali dei vari tipi di acciaio dipendono principalmente dalla quantità di carbonio presente e dalla sua distribuzione nel ferro. Prima di essere sottoposti al trattamento termico, come verrà descritto successivamente, la maggior parte degli acciai sono una miscela di tre costituenti: ferrite, perlite e cementite. La ferrite, tenera e duttile, è ferro contenente in soluzione piccole quantità di carbonio e altri elementi; la cementite, estremamente brillante e dura, è un composto intermetallico costituito da ferro che contiene in soluzione elevate percentuali di carbonio; la perlite è una miscela omogenea di ferrite e cementite, di composizione e struttura specifiche, con proprietà fisiche intermedie tra quelle dei due costituenti. La tenacità, la resistenza e la durezza di un acciaio, non sottoposto a trattamento termico, dipendono dalle proporzioni di tali tre costituenti.

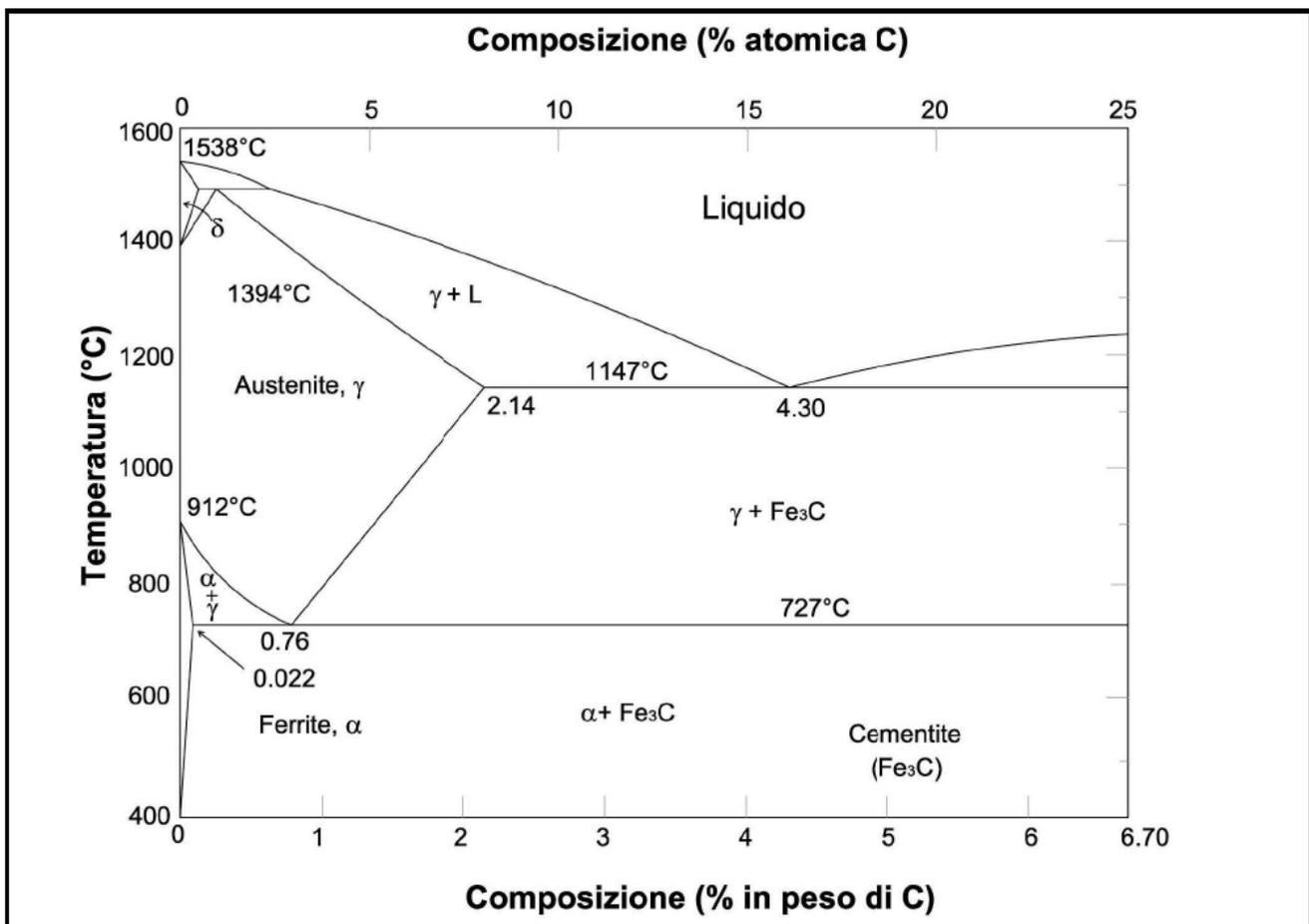


Figura 1: Diagramma di stato Fe-C.

All'aumentare della percentuale di carbonio contenuto nell'acciaio, la quantità di ferrite diminuisce e quella di perlite aumenta, finché, quando il contenuto di carbonio raggiunge il valore 0.76%, concentrazione detta "eutettoïdica", l'acciaio risulta costituito interamente da perlite. Aumentando ulteriormente la percentuale di carbonio, l'acciaio diventa una miscela di perlite e cementite. Al variare della temperatura invece si osserva che il riscaldamento dell'acciaio a temperature che sono funzione della percentuale di carbonio, la ferrite e la cementite iniziano a trasformarsi in una forma allotropica di lega ferro-carbonio, definita austenite o fase J, in cui tutto il carbonio presente allo stato libero nel metallo si solubilizza nell'unica fase. A questo punto, se l'acciaio è raffreddato lentamente, l'austenite si trasforma nuovamente in ferrite e perlite; se invece il raffreddamento è repentino, l'austenite si "congela" e si verifica un particolare fenomeno non diffusivo che dà luogo ad una struttura detta "martensite", una forma allotropica estremamente dura, simile alla ferrite ma contenente carbonio in soluzione solida. Questo procedimento di raffreddamento rapido, è definito "tempra", ed è uno dei più diffusi trattamenti termici dell'acciaio.

Le principali temperature critiche di trasformazione allotropica sono definite come segue:

A1 : temperatura di equilibrio dell'austenite rispetto a ferrite + cementite;

A3 : temperatura di equilibrio dell'austenite rispetto a ferrite;

Acm : temperatura di equilibrio dell'austenite rispetto a austenite + cementite.

2.2 Acciai al carbonio

Gli acciai contenenti in lega solo carbonio rappresentano il tipo più comune e meno pregiato; a seconda del tenore di carbonio, possono essere lavorati e saldati facilmente, ma sono fortemente soggetti a fenomeni di corrosione, in particolare ad elevate temperature. Ad alte temperature inoltre decadono le principali caratteristiche meccaniche.

Essi si dividono in acciai dolci e acciai extradolci (con meno dell'1% di carbonio) e acciai duri (con tenore di carbonio superiore); i primi sono molto duttili, malleabili e resilienti mentre i secondi sono meno resilienti ma più duri superficialmente; inoltre sono facilmente temprabili, trattamento che non dà buoni risultati con gli acciai dolci.

Per aumentare alcune caratteristiche meccaniche, per preservarle a caldo, per ottenere caratteristiche particolari, per effettuare trattamenti termici speciali, si aggiungono al sistema binario Fe-C alcuni elementi in lega. L'effetto dei principali di essi negli acciai è illustrato in tabella A.

Elemento in lega	Effetto principale
Alluminio	Disossidante
Cromo	Aumenta la resistenza alla corrosione e all'ossidazione, aumenta la temprabilità, contribuisce alla resistenza meccanica ad alta temperatura
Nichel	Austenizzazione, tenacizzazione, aumenta la resistenza
Manganese	Aumenta la temprabilità, migliora le caratteristiche di resistenza all'urto
Molibdeno	Approfondisce l'effetto della tempra, aumenta la resistenza meccanica a caldo, aumenta la resistenza alla corrosione
Cobalto	Aumenta le caratteristiche di durezza a caldo
Silicio	Disossidante, aumenta la resistenza dagli acciai basso-legati
Titanio	Forma carburi, previene la formazione di austenite
Tungsteno	Aumenta la resistenza all'usura, aumenta la resistenza a caldo
Vanadio	Aumenta la temprabilità
Fosforo	Migliora la lavorabilità all'utensile degli acciai automatici

Tabella A: Effetto dei principali elementi in lega degli acciai.

2.3 Acciai inossidabili

Quando in lega sono presenti in forti tenori altri elementi, l'acciaio si definisce "fortemente legato" e non è più valido, in generale, il diagramma di stato "semplice" Ferro-Carbonio precedentemente illustrato. Tra gli acciai fortemente legati, di notevole importanza ci sono quelli detti "inossidabili" o "inox" o "stainless" (senza macchia).

Gli acciai inossidabili sono delle leghe a base di ferro, di cromo e di carbonio arricchite di altri elementi quali nichel, molibdeno, silicio, titanio, etc. La loro caratteristica peculiare è l'elevata resistenza all'attacco corrosivo degli agenti atmosferici; questa caratteristica è determinata dalla formazione spontanea sulla superficie dell'acciaio di un sottile strato di ossidi di cromo che protegge il metallo sottostante dagli attacchi corrosivi. Il fenomeno si definisce "passivazione". Tale strato è formato in gran parte da ossido di cromo e da ossidi metallici. Questo strato, molto stabile e resistente, evita il contatto diretto tra atmosfera circostante e interno dell'acciaio e, a differenza dei comuni trattamenti di rivestimento protettivo (zincatura, verniciatura, etc.) ha la capacità di riformarsi anche in seguito a rottura accidentale rendendo il materiale intrinsecamente resistente alla corrosione. In queste leghe il cromo deve essere presente in quantità non inferiori al 11%, per essere disponibile alla formazione di ossidi che riportano la perdita di peso per ossidazione dell'acciaio (corrosione) in funzione della percentuale di cromo presente in lega. Lo strato protettivo di ossidi di cromo presenta una resistenza e un ancoraggio al materiale che dipende dalla concentrazione di cromo presente in lega e dall'eventuale presenza di altri elementi, quali nichel, molibdeno, titanio, etc.

Esistono quindi diversi gradi di inossidabilità o, in altre parole, una scala di nobiltà, determinata dalla presenza in lega degli elementi prima ricordati. Gli acciai inossidabili sono suddivisi in tre gruppi principali in base alle caratteristiche strutturali della lega stessa:

- ⇒ Acciai Ferritici: Fe + Cr (15 ÷ 30%) + basso tenore di C (0.02 ÷ 0.1%);
- ⇒ Acciai Martensitici: Fe + Cr (12 ÷ 19%) + medio tenore di C (0.08 ÷ 1.2%);
- ⇒ Acciai Austenitici: Fe + Cr (16 ÷ 28%) + Ni (6 ÷ 32%) + C (0.02 ÷ 0.1%) NON magnetici.

Le differenze tra i vari gruppi sono sia nella composizione chimica che nelle caratteristiche della lega, quali le proprietà meccaniche e le proprietà di resistenza alla corrosione.

2.3.1 Acciai inox ferritici (serie AISI 4XX)

Sono leghe Fe-C-Cr con lievi aggiunte di altri elementi come Mo; per forti tenori di Cromo, il diagramma di stato è caratterizzato dall'assenza delle temperature di trasformazione A1 e A3, poiché l'effetto del principale elemento in lega, il cromo, è quello "ferritizzante", cioè quello di restringere il campo di esistenza della soluzione solida J. La loro struttura è quindi ferritica e vi si possono trovare carburi precipitati. Ciò comporta incapacità, in caso di forti tenori di Cromo, di ottenere indurimento da trattamenti termici, quali la tempra. Tali acciai possono però migliorare le caratteristiche meccaniche di resistenza attraverso incrudimento mediante lavorazioni a freddo. Nella classificazione AISI sono definiti come "serie 400". Nel seguito sono elencati i tipi più comuni:

AISI 430: "acciaio con 17% di cromo", usato tipicamente per pentole, molto lucido, facilmente lavorabile a freddo, presenta un basso incrudimento. Buone caratteristiche di resistenza alla corrosione sia a temperatura ambiente che a temperatura elevata, e ottima resistenza a caldo ai gas solforosi secchi;

AISI 430F: variazione del precedente con aggiunta di zolfo per migliorarne la lavorabilità alle macchine utensili per asportazione di truciolo;

AISI 405: contiene in lega Cr ed Al, ed è studiato per ottenere buone caratteristiche di tenacità nelle strutture saldate. Può essere impiegato a temperature abbastanza elevate, nei casi di tubi per scambiatori di calore, piatti, campane, torri di distillazione;

AISI 409: studiato per la realizzazione di silenziatori per autovetture, è facilmente lavorabile per deformazione plastica e dà luogo a saldature abbastanza tenaci;

AISI 410: è molto usato soprattutto per il basso costo; è utilizzato laddove vi siano necessità di elevate quantità di prodotto e buona resistenza alla corrosione. Ad esempio è molto utilizzato come materiale di riempimento per le torri di distillazione per aumentare la superficie utile negli scambiatori di calore.

2.3.2 Acciai inox martensitici (serie AISI 5XX - 4XX)

Sono leghe in cui il tenore di cromo è generalmente compreso tra il 12% e il 17% ed è bilanciato con un medio tenore di carbonio in modo da ottenere, dopo il trattamento termico di tempra, in questo caso possibile, una struttura completamente martensitica, es. AISI 416, AISI 420 e 440. In particolare il 440 è tipicamente usato per la realizzazione di lame di coltelli.

2.3.3 Acciai inox austenitici (serie AISI 3XX - 2XX) e superaustenitici

Non possiedono temperature di trasformazione A1 e A3 poiché l'effetto del principale elemento in lega, il nichel, è quello di allargare il campo di esistenza della soluzione solida J; hanno quindi struttura austenitica in tutto il campo di esistenza. Si dividono in due gruppi:

1. Fe-C-Cr-Ni;
2. Fe-C-Cr-Ni-Mo.

Nella classificazione AISI sono identificati come "serie 300":

AISI 301 - 302 - 302B - ... - 305 - 308 - 384: si differenziano per la diversa quantità di Ni. All'aumentare di questa, diminuisce l'incrudimento durante la lavorazione. Possiedono caratteristiche meccaniche non elevate a temperatura ambiente, mentre sono ottime a temperature molto basse, soprattutto la resilienza, ed elevata resistenza a fatica con scarsa sensibilità agli intagli (corrispondenze: AISI 304 – UNI X5CrNi1810);

AISI 309 - 309S - 310 - 314: anch'essi si distinguono per la presenza di Ni. Sono acciai resistenti alle elevate temperature. Sono anche chiamati acciai "refrattari" ad indicare le elevate caratteristiche di resistenza alla corrosione, e meccanica che presentano a caldo;

AISI ... - 317: si distinguono per la presenza di Mo che permette buona resistenza alla corrosione per vaiolatura e più resistenza allo "stress corrosion". La presenza di Mo, elemento ferritizzante, implica un maggior utilizzo di Ni per garantire la stabilità dell'austenite. Rispetto ai precedenti, hanno migliori caratteristiche meccaniche ad elevate temperature (corrispondenze: AISI 316 – UNI X5CrNiMo17 12 2);

AISI 321 - 347 - 348: sono detti "stabilizzati", derivano dal 304 e dal 316 con aggiunta di Titanio e Niobio. La caratteristica più importante è quella di evitare fenomeni di formazione di ossidi e conseguente perdita di resistenza alla corrosione. L'elemento caratterizzante è il titanio in quantità comprese tra 0.3 e 0.4%;

AISI 304L - 316L: sono due varianti del 304 e 316 nella quali C è molto ridotto ($C < 0.03\%$) così da allungare talmente il tempo di precipitazione dei carburi di cromo nell'intervallo di temperature 450 – 850 °C da consentire l'esecuzione di strutture saldate senza che si verifichino precipitazioni di carburi nelle zone saldate. Le caratteristiche sono simili a temperatura ambiente, mentre sono leggermente inferiori a temperature elevate;

AISI 316SL: è caratterizzato soprattutto da un elevato tenore di Mo ($Mo \geq 2.5 \%$). Ha ottime caratteristiche di resistenza alla corrosione in generale.

Nella tabella B sono illustrate le sigle dei principali acciai inox, raggruppati per struttura cristallina. Nella tabella C sono illustrate alcune corrispondenze di codifica fra le norme europee e quelle americane, insieme agli impieghi, per alcuni fra i più comuni acciai. Gli acciai superaustenitici sono così definiti poiché presentano caratteristiche di resistenza alla corrosione ancora più elevate dei precedenti; la composizione chimica è caratterizzata da un basso tenore di carbonio e da un più elevato tenore di elementi quali cromo e nichel, oltre alla presenza di altri elementi in notevole quantità.

Austenitico	X8CrNiS1809 X2CrNi1811 X5CrNi1810 XCrNi1812 X6CrNiTi1811 X6CrNiNb1811 X2CrNiMo1712 X5CrNiMo1712-2 X6CrNiMoTi1712 X6CrNiMoNb1712
Ferritico	X6Cr17 X6CrMoS17
Martensitico	X12Cr13 X17CrNi16-2 X12CrS13

Tabella B: Strutture cristalline e composizione chimica degli acciai inox.

Impiego	UNI EN	AISI/ASTM
Acciai da cementazione	20NiCrMo2	8620
Acciai da bonifica	C40	1040
	42CrMo4	4140
	39NiCrMo3	9840
Acciai per molle	51CrV4	6150
Acciai per tempra superficiale	41CrMo4	4140
Acciai per utensili	X205Cr12KU	-
Acciai inossidabili	X5CrNi1810	304
	X5CrNiMo1712-2	316
	X2CrNiMo1712	316L
	X12Cr13	410
	X2CrNiMoCu2025415	904L

Tabella C: Corrispondenze di codifica fra le norme europee e quelle americane.

3. Lega brasante

3.1 Scelta della lega

Gli acciai inox a contatto con l'aria alla temperatura ambiente formano sulla loro superficie uno strato di ossido sottile, invisibile ma molto tenace responsabile della resistenza alla corrosione. Se rimosso, tale strato, chiamato strato passivante, si riforma; se riscaldato in aria fino alla temperatura di 500 °C aumenta il suo spessore fino a diventare visibile di colore giallo. In un processo di brasatura in forno a vuoto i residui di ossigeno/vapore se pur pochi provocano l'ossidazione dell'acciaio inox anche se con un grado di crescita molto ridotto. Nei processi di brasatura in forno a vuoto o ad atmosfera controllata sono utilizzate leghe brasanti a base argento ma principalmente nell'industria automotive sono impiegate le leghe a base nichel in particolare per la componentistica per il controllo dei gas di scarico; inoltre si utilizzano leghe base rame per la produzione di scambiatori di calore.

Consigli e soluzioni

- ⇒ Leghe a base nichel contenenti boro (es. Ni 102) sono incompatibili con forni ad atmosfera all'azoto devono quindi essere utilizzate in forni in vuoto;
- ⇒ Evitare di utilizzare in forni in vuoto leghe brasanti contenenti elementi che potrebbero volatilizzare come Cd, Zn, Ag, Cu, Mn.

3.2 Principali leghe brasanti

3.2.1 Leghe brasanti base Ag

Le leghe brasanti ad alto contenuto di Argento che non contengono zinco possono essere utilizzate in forno con atmosfera protettiva senza l'utilizzo del disossidante. Si raccomanda di non superare la temperatura di 900°C per evitare l'evaporazione dell'argento, in particolare nella brasatura sotto vuoto. La lega BrazeTec 6009 insieme al disossidante BrazeTec Spezial H è particolarmente indicata nella brasatura dell'acciaio inox.

Lega	Composizione in peso %					Intervallo di fusione in °C	Temp. di lavoro in °C	Densità in g/cm ³	Applicazioni particolari	DIN EN 1044	ISO 17672
	Ag	Cu	Sn	Zn	Mn						
7291	72	-	-	28	-	710-730	730	9,1	-	-	-
7200	72	28	-	-	-	780	780	10	Ceramica metallizzata	AG 401	Ag 272
6009	60	30	10	-	-	600-730	720	9,8	Acciaio inossidabile	AG 402	Ag 160

3.2.2 Leghe brasanti base Ni

Le paste brasanti BrazeTec a base Nichel, grazie alla loro composizione innovativa, permettono di essere applicate in tutti i modi possibili: screen-printing (a membrana, serigrafia), spray, immersione, roller-coating, tramite distributori, utilizzo di siringhe. Le paste brasanti a base Nichel sono utilizzate principalmente nella produzione di scambiatori di calore (EGR cooler) nel settore automotive.

Lega		Composizione in peso %						Intervallo di fusione in °C	Temp. di lavoro in °C	Atm	Base solvente	Base acqua	DIN EN 1044	ISO 17672
		Ni	Cr	Si	B	P	Altro							
ML4121	1002	82,4	7	4,5	3,1	-	3Fe	970-1000	1060	A,B	P,R,S	D,S	NI 102	Ni 620
ML442	897	76	14	-	-	10	-	890	1020	A,B,C	P,S	D,S	NI 107	Ni 710
ML4127	1080	73,9	14	4,5	3,1	-	4,5Fe	980-1070	1175	A,B	P,S	-	NI 1A1	Ni 610
-	1130	72	18	8	-	2	-	1050-1090	1080	A,B,C	-	D	-	-
ML4116	1135	71	19	10	-	-	-	1080-1135	1190	A,B,C	P,R,S	D,S	NI 105	Ni 650
-	1090	60	30	4	-	6	-	980-1040	1090	A,B,C	R	D,S	-	-

A= idrogeno secco, B= sottovuoto, C= ammoniaca dissociata (miscela di H₂+N₂) punto di rugiada -30°C, E=atmosfera esotermica, D= dispenser, P= serigrafia, R= rullo, S= spruzzo.

3.2.3 Leghe brasanti base Cu

Le paste base rame per brasatura in forno hanno un uso versatile: sono caratterizzate dalla loro facile dosabilità e possono essere utilizzate in diverse atmosfere protettive. Trovano vasta applicazione nel settore automotive e nell'industria degli scambiatori di calore.

Lega		Composizione in peso %						Intervallo di fusione in °C	Temp. di lavoro in °C	Atm	DIN EN 1044	ISO 17672
		Cu	Ni	Sn	Mn	P	Co					
ML100	-	99	-	-	-	-	-	1085	1100	A,B,C,D	CU 103	Cu 099
ML104	-	96	-	4	-	-	-	960-1060	1090	A,B,C,D	-	-
ML106	802	94	-	6	-	-	-	910-1040	1060	A,B,C,D	-	-

A= idrogeno secco, B= sottovuoto, C= ammoniaca dissociata (miscela di H₂+N₂) punto di rugiada -30°C, D= exogas

4. Il processo in vuoto e i parametri di brasatura

4.1 Il vuoto

I processi di brasatura in forno per acciaio inox possono essere ad atmosfera controllata o in vuoto. Quando si parla di “vuoto” si fa riferimento a condizioni in cui la pressione è inferiore a quella atmosferica. L’unità di misura nel Sistema Internazionale (SI) è il Pascal ($\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 10^{-2}$ mbar), ma nell’uso comune si fa riferimento al millibar (mbar) pari a 100 Pa e al mm Hg o torr, che è pari a circa $4/3 \times 10^2$ Pa

In base ai diversi valori di pressione si definiscono i seguenti campi di vuoto:

- basso vuoto $\text{atm} > p > 1$ mbar;
- medio vuoto $1 > p > 10^{-3}$ mbar;
- alto vuoto $10^{-3} < p > 10^{-7}$ mbar;
- ultra-alto vuoto $p < 10^{-7}$ mbar;
- vuoto estremo $p < 10^{-11}$ mbar;



Il vuoto esiste in natura nello spazio (10^{-8} mbar), ma può anche essere prodotto artificialmente raggiungendo in casi particolari pressioni anche inferiori a 10^{-11} mbar. Fare il vuoto in una camera significa asportare le molecole di gas/vapore in essa presenti e di conseguenza:

- sono inibiti tutti i processi chimico-fisici che avvengono in aria;
- è possibile pensare al trasporto di molecole, atomi o ioni (es. negli acceleratori di particelle o nei sistemi CVD, PVD);
- il trasporto di calore per convezione è trascurabile dato che gli urti con le superfici sono molto limitati;
- il gas/vapore assorbito dalle superfici di un materiale in vuoto sarà rilasciato e portato via dal sistema di vuoto.

4.2 Il sistema

Per realizzare il vuoto all’interno della camera è indispensabile avere a disposizione un sistema per creare il vuoto. In un forno a vuoto a seconda del volume della camera e del grado di vuoto da realizzare saranno previsti uno o più sistemi per realizzarlo. Nei forni più ad alto vuoto si utilizzano 2 sottosistemi che lavorano con range di pressione diversi:

- il sistema di pre-vuoto che porta velocemente la camera dalla pressione atmosferica fino a 10^{-3} mbar;
- il sistema di alto vuoto che permette di raggiungere i 10^{-7} mbar

4.2.1 Pre-vuoto

Per garantire una veloce evacuazione della camera del forno si utilizza il gruppo di pre-vuoto formato da una roots (rotori) in combinazione con una pompa rotativa meccanica.

La combinazione delle due pompe permette di portare la pressione nella camera ad un vuoto parziale dell’ordine dei 10^{-2} mbar in soli pochi minuti (10-15 min).

4.2.2 Alto vuoto

Per abbassare ulteriormente la pressione e raggiungere condizioni di alto vuoto, 10^{-7} mbar, si utilizzano delle pompe criogeniche. La loro velocità di pompaggio varia in base al tipo di gas presente nella camera. Per avere una indicazione, la velocità di pompaggio per l’aria è di 6000 l/s; usandole alternativamente è garantito un funzionamento continuo anche durante la fase di rigenerazione (30 min).

Una pompa criogenica è costituita da una camera da vuoto che contiene un cilindro in cui è fatto espandere l'elio compresso. A questa parte fredda sono collegate due serie di pannelli speciali:

- quelli più vicini al cilindro sono portati a 15 K (gradi Kelvin);
- quelli più esterni che si affacciano alla camera sono ad 80 K (gradi Kelvin);

Una schermatura, sempre ad 80 K (gradi Kelvin), circonda e isola tutta la parte interna del cilindro di espansione dall'irraggiamento esterno. Il funzionamento di una pompa criogenica si basa su 3 meccanismi di pompaggio:

- condensazione;
- crioassorbimento;
- cryotrapping;

La condensazione si ha quando un gas è a contatto con una parete fredda dove la pressione di vapore è molto bassa, cede calore e si condensa su di essa. L'azione si svolge anche su spessori macroscopici (fino a 10 mm).

Il crioassorbimento è un'azione fisica tra le molecole e la superficie ed è attiva solo su un monostrato. Perciò non si utilizzano superfici metalliche la cui superficie attiva è pressoché quella geometrica, ma si cercano materiali che siano molto porosi, con un rapporto superficie/peso molto elevato.

Nel cryotrapping le molecole o gli atomi dei gas che sono difficilmente condensabili sono intrappolati da altri gas molto più facilmente condensabili.

4.2.3 Camera termica

La camera termica è la parte del forno nella quale viene inserita la carica. E' a forma cilindrica e si trova all'interno della camera da vuoto, coassiale ad essa. La parete esterna fa da supporto meccanico a tutti gli schermi termici ed i resistori. Realizzata sempre solitamente in acciaio inox, è progettata in modo da non subire deformazioni permanenti dovute ai cicli termici che conseguono ad ogni singolo ciclo di lavorazione.

Poiché in vuoto l'unico modo per trasmettere calore è per irraggiamento, per riscaldare i pezzi sono utilizzate delle opportune resistenze mentre una serie di schermature confina la zona calda riducendo le perdite di calore verso l'esterno e rendere uniforme quanto più possibile la temperatura all'interno.

Il calore è fornito per irraggiamento da un sistema di resistenze che sono formate da fasci di 10-12 fili di molibdeno di 3 mm di diametro. All'interno della camera i fasci sono posizionate in 4 differenti zone:

- parte inferiore del forno: è il piano di carico, che fa da supporto ai pezzi;
- parete verticale cilindrica: è a sua volta divisa in altre 3 zone, i resistori non sono a contatto con le superfici degli schermi termici, mentre sono vincolati alla parete esterna della camera termica con opportuni supporti di Molibdeno.

Per garantire un irraggiamento uniforme, le resistenze sono disposte ad onda, in modo da coprire uniformemente la superficie interna della camera termica. Ogni sezione è alimentata in modo indipendente da un sistema composto da un regolatore di corrente, un alimentatore statico, un trasformatore e una termocoppia che rileva in tempo reale la temperatura in modo che al variare della temperatura nominale ogni zona abbia un tempo di reazione molto più veloce e, potendo monitorare le varie zone singolarmente, sia garantita una migliore uniformità in tutta la camera.

4.2.4 Schermatura

La temperatura di lavoro all'interno della camera può arrivare fino a qualche migliaia di °C, mentre all'esterno della camera da vuoto non si possono superare i 30 gradi: è necessaria quindi un'ottima schermatura.

Poiché l'energia termica è fornita unicamente per irraggiamento sono stati fissati internamente alla parete della camera termica degli schermi che hanno il compito di fermare l'irraggiamento verso l'esterno ed impedire dispersioni contenendo il calore all'interno. Gli schermi sono disposti in modo da circondare tutta la camera termica, quindi sia sulla parete laterale che sulla parte inferiore e superiore.

Le schermature più interne, dovendo resistere a temperature che possono arrivare fino a qualche migliaia di °C, sono solitamente in molibdeno che ha una temperatura di fusione attorno ai 2600 °C.

4.3 Meccanismo di rimozione degli ossidi

In condizioni di brasatura in vuoto non è necessario l'impiego del disossidante. La brasatura in forno a vuoto può avvenire nelle seguenti situazioni:

- 1) lo strato di ossido superficiale presenta delle discontinuità naturali in cui la lega fusa scorre e penetra; essendo le discontinuità irregolari e non controllabili, la brasatura risulterà incerta (tali discontinuità potrebbero non essere presenti nell'area di brasatura o tali discontinuità non sono abbastanza ampie o numerose);
- 2) riscaldando il giunto il coefficiente di dilatazione del materiale base risulta essere diverso da quello della sua superficie ossidata in questo modo sulla superficie dell'ossido si creano delle discontinuità/"crepe" uniformemente distribuite sul pezzo e quindi presenti anche sulla superficie da brasare permettendo così alla lega fusa di penetrare attraverso lo strato di ossido e bagnare il metallo base. Nel forno a vuoto affinché si verifichino delle apprezzabili discontinuità si devono raggiungere determinate temperature atte a creare la differenza di dilatazione tra metallo base e i suoi ossidi superficiali per questo motivo è importante che tutte le parti del pezzo siano riscaldate uniformemente.

La brasatura in vuoto offre notevoli vantaggi tecnologici ma anche qualche svantaggio:

Vantaggi:

- ⇒ le distorsioni termiche sono ridotte dato che i pezzi sono riscaldati interamente. Inoltre, alle temperature di brasatura, non cambiano le proprietà del materiale base;
- ⇒ la brasatura risulta estremamente pulita, grazie all'azione combinata del vuoto e delle alte temperature che favoriscono la pulizia superficiale dei pezzi dai gas assorbiti e i pezzi brasati non richiedono una pulizia successiva. Ovviamente prima di essere introdotti nel forno devono essere accuratamente puliti;
- ⇒ il processo è facilmente ripetibile purché sia eseguito con molta precisione;
- ⇒ possono essere realizzate microsaldature.

Svantaggi:

- ⇒ discontinuo dovendo caricare e scaricare i pezzi;
- ⇒ sono richiesti lunghi tempi per raggiungere le temperature di ciclo;
- ⇒ le lavorazioni meccaniche dei giunti richiedono precisioni nell'ordine dei centesimi per garantire la completa distribuzione del brasante;
- ⇒ una volta posizionati i pezzi e chiuso il forno non sono più possibili azioni correttive.

5. Cervice corrosion

5.1 Generalità

Gli acciai inossidabili possiedono eccellente resistenza alla corrosione e all'ossidazione e sono spesso impiegati nelle industrie chimiche o per applicazioni ad alta temperatura, le tre tipologie di acciai inox hanno ognuna speciali campi di applicazione:

- Ferritici: sono acciai magnetici, le loro proprietà non possono essere migliorate con trattamenti termici, sono impiegati per fabbricare pale delle turbine o posate o coltelli. Sono acciai difficili da brasare a causa del loro alto contenuto di Cr (12-18%);
- Martensitici: sono acciai magnetici, la resistenza meccanica e alla corrosione sono influenzate dal trattamento termico inoltre più alto è il contenuto di Cr maggiore è la resistenza alla corrosione. Sono impiegati nelle più estreme condizioni ambientali che si possono riscontrare in turbine, industrie chimiche o applicazioni aerospaziali. Sono utilizzati per produrre coltelleria di alta qualità in quanto mantengono l'affilatura per un periodo prolungato di tempo;
- Austenitici: sono acciai che non migliorano le loro proprietà se sottoposti a trattamenti termici ma dipendono dalle lavorazioni meccaniche a cui sono sottoposti. Se riscaldati nell'intervallo di temperatura 500 °C - 750 °C tendono a formare uno strato complesso di carburo di cromo sui bordi dei grani. Lo strato di carburo tende a criccare distaccandosi con modesti carichi di flessione e la superficie apparirà corrosa: questo fenomeno prende il nome di corrosione intergranulare. Un modo per evitare la formazione del carburo di cromo negli acciai austenitici è utilizzare il grado "L" di tali acciai (es. 304L).

Codifica degli acciai secondo le norme British Standard	Tipologia metallurgica
302	Austenitico
303	Austenitico
304	Austenitico
310	Austenitico
316	Austenitico
321	Austenitico
325	Austenitico
347	Austenitico
403	Ferritico
410	Martensitico
416	Martensitico
420	Martensitico
430	Ferritico
431	Martensitico

Tabella D: Classificazione degli acciai inox secondo le norme BS e la loro corrispondente tipologia metallurgica.

5.2 Parametri di brasatura

Particolare attenzione deve essere posta nella selezione della lega per brasare l'acciaio inox che in esercizio sarà esposto ad un ambiente ricco di umidità. In queste condizioni nel giunto si innesca la formazione di una specifica tipologia di corrosione interfacciale nell'acciaio inox pochi micron sotto la parte brasata: questo tipo di fenomeno prende il nome generico di "crevice corrosion" (corrosione di fessurazione) ma per essere più rigorosi si dovrebbe chiamare corrosione interfacciale. Il fenomeno della comparsa della corrosione è comunemente associato ad un periodo di tempo molto lungo, nella realtà invece particolari condizioni ambientali unite all'utilizzo di certe leghe e disossidante portano alla nascita del fenomeno già dopo 3-6 mesi.

5.2.1 Prove pratiche

All'esame dei giunti, brasati con una normale lega quaternaria ad alto argento, in cui si è verificato il fenomeno della corrosione di fessurazione, è normale trovare che la superficie della parte del giunto brasata appaia brillante e senza porosità. Un ulteriore fattore distintivo è la presenza di un sottile deposito di ruggine lungo il perimetro esterno della lega fusa (vedi foto 1 e 2).



Foto 1: lega brasante prima della prova



Foto 2: lega brasante dopo della prova

Il fenomeno della corrosione interfacciale compare maggiormente negli acciai ferritici e martensitici piuttosto che negli austenitici ma dipende sempre dalle condizioni e l'ambiente di esercizio a cui è sottoposto il giunto. Utilizzando una lega speciale con la presenza nella sua composizione di nichel il fenomeno della corrosione risulta fortemente ritardato (vedi foto 3 e 4).



Foto 3: lega brasante prima della prova



Foto 4: lega brasante dopo della prova

La teoria: Utilizzando una lega contenente Zn o Cd che sono elementi basso fondenti si formano delle fasi ricche di metallo base (es. Cu-Zn-Cd-Fe e Cu-Zn-Fe). Queste fasi intermetalliche si diffondono nell'acciaio inox fino a 2 microns di profondità, se posti a contatto con ambienti umidi tendono a dissolversi portando rapidamente alla corrosione prima e alla rottura del giunto in seguito. Il fenomeno della corrosione è irreversibile ma può essere prevenuto utilizzando leghe speciali.

5.2.2 Leghe brasanti speciali

Le leghe brasanti per evitare il problema della corrosione interfacciale sono limitate in quanto non tutte le leghe prive di Zn o Cd sono adatte allo scopo inoltre se si considera anche l'aspetto economico la scelta si restringe a sole 4 leghe:

ISO 17672	Brazetec	Composizione	Intervallo di temperatura
-	-	56%Ag 27%Cu 14,5%In 2,5%Ni	600-711 °C
Ag 463	-	63%Ag 28,5%Cu 6%Sn 2,5%Ni	690-800 °C
Ag 160	6009	60%Ag 30%Cu 10%Sn	600-730 °C
-	6488	64%Ag 26%Cu 6%In 2%Mn 2%Ni	730-780 °C

Tra le leghe indicate quelle contenenti In sono le migliori in caso sia necessario brasare giunti in cui il coefficiente di espansione termica lineare sia molto basso rispetto a quello dell'acciaio inox ovvero dove sia necessario attenuare le sovra-tensioni in fase di raffreddamento. In questi casi la lega Brazetec 6488 è disponibile anche in nastro trimetallico col nome di lega Brazetec 64Cu.

5.2.3 Disossidanti

A causa della presenza del cromo nell'acciaio, gli ossidi che si sono formati durante la normale ossidazione a contatto con l'aria sono molto tenaci e abbastanza difficili da rimuovere. Per ottenere un risultato soddisfacente deve essere scelto un disossidante e un metodo di riscaldamento appropriato. Il flux più appropriato per brasature in aria nella maggior parte dei casi è un flux contenente fluoruro (tipo EN 1045: FH 10). Migliori risultati possono essere ottenuti con un flux a base silico-fluoruro in particolare se il ciclo di brasatura supera il minuto; il lato meno apprezzabile di questo flux è che i suoi residui sono molto difficili da togliere e insolubili in acqua quindi rimuovibili solo attraverso spazzolatura meccanica.

Nella brasatura del giunto acciaio inox con metallo duro solitamente si utilizza un disossidante con boro > 1 (tipo EN 1045: FH 12) comunemente chiamato flux marrone o scuro per via del suo colore. Questo tipo di flux è da evitare nel caso in cui il giunto sia poi esposto all'umidità perché in fase di brasatura il boro diffonde sulla superficie dell'acciaio inox e reagendo con il Cr e Ni forma boruro di cromo e boruro di nichel. Questi composti sono bloccati nello strato superficiale dell'acciaio il quale cambia le sue proprietà ovvero diventa ricco di ferro quindi non inox. Se esposto all'umidità formerà ruggine fino alla possibile rottura del giunto, per evitare questo fenomeno è quindi consigliabile utilizzare solo disossidante "bianco" (tipo EN 1045: FH 10).

ITALBRAS S.P.A.
Strada del Balsego,6 - 36100 Vicenza (VI) – Italy
Tel. (+39) 0444 347500 Fax (+39) 0444 347501
E-mail info@italbras.it Web: www.italbras.it