



Linee Guida Pratiche per la Lavorazione di Acciai Inossidabili Austenitici ad Elevate Prestazioni

Linee Guida Pratiche per la Lavorazione di Acciai Inossidabili Austenitici ad Elevate Prestazioni

Prima edizione 2014

© IMOA 2010–2014

ISBN 978-1-907470-11-0

Pubblicato da International Molybdenum Association (IMOA),
Londra, UK

www.imoa.info

Co-pubblicato da International Chromium Development
Association (ICDA), Parigi, Francia,

www.icdachromium.com

e dal Nickel Institute, Toronto, Canada,

www.nickelinstitute.org

Preparato da TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA,
the Nickel Institute ed IMOA.

Edito dai consulenti IMOA Dott. John Shields, Cleveland, OH,
USA e Curt Kovach, Pittsburgh, PA, USA.

Grafica di circa drei, Monaco di Baviera, Germania

Ringraziamenti:

IMOA è grata ad Euro Inox, ICDA, John Grocki (consulente),
Outokumpu e Seco Tools per il supporto fornito, i riscontri ed
i contributi forniti.

La International Molybdenum Association (IMOA) ha messo
in atto ogni sforzo per assicurare che i contenuti presentati
siano tecnicamente corretti. Tuttavia, IMOA non garantisce o
assicura l'esattezza delle informazioni contenute in queste Linee
Guida né la loro idoneità per qualunque impiego, generale o
specifico. Si informa che il materiale in esse contenuto è per soli
scopi informativi; esso non va inteso in sostituzione di alcuna
procedura e non dovrebbe essere impiegato o richiamato per
alcuna applicazione, specifica o generale, senza aver ottenuto
prima un parere competente. IMOA, i suoi membri, lo staff ed i
consulenti declinano qualsiasi tipo di responsabilità per perdite,
danni o lesioni derivanti dall'impiego delle informazioni contenute
nella presente pubblicazione. In questa pubblicazione sono
state impiegate soprattutto specifiche internazionali ASTM ed
EN; tuttavia, le specifiche relative ai materiali possono variare
da nazione a nazione.

Foto di copertina: Lavorazione con acciaio inossidabile

Fonte: www.m-tec.uk.com (fabbricante), www.photo-genics.com (foto)

Indice

1	Introduzione	4
2	Storia degli acciai inossidabili austenitici	5
3	Metallurgia	7
3.1	Tipologie di acciaio inossidabile	7
3.2	Equilibrio delle fasi	7
3.3	Fasi secondarie – composti intermetallici	8
3.3.1	Temperature di stabilità delle fasi secondarie	8
3.3.2	Cinetica della formazione delle fasi secondarie	8
4	Funzione degli elementi di lega	12
4.1	Cromo (Cr)	12
4.2	Nichel (Ni)	12
4.3	Molibdeno (Mo)	12
4.4	Carbonio (C)	12
4.5	Azoto (N)	12
4.6	Manganese (Mn)	13
4.7	Rame (Cu)	13
4.8	Silicio (Si)	13
4.9	Niobio/columbio (Nb/Cb) e titanio (Ti)	13
4.10	Zolfo (S) e fosforo (P)	13
5	Proprietà meccaniche e fisiche	14
5.1	Resistenza	14
5.2	Duttilità e tenacità	16
5.3	Resistenza ad alta temperatura	16
5.4	Proprietà fisiche	16
6	Resistenza alla corrosione	21
6.1	Corrosione generalizzata	21
6.2.	Corrosione localizzata	21
6.2.1	Corrosione per vaiolatura ed interstiziale	21
6.2.2	Effetto delle fasi secondarie nella resistenza alla corrosione localizzata	22
6.2.3	Criccabilità da tensocorrosione	23
6.2.3.1	Tensocorrosione da cloruri (CSCC)	23
6.2.3.2	Tensocorrosione in altri ambienti	24
6.3	Corrosione intergranulare (IGA)/corrosione per sensibilizzazione	24
6.3.1	Sensibilizzazione dei giunti saldati/ decadimento della saldatura	25
6.3.2	Corrosione a lama di coltello	26
6.4	Relazione tra lavorazione e resistenza alla corrosione	26
7	Cura in officina – mantenere le superfici lisce e pulite	27
7.1	Protezione superficiale – fornitura iniziale e stoccaggio	27
7.2.	Lavorazione	28
8	Formatura a caldo e a freddo	29
8.1	Formatura a caldo	29

8.2	Formatura ad alta temperatura	30	12.1.6	Note sulla qualità dei giunti saldati	53
8.3	Formatura a freddo	30	12.1.7	Saldatura eterogenea (DMW)	54
8.3.1	Piegatura	31	12.2	Brasatura forte e dolce	54
8.3.2	Profilatura a rulli	31	12.2.1	Brasatura forte	54
8.4	Stampaggio e stiratura	31	12.2.2	Brasatura dolce	55
8.5	Tornitura in lastra (spin forming)	32			
8.6	Ricalcatura a freddo	32	13	Metodi di giunzione meccanici	56
9	Taglio	33	13.1	Metodi di giunzione	56
9.1	Taglio con sega	33	13.1.1	Collegamenti con bulloni, con viti	56
9.2	Cesoatura	33	13.1.2	Rivettatura	56
9.3	Punzonatura	34	13.1.3	Clinching	56
9.4	Taglio plasma	34	13.1.4	Aggraffatura	56
9.5	Taglio laser	34	13.1.5	Incollaggio	57
10	Lavorazioni di macchina	35	13.2	Note sulla corrosione dei collegamenti meccanici	57
10.1	Criteri generali	35	13.2.1	Corrosione interstiziale	57
10.2	Lavorabilità alle macchine utensili di diversi tipi di acciaio inossidabile	36	13.2.2	Corrosione galvanica	57
10.3	Tornitura	36	14	Pulitura post-lavorazione	58
10.4	Fresatura frontale con carburi cementati	36	14.1	Tipologie di danneggiamento e di contaminazione superficiale tipiche	58
10.5	Foratura con punte elicoidali in acciaio superrapido	38	14.1.1	Contaminazione da ferro	58
11	Trattamenti termici – ricottura e distensione	40	14.1.2	Contaminazione da composti organici	59
11.1	Ricottura di solubilizzazione	40	14.1.3	Ossidi formati durante la ricottura e la saldatura	59
11.1.1	Preparazione	40	14.1.4	Altri difetti	59
11.1.2	Temperatura	40	14.2	Metodi di pulitura post-lavorazione	60
11.1.3	Durata della ricottura	40	14.2.1	Sabbatura	60
11.1.4	Atmosfere	41	14.2.2	Sabbatura con particelle di vetro	60
11.1.5	Raffreddamento	41	14.2.3	Molatura e lucidatura	60
11.1.6	Pulitura dopo ricottura	42	14.2.4	Spazzole di acciaio inossidabile/lana di acciaio inossidabile	60
11.2	Distensione	42	14.2.5	Sgrassaggio	61
12	Saldatura, brasatura forte e dolce	44	14.2.6	Decapaggio acido	61
12.1	Saldatura	44	14.2.7	Passivazione	62
12.1.1	Influenza delle proprietà fisiche sulla saldatura	44	14.2.8	Elettrolucidatura	62
12.1.2	Preparazione dei lembi	44	14.3	Influenza dei metodi di pulitura nei confronti della resistenza alla corrosione	63
12.1.2.1	Pulitura dei lembi	45	15	Finitura superficiale	64
12.1.2.2	Assemblaggio, puntatura e bloccaggio	45	15.1	Influenza della finitura sulle prestazioni	64
12.1.3	Materiali d'apporto	46	15.2	Trattamenti di finitura effettuati in acciaieria	64
12.1.4	Difetti di saldatura	46	15.2.1	Lamiera spessa	64
12.1.4.1	Microcricche, cricche a caldo	46	15.2.2	Lamiera sottile e nastro	65
12.1.4.2	Sensibilizzazione	48	15.3	Finitura mediante lucidatura meccanica	66
12.1.4.3	Fasi secondarie	48	15.4	Finitura superficiale mediante abrasivi	67
12.1.4.4	Segregazioni in zona fusa	48	15.4.1	Abrasivi su supporto flessibile	67
12.1.5	Processi di saldatura	49	15.4.2	Prodotti non tessuti	67
12.1.5.1	Protezione gassosa	49	15.4.3	Paste lucidanti	68
12.1.5.2	Saldatura ad elettrodo infusibile (GTAW, detta anche TIG)	49	15.5	Ripristino e protezione della finitura dopo la lavorazione	68
12.1.5.3	Saldatura a filo continuo con protezione gassosa (GMAW, detta anche MIG)	50			
12.1.5.4	Saldatura con filo animato (FCAW)	51			
12.1.5.5	Saldatura ad elettrodo rivestito (SMAW, detta anche stick welding)	51			
12.1.5.6	Saldatura ad arco sommerso (SAW)	52			
				Lecture addizionali consigliate	69
				Riferimenti	70
				Marchi di fabbrica e nomi commerciali di produttori registrati	71
				Appendice: elenco delle specifiche ASTM ed EN per prodotti in acciaio inossidabile	72

1 Introduzione

Recentemente, nuovi acciai inossidabili austenitici ad elevata resistenza alla corrosione sono stati immessi sul mercato. Essi hanno evidenziato convenienza e prestazioni in una varietà di ambienti critici e corrosivi. Essi hanno supportato gli Ingegneri dei materiali con leghe adatte

alle nuove esigenze nel settore energetico ed ambientale. Questi nuovi materiali sono denominati Acciai Inossidabili Austenitici ad Elevate Prestazioni (HPASS). Essi ottengono le loro prestazioni grazie all'alligazione con tenori di molibdeno ed azoto superiori al normale. Essi sono più

complessi rispetto agli acciai inossidabili standard e richiedono che gli Ingegneri, i progettisti ed i fabbricanti abbiano opportuna conoscenza delle loro caratteristiche perché le specifiche e la loro lavorazione abbiano successo. Questa pubblicazione fornisce un'informazione di base sui tipi HPASS e li confronta con i tipi standard. Il suo scopo principale è confrontare le caratteristiche di lavorazione dei due gruppi di acciai ed identificare le analogie e le differenze. Queste informazioni possono aiutare i responsabili della trasformazione degli HPASS a realizzare prodotti ad elevata qualità che forniscano le prestazioni previste in servizio.



Impiego di un HPASS per uno scrubber flue gas. © Outokumpu

2 Storia degli acciai inossidabili austenitici

Gli acciai inossidabili furono introdotti all'inizio del ventesimo secolo come risultato di un lavoro pionieristico svolto in Inghilterra e Germania. Nel successivo mezzo secolo, i costruttori svilupparono una numerosa famiglia di acciai inossidabili che hanno servito ottimamente l'industria chimica, energetica, alimentare ed altre ancora. L'era moderna degli acciai inossidabili incominciò nei primi anni '70, quando le acciaierie introdussero nuove tecnologie di affinazione e di colata. Queste tecnologie hanno consentito ai progettisti ed ai costruttori degli acciai sia di migliorare i cosiddetti 'tipi standard' che di sviluppare nuovi tipi a prestazioni migliorate, compresi gli HPASS.

Queste nuove tecnologie siderurgiche includono i processi di decarburazione argon-ossigeno (AOD) e in vuoto-ossigeno (VOD). Essi hanno reso possibile ottenere un tenore di carbonio molto basso in modo economico, elevata alligazione e migliore controllo della composizione (in particolare del tenore di azoto). La rifusione con elettroscoria (ESR), applicata come alternativa o processo addizionale, ha consentito un migliore controllo della composizione ed una microstruttura più omogenea contenente meno inclusioni. La colata continua ha aumentato l'efficienza, riducendo ulteriormente i costi di lavorazione.

Una delle prime leghe a sfruttare i vantaggi delle nuove tecnologie, il primo membro degli HPASS, fu il 904L (N08904) sviluppato presso ciò che si chiama oggi Outokumpu Stainless. Il tipo 904L impiega tenori di carbonio molto bassi per fornire una versione saldabile di una lega per fusioni esistente con elevatissima resistenza ad acidi fortemente riducenti. Nel 1973, ATI Allegheny Ludlum introdusse il primo acciaio inossidabile completamente austenitico resistente all'acqua di mare, AL-6X[®], contenente il 6 % di Mo e a ridottissimo carbonio per ottenere lamierini molto sottili saldabili e tubi. Intorno a metà degli anni '70, gli sviluppi



Scambiatore di calore a fascio tubiero durante la lavorazione. © Sandvik

nell'uso e nel controllo dell'azoto portò a leghe avanzate al 6 % di Mo saldabili con spessori elevati e resistenti alla formazione di dannose fasi intermetalliche che riducono la resistenza al pitting. Alcuni rappresentanti di queste leghe sono il 254 SMO[®] (S31254) di Outokumpu Stainless e l'AL-6XN[®] (N08367) di ATI Allegheny Ludlum.

La crescente richiesta di leghe ad elevate prestazioni, ma di costo contenuto, in settori emergenti come quello ambientale ed energetico ha spinto questi acciai inossidabili ancora più in alto negli anni '90. Due leghe ad elevatissima resistenza al pitting in acqua fortemente clorurata furono introdotte. Outokumpu Stainless introdusse la lega 654 SMO[®] (S32654), contenente il 7,3 % di Mo e lo 0,50 %

di N, mentre Industeel sviluppò la lega B66 (S31266), contenente il 6 % di Mo, il 2 % di W e lo 0,45 % di N. Questi acciai avvicinano le prestazioni di alcune leghe base nichel resistenti alla corrosione con costi significativamente inferiori.

La **Tabella 1** mostra la composizione chimica di questi nuovi acciai inossidabili ad elevate prestazioni. Le leghe contengono tenori di cromo, nichel e molibdeno molto superiori ai tipi standard 18 % Cr-8 % Ni. Molti contengono inoltre aggiunte di azoto. Con la crescita delle richieste del mercato ed il miglioramento delle tecnologie, altre leghe saranno certamente aggiunte a questo particolare gruppo di acciai.

Tabella 1: Composizione chimica* degli acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni e di alcuni tipi standard (% in massa)**

Tipo	UNS No.	EN No.	C	N	Cr	Ni	Mo
Tipi standard rappresentativi							
Tipo 304L	S30403	1.4307	0,03	0,10	18,0–20,0	8,0–12,0	
Tipo 321	S32100	1.4541	0,08	0,10	17,0–19,0	9,0–12,0	
Tipo 347	S34700	1.4550	0,08	0,10	17,0–19,0	9,0–13,0	
Tipo 316L	S31603	1.4404	0,03	0,10	16,0–18,0	10,0–14,0	2,00–3,00
Tipo 317L	S31703	1.4438	0,03	0,10	18,0–20,0	11,0–15,0	3,00–4,00
Tipo 309S	S30908	1.4833	0,08	0,10	22,0–24,0	12,0–15,0	
Tipo 310S	S31008	1.4845	0,08	0,10	24,0–26,0	19,0–22,0	
Acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni							
Lega 20, 20Cb-3	N08020	2.4660	0,07		19,0–21,0	32,0–38,0	2,00–3,00
Lega 825***	N08825	2.4858	0,05		19,5–23,5	38,0–46,0	2,50–3,50
317LM	S31725		0,03	0,10	18,0–20,0	13,2–17,5	4,00–5,00
317LMN	S31726	1.4439	0,03	0,10–0,20	17,0–20,0	13,5–17,5	4,00–5,00
904L	N08904	1.4539	0,02		19,0–23,0	23,0–28,0	4,00–5,00
155N	S31727		0,03	0,15–0,21	17,5–19,0	14,5–16,5	3,80–4,50
Lega 28	N08028	1.4563	0,02		26,0–28,0	30,0–34,0	3,00–4,00
456S, Lega 24	S34565	1.4565	0,03	0,40–0,60	23,0–26,0	16,0–19,0	3,00–5,00
20Mo-6	N08026		0,03	0,10–0,16	22,0–26,0	33,0–37,0	5,00–6,70
254N	S32053		0,03	0,17–0,22	22,0–24,0	24,0–26,0	5,00–6,00
25-6MO, 1925 hMo	N08926	1.4529	0,02	0,15–0,25	19,0–21,0	24,0–26,0	6,00–7,00
254 SMO	S31254	1.4547	0,02	0,18–0,22	19,5–20,5	17,5–18,5	6,00–6,50
AL-6XN	N08367		0,03	0,18–0,25	20,0–22,0	23,5–25,5	6,00–7,00
UR 66	S31266	1.4659	0,03	0,35–0,60	23,0–25,0	21,0–24,0	5,00–7,00
27-7MO	S31277		0,02	0,30–0,40	20,5–23,0	26,0–28,0	6,50–8,00
3127 hMo, Lega 31	N08031	1.4562	0,02	0,15–0,25	26,0–28,0	30,0–32,0	6,00–7,00
354N	N08354		0,03	0,17–0,24	22,0–24,0	34,0–36,0	7,00–8,00
654 SMO	S32654	1.4652	0,02	0,45–0,55	24,0–26,0	21,0–23,0	7,00–8,00

Note:

* Secondo specifiche ASTM per lamiere, lamierini e nastri se disponibili o secondo specifiche aziendali. Per gli 'altri' elementi di lega, consultare questi riferimenti.

** Valori massimi, qualora non sia indicato un intervallo o un minimo, i valori EN possono non coincidere esattamente con quelli ASTM.

*** Lega 825 è una lega base nichel, non un acciaio inossidabile.

I nomi commerciali brevettati sono elencati a pagina 69.

3 Metallurgia

3.1 Tipologie di acciaio inossidabile

Gli acciai inossidabili sono leghe base ferro contenenti almeno il 10.5 % di Cr, usate soprattutto per la resistenza alla corrosione. Con questi tenori di cromo, un ossido superficiale arricchito di cromo, detto strato di passività o di passivazione, si forma sull'acciaio. Esso protegge l'acciaio inossidabile e gli impedisce di 'arrugginire' come un acciaio comune. Esistono numerosi acciai inossidabili, ma tutti presentano questa caratteristica. Gli acciai inossidabili si dividono in quattro gruppi fondamentali: austenitici, ferritici, duplex (austeno-ferritici) e martensitici. Questi gruppi sono basati sulla microstruttura (la disposizione atomica) e sul loro trattamento termico.

Come suggerisce la denominazione, gli HPASS appartengono al gruppo degli austenitici. Essi hanno una microstruttura detta cubica a facce centrate (CFC), in quanto gli atomi sono disposti sui vertici e sulle facce di un reticolo cubico. Essi contengono di solito nichel e cromo, sono molto duttili e non possono essere induriti con trattamenti termici. Gli acciai ferritici hanno una microstruttura cubica a corpo centrato (CCC) con atomi disposti sui vertici ed al centro di un reticolo cubico. Essi hanno in genere basso tenore di nichel e, a loro volta, non possono essere induriti con trattamenti termici. Gli acciai duplex contengono proporzioni pressoché simili di ferrite ed austenite e presentano proprietà intermedie rispetto agli acciai ferritici e quelli austenitici. Gli acciai martensitici sono quelli che possono essere induriti mediante opportuni trattamenti termici.

3.2 Equilibrio delle fasi

In un metallo, un gruppo di cristalli aventi la medesima microstruttura è chiamato fase. I nomi delle fasi presenti negli acciai inossidabili sono austenite, ferrite e martensite. I metallurgisti impiegano una tecnica per lucidare ed attaccare la



Figura 1: Microstruttura degli acciai inossidabili austenitici, che consiste in grani austenitici privi di precipitati ed altre fasi.

superficie di piccoli campioni per identificare e quantificare le fasi presenti. Una microstruttura rappresentativa di un HPASS presenta una serie di 'grani' austenitici – ossia gruppi di cristalli CFC – che appaiono privi di altre fasi (**Figura 1**).

Il metallurgista impiega la composizione chimica ed il trattamento termico per

Tabella 2: Aggiunta di elementi di lega che favoriscono la formazione di ferrite ed austenite.

Elementi ferritizzanti	Elementi austenitizzanti
Iron	Nickel
Chromium	Nitrogen
Molybdenum	Carbon
Silicon	Manganese
Niobium (Columbium)	Copper
Aluminum	Cobalt
Titanium	
Tungsten	

controllare la quantità ed il tipo delle fasi presenti nell'acciaio. Gli elementi ferritizzanti promuovono la formazione di ferrite, così come quelli austenitizzanti favoriscono la formazione di austenite. La **Tabella 2** elenca i principali elementi austenitizzanti e ferritizzanti.

L'equilibrio delle fasi' (ossia, le proporzioni relative delle diverse fasi) di un acciaio ne determina le proprietà. Per controllare l'equilibrio delle fasi di un acciaio, quindi le sue proprietà, occorre bilanciare gli elementi di lega. Il diagramma di Schaeffler (**Figura 2**) è uno strumento che mostra la correlazione tra le diverse composizioni chimiche e fasi presenti in un acciaio inossidabile allo stato di lavorazione, come può essere in saldatura. Esso consente all'utilizzatore di determinare l'equilibrio delle fasi data una specifica composizione chimica. Un tipico HPASS contenente circa il 20 % di Cr, 6 % di Mo, 20 % di Ni e 0,2 % di N si collocherebbe nel campo completamente austenitico, vicino alla linea della No Ferrite, con un Ni equivalente pari a 24 ed un Cr equivalente di circa 26. Gli acciai ferritici sono concepiti per collocarsi nel campo ferritico del diagramma ed i duplex nella regione austenite + ferrite (A+F). Il diagramma mostra che

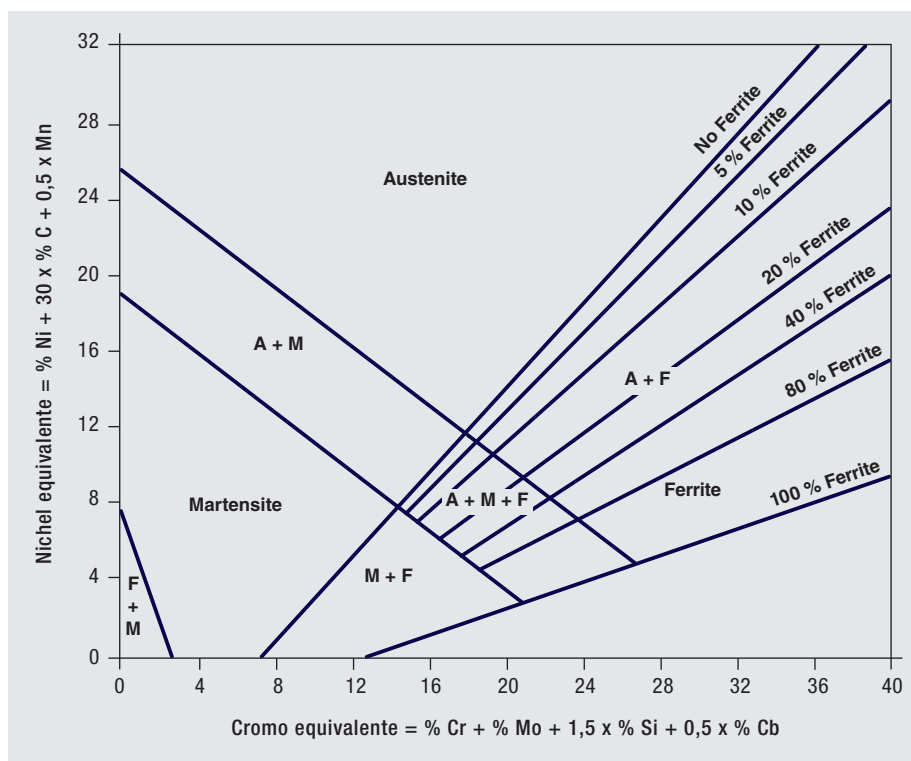


Figura 2: Il diagramma di Schaeffler indica l'influenza della composizione chimica nei confronti della quantità di ferrite e di austenite nella microstruttura allo stato come saldato. (1)

anche modeste variazioni del tenore di carbonio o di silicio possono avere un effetto notevole sull'equilibrio delle fasi.

3.3 Fasi secondarie – composti intermetallici

La microstruttura ideale di un tipo standard ed HPASS è una sequenza di grani austenitici senza alcuna fasi secondarie. Tuttavia, questa non è la condizione di equilibrio per gli acciai austenitici, in molti casi. Altre fasi secondarie si possono formare nella struttura austenitica quando gli acciai inossidabili sono mantenuti ad elevata temperatura, le quali possono risultare dannose per le loro proprietà. Gli acciai devono controllare attentamente i trattamenti di ricottura e gli altri parametri di produzione per evitare la formazione di fasi secondarie. Gli HPASS sono molto sensibili alla formazione di fasi secondarie per via del loro elevato tenore di elementi di lega. Pertanto, una conoscenza adeguata della formazione e del controllo di queste fasi sono essenziali per impiegare con successo gli HPASS.

Carburi e nitruri possono risultare pericolosi a causa della tendenza a precipitare al bordo del grano austenitico ed a ridurre la resistenza alla corrosione in quella zona. Altre due fasi importanti sono la sigma e la chi. Queste fasi sono chiamate composti intermetallici in quanto sono più simili ad un composto chimico che ad una lega. Esse contengono un tenore di cromo e/o molibdeno molto elevato, sono fragili e possono ridurre la resistenza alla corrosione per deplezione delle aree circostanti del cromo e del molibdeno. I paragrafi seguenti analizzano le condizioni che portano alla loro formazione e controllo.

3.3.1 Temperature di stabilità delle fasi secondarie

A temperature sufficientemente elevate, vicino al punto di fusione, una struttura austenitica monofasica è la condizione di equilibrio tanto per i tipi standard che per gli HPASS. A temperature più basse, in funzione della composizione dell'acciaio, una o più fasi secondarie, talvolta

chiamate precipitati, possono formarsi per raggiungere condizioni di equilibrio. Tale temperatura più bassa è di norma il limite inferiore per l'intervallo di temperature di solubilizzazione per ogni dato acciaio.

Nei tipi standard, il carburo di cromo (Cr_{23}C_6) è il problema principale. Nel tipo 304, ad esempio, esso inizia a precipitare al di sotto di circa 900 °C (1650 °F). Con maggiori tenori di elementi di lega, la tendenza a formare fasi secondarie aumenta, così come la temperatura per la loro precipitazione. In alcuni dei più legati tra gli HPASS, la fase chi può precipitare a circa 1095 °C (2000 °F). Ciò significa che gli HPASS devono essere solubilizzati a temperature molto maggiori dei tipi standard, di norma a circa 1095 °C (2000 °F). Tale requisito va rispettato per ricuocere gli HPASS in modo corretto.

3.3.2 Cinetica della formazione delle fasi secondarie

La cinetica della formazione delle fasi secondarie, ossia la velocità con cui le fasi secondarie si formano durante il raffreddamento, è un fattore molto importante per la corretta ricottura e saldatura di questi acciai. Indipendentemente dal tipo, gli acciai inossidabili devono essere raffreddati in modo sufficientemente rapido per evitare la formazione di fasi secondarie. Per illustrare la relazione tra velocità di raffreddamento e tipo, si consideri il caso del tipo standard 304 e della sua fase secondaria più probabile, il carburo di cromo. Il carburo di cromo è stabile ed inizia a precipitare durante il raffreddamento a temperature inferiori a circa 900 °C (1650 °F). La velocità con cui esso si forma, è ridotta appena sotto 900 °C (1650 °F) ed aumenta rapidamente al diminuire della temperatura sino a circa 700 °C (1300 °F), in cui è molto elevata. Di conseguenza, il tipo 304 deve essere raffreddato molto rapidamente sino ad una temperatura inferiore a circa 700 °C (1300 °F) per evitare la precipitazione di carburi ed ottenere una microstruttura adeguata, ricotta o saldata.

Se il raffreddamento non è rapido a sufficienza, si formano carburi di cromo

in prossimità del bordo del grano austenitico. Una precipitazione estensiva crea un reticolo continuo di carburi lungo il bordo del grano. Per formare carburi, il carbonio ed il cromo si combinano nella matrice dell'acciaio inossidabile e precipitano a bordo grano (dove si trova più spazio rispetto all'interno del grano). La regione adiacente ai carburi, lungo il bordo dei grani, presenta di conseguenza un tenore di cromo minore rispetto al grano, con una resistenza alla corrosione pertanto minore. Il fenomeno, chiamato 'sensibilizzazione', è ben conosciuto e compreso. La **Figura 3** presenta una microstruttura sensibilizzata, che mostra schematicamente precipitati a bordo grano e la relativa regione a ridotto tenore di cromo. Fenomeni analoghi accadono con altre fasi secondarie, ma le temperature ed i tempi caratteristici sono diversi.

La cinetica della precipitazione delle fasi secondarie può essere descritta dalle curve Tempo-Temperatura-Trasformazione (TTT) per ogni tipo di lega. Le curve sono ottenute riscaldando, dapprima, i campioni

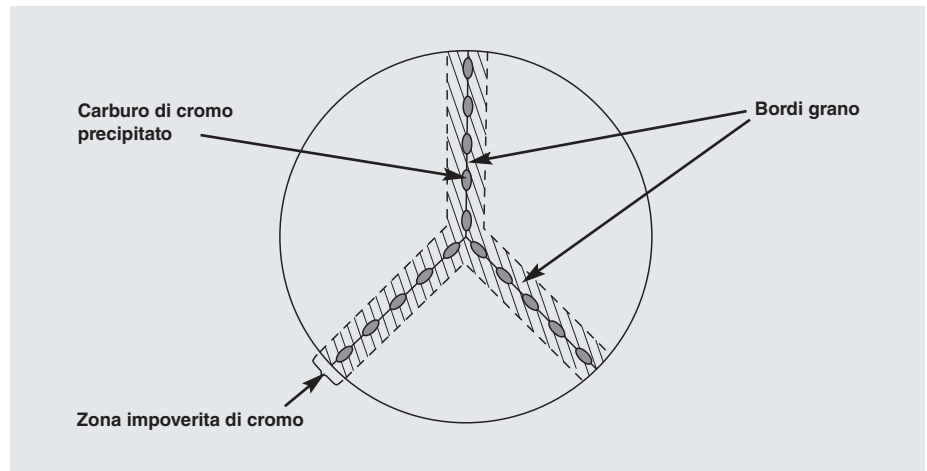


Figura 3: Rappresentazione schematica dei bordi grano sensibilizzati in un acciaio inossidabile austenitico. (2)

a temperatura elevata (la temperatura di solubilizzazione) per dissolvere ogni fasi secondarie. I campioni sono quindi raffreddati rapidamente sino ad una temperatura intermedia, di interesse, e mantenuti a tale temperatura per tempi

variabili, successivamente raffreddati di nuovo sino a temperatura ambiente per 'congelare' la struttura formatasi alla temperatura intermedia. Le fasi secondarie sono quantificate con esami metallografici o con tecniche con raggi X ed i dati ottenuti – che descrivono la formazione e l'accrescimento delle fasi secondarie – sono rappresentati in diagrammi tempo-temperatura. I campioni possono anche essere soggetti a prove di corrosione rappresentative delle condizioni di servizio previste. In questo caso, le curve così ottenute sono chiamate curve Tempo-Temperatura-Sensibilizzazione (TTS).

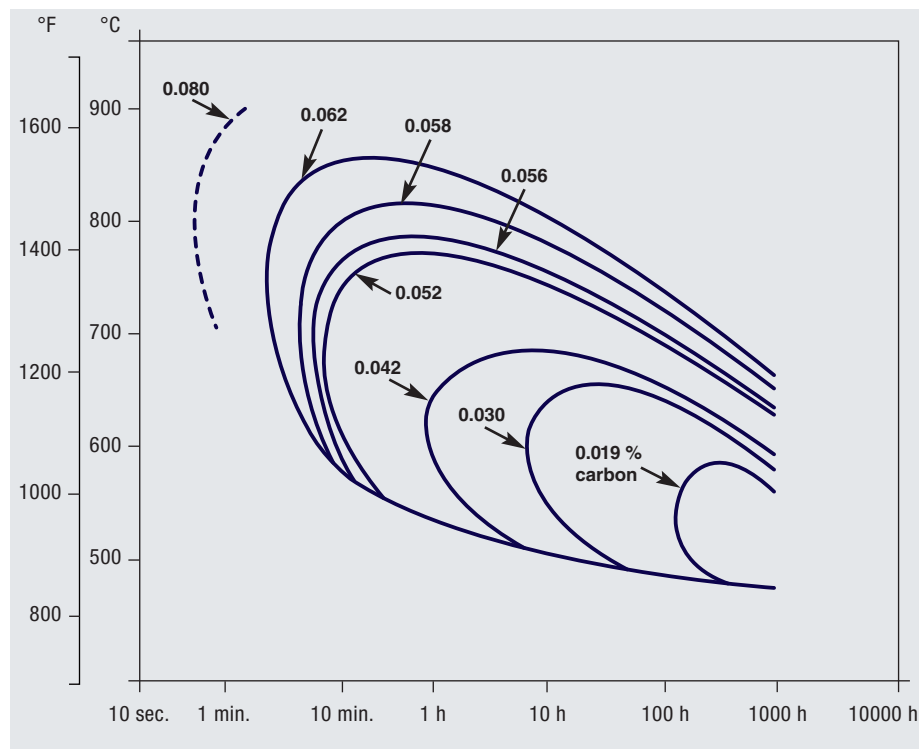


Figura 4: Diagramma TTS per l'acciaio inossidabile tipo 304 in funzione del tenore di carbonio. (3)

La **Figura 4** mostra le curve TTT per un certo numero di acciai inossidabili tipo 304 con diversi tenori di carbonio, che rivelano numerosi aspetti. Al di sopra di 900 °C (1650 °F), gli acciai restano completamente austenitici. Tra 540 °C e 900 °C circa (1000 °F e 1650 °F), il tempo di inizio precipitazione varia per più di un ordine di grandezza. Le cinetiche di precipitazione dei carburi di cromo sono molto più lente negli acciai a ridotto tenore di carbonio. Da un punto di vista pratico, le curve mostrano che durante la ricottura o la saldatura di questi acciai essi devono essere raffreddati rapidamente al di sotto del naso delle curve per evitare la sensibilizzazione ed il relativo rischio di corrosione localizzata. Abbassando il tenore di carbonio si può aumentare il

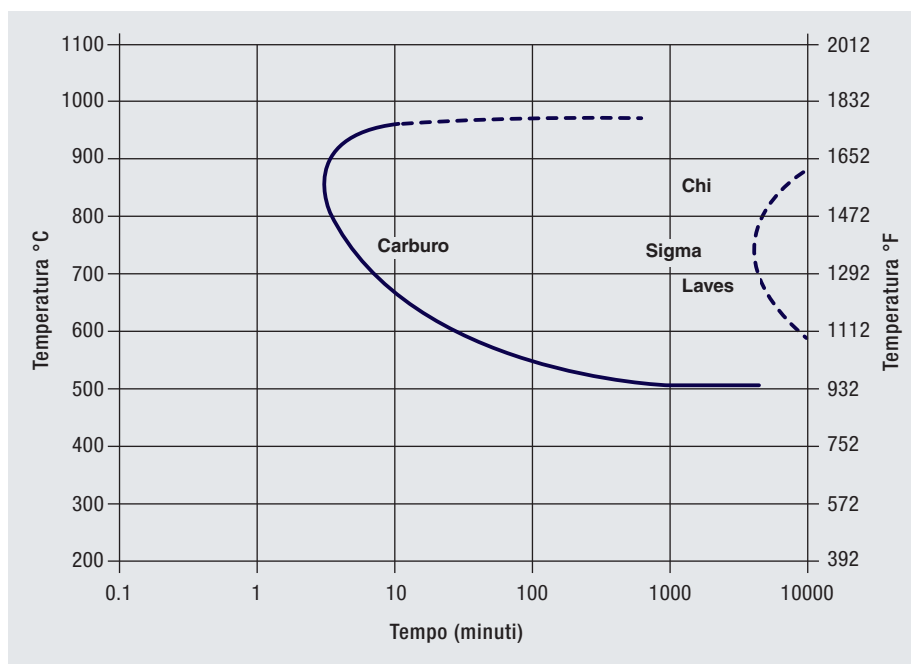


Figura 5: Diagramma TTT per l'acciaio inossidabile tipo 316. Le fasi secondarie chi, sigma e Laves richiedono tempi lunghi per svilupparsi in questo acciaio inossidabile di tipo standard. (4)

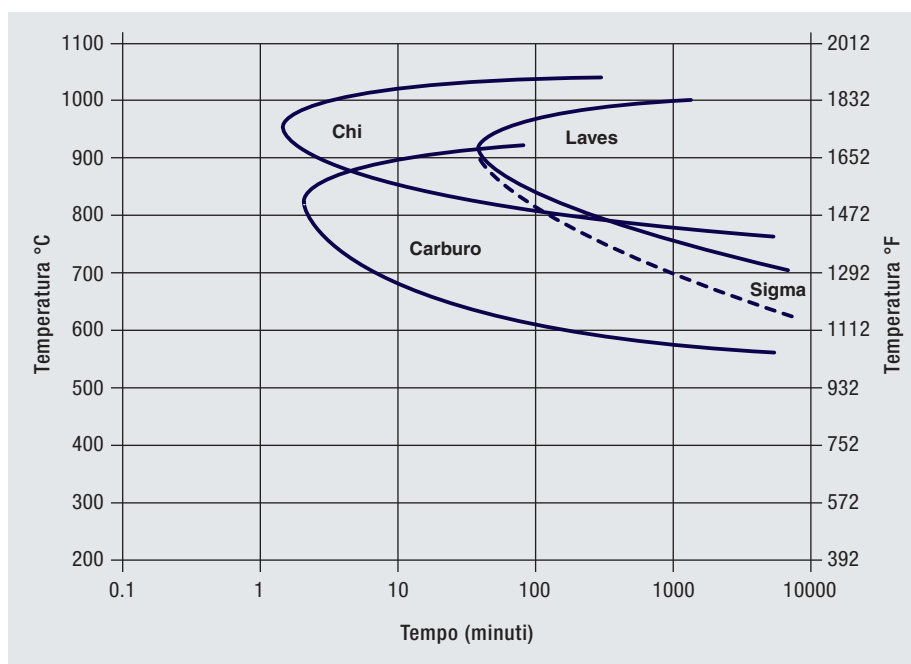


Figura 6: Diagramma TTT di un acciaio inossidabile 0,05C-17Cr-13Ni-5Mo contenente 0,039 % N. (4)

tempo disponibile per il raffreddamento, in modo da evitare la sensibilizzazione più facilmente. La precipitazione di carburi di cromo nei tipi standard è un fenomeno ben conosciuto. Le informazioni relative alle velocità di raffreddamento richieste per diverse sezioni sono disponibili e vi sono leghe alternative per soddisfare specifiche esigenze. Esse includono i tipi L (304L e 316L), quelli stabilizzati (321 e 347) ed i tipi standard modificati con azoto che prevedono aggiunte di azoto per rallentare la precipitazione di carburi.

Per gli HPASS, la precipitazione di fase sigma e chi, è un problema più sentito della precipitazione di carburi di cromo, in quanto l'elevato tenore di cromo e molibdeno favorisce la rapida formazione di queste fasi. Tutti gli HPASS hanno un ridotto tenore di carbonio, che minimizza la velocità di formazione di carburi e riduce il problema della sensibilizzazione. Il diagramma TTT per il tipo 316 contenente il 2 % di molibdeno ed un tenore di carbonio piuttosto alto (Figura 5) mostra che carburi di cromo possono formarsi in soli cinque minuti, ma le fasi chi e sigma si possono formare solo dopo 80 ore circa. Per contro, una lega avente analoghi tenori di cromo e nichel, ma con il 5 % di Mo, può subire precipitazione di fase chi in tempi molto brevi (Figura 6). Il tempo necessario per la precipitazione di fase chi per acciai al 5 % di Mo è ancora più breve rispetto a quello relativo alla formazione di carburi.

Come brevemente notato in precedenza, l'azoto ritarda la formazione di queste fasi ed è impiegato per questo scopo in diversi HPASS. Questo effetto è evidenziato in **Figura 7**. In tale figura la lega al 5 % di Mo della Figura 6 è modificata con lo 0,145 % di N. L'aggiunta di azoto ritarda la precipitazione di entrambe le fasi chi e carburi di cromo di dieci minuti, a confronto dei due – quattro minuti delle leghe contenenti solo lo 0,039 % di N. La lega avente lo 0,145 % di N consente un raffreddamento lento dopo ricottura o saldatura senza precipitazione di fasi secondarie.

Dato che il cromo ed il molibdeno aumentano a livelli molto alti nei più legati tra gli HPASS, le fasi intermetalliche si formano in tempi molto brevi. Le aggiunte di azoto sono utili, ma tenori di azoto anche elevati come 0,20–0,50 % non sono sufficienti a ritardare la precipitazione nell'intervallo desiderato di dieci minuti o più. La **Figura 8** mostra curve TT rappresentative di diverse leghe per illustrare questo aspetto. Il tipo 317LMN, (17 % Cr, 14 % Ni, 4,5 % Mo, 0,15 % N) forma fasi secondarie all'incirca nello stesso tempo rispetto al 316 malgrado il suo maggiore tenore di alliganti, a causa dell'effetto dell'azoto. La lega 254 SMO (20 % Cr, 18 % Ni, 6 % Mo, 0,20 % N) comincia a soffrire precipitazione in circa 30 secondi e la lega 904L (20 % Cr, 25 % Ni, 4,55 % Mo, senza aggiunte di azoto) accusa formazione di fasi intermetalliche in meno di un minuto. Evidentemente, le leghe di questo tipo richiedono limiti nella dimensione delle sezioni o raffreddamenti drastici per evitare la formazione di fasi secondarie.

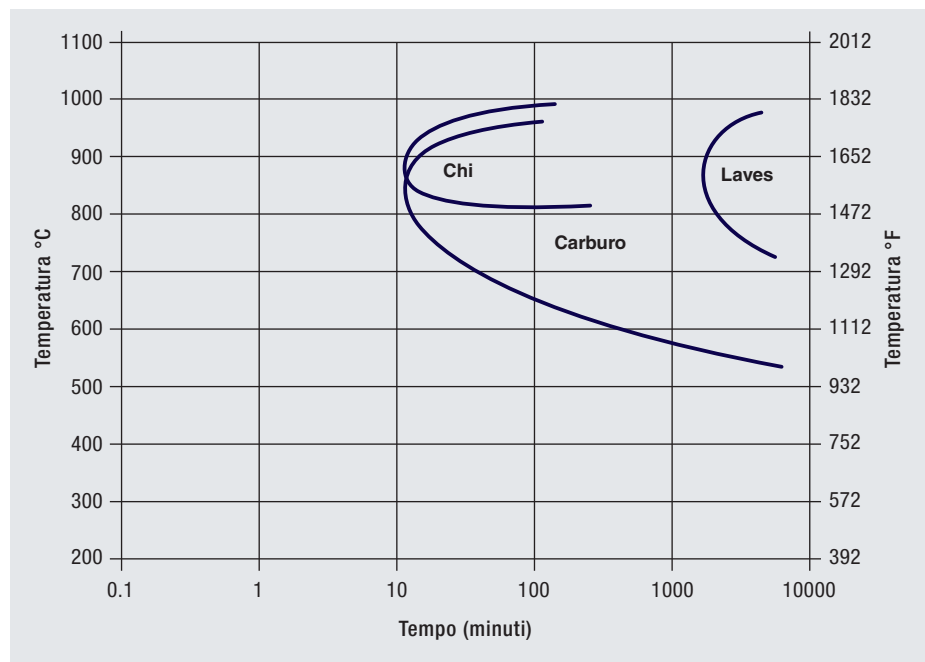


Figura 7: Diagramma TTT per la stessa lega di Figura 6, ma con 0,145 % N. (4)

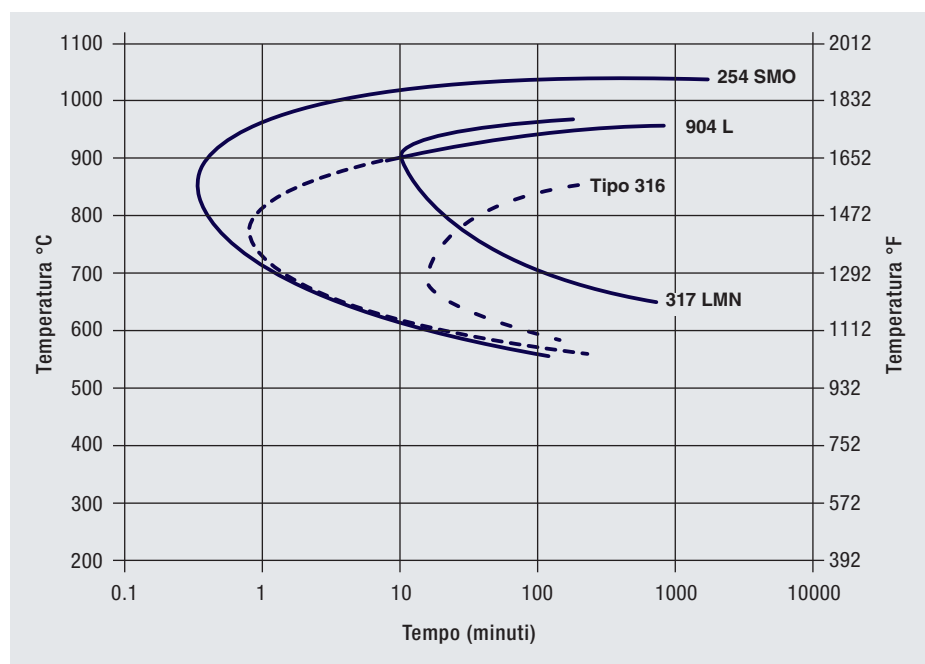


Figura 8: Diagramma TTT per diversi acciai inossidabili austenitici commerciali con diversi tenori di molibdeno ed azoto. (4)

4 Funzione degli elementi di lega

La composizione chimica ha un'influenza notevole nella microstruttura metallurgica, nelle proprietà meccaniche, fisiche e per la resistenza alla corrosione. Tanto gli elementi di lega volutamente presenti che quelli introdotti involontariamente durante i processi di fabbricazione degli acciai influenzano queste proprietà.

Gli elementi di lega diversi da carbonio ed azoto, ad esempio il cromo ed il nichel, sono presenti nella matrice in forma sostituzionale. Quindi, essi sostituiscono il ferro nei vertici e al centro delle facce del reticolo austenitico. Il carbonio e l'azoto, per via delle modeste dimensioni, si posizionano negli spazi liberi (siti interstiziali) nella matrice. In questo modo, essi provocano forti deformazioni del reticolo, quindi operano come forti induritori.

Gli elementi di lega influenzano le proprietà degli acciai in vari modi, talvolta in senso positivo, talvolta in quello negativo. La scelta di una particolare composizione per un acciaio richiede spesso le competenze di un progettista o ingegnere dei materiali per esaltare i vantaggi di una proprietà a scapito di altre. I paragrafi successivi descrivono la funzione dei più importanti elementi di lega degli acciai inossidabili austenitici.

4.1 Cromo (Cr)

Il cromo è l'elemento di lega che rende gli acciai inossidabili 'inossidabili'. Per formare il film di passività responsabile di questa caratteristica unica è necessario almeno il 10,5 di Cr. Il film di passività è efficace nella protezione degli acciai inossidabili in ambienti che possono includere acque aggressive, molti acidi ed anche gas ossidanti ad elevata temperatura. La resistenza alla corrosione migliora in una ampia varietà di casi all'aumentare del cromo al di sopra della soglia del 10,5 %. Per questo, molti tipi hanno tenori di cromo superiori a questo limite. Alcuni

esempi sono il tipo 304, vero e proprio 'cavallo da soma', con il 18 % di Cr, e gli HPASS con il 20–28 % di Cr.

4.2 Nichel (Ni)

Lo scopo principale del nichel è creare e stabilizzare l'austenite. Senza l'8 % di Ni, il tipo 304 non sarebbe un acciaio inossidabile austenitico e non avrebbe le interessanti proprietà meccaniche dell'austenite. Al contrario, sarebbe un acciaio inossidabile ferritico, con importanti limitazioni in termini di resistenza e tenacità. Aumentando il tenore di cromo o di altri elementi austenitizzanti nell'acciaio, è necessario più nichel per mantenere austenitica la struttura. Gli HPASS, che hanno alto cromo e molibdeno, richiedono tenori di nichel almeno del 20 % per mantenere austenitica la struttura. Il nichel migliora anche la resistenza alla corrosione nei confronti di alcuni acidi riducenti ed incrementa la resistenza alla tensocorrosione di almeno un 20 %. Esso riduce inoltre la velocità di incrudimento durante la deformazione a freddo, per cui è spesso presente nelle leghe concepite per imbutitura, tornitura in lastra e ricalcatura a freddo.

4.3 Molibdeno (Mo)

Il molibdeno aumenta la resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale in ambienti clorurati. Esso agisce in sinergia con il cromo e l'azoto per migliorare le prestazioni in questi ambienti. Tale effetto sinergico conferisce agli HPASS una resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale davvero elevata. Il molibdeno aumenta anche la resistenza alla corrosione negli ambienti riducenti come l'acido cloridrico e l'acido solforico diluiti. La minima aggiunta di molibdeno per un acciaio inossidabile austenitico è il 2 % circa, come nel tipo 316. La maggior parte degli HPASS alto legati contiene sino al 7,5 % di Mo.

Il molibdeno favorisce la stabilità della ferrite, il che influenza l'equilibrio delle fasi. Esso interviene nella precipitazione di numerose fasi secondarie dannose e forma ossidi poco stabili con la temperatura, influenzando negativamente la resistenza all'ossidazione ad alta temperatura. Anche questi fattori devono essere adeguatamente valutati, impiegando acciai inossidabili contenenti molibdeno.

4.4 Carbonio (C)

Il carbonio aumenta la resistenza dell'austenite, quindi è un utile elemento di lega per gli acciai inossidabili impiegati in applicazioni come tubi caldaia, che operano ad alta temperatura. Il carbonio non ha altre funzioni utili e può essere dannoso per la resistenza alla corrosione in determinate circostanze, come già osservato. Il tenore di carbonio di molti acciai inossidabili austenitici è spesso limitato ai valori minimi possibili.

I tipi standard a basso carbonio concepiti per la saldatura (i tipi 304L e 316L) limitano il carbonio allo 0,030 %. Alcuni tra i tipi altolegati ad alte prestazioni limitano il carbonio anche allo 0,020 %.

4.5 Azoto (N)

L'azoto stabilizza e aumenta la resistenza dell'austenite e ritarda la formazione di fasi secondarie. È impiegato tanto per i tipi standard che per gli HPASS. Nei tipi standard a basso carbonio, è aggiunto in piccole percentuali (circa 0,1 %) per compensare la diminuzione di resistenza dovuta al ridotto carbonio. Nei tipi standard ed HPASS aumenta la resistenza e ritarda la sensibilizzazione da carburi, quanto la formazione di fasi secondarie. L'azoto migliora inoltre la resistenza a vaiolatura da cloruri ed alla corrosione interstiziale, per cui alcuni degli HPASS più resistenti alla corrosione hanno sino allo 0,5 % di N.



Recipiente portatile in acciaio inossidabile tipo 316L e pannello di controllo per l'industria bio-farmaceutica.
© DCI, Inc, St. Cloud, MN USA

4.6 Manganese (Mn)

Gli acciai usano il manganese per disossidare l'acciaio liquido, per cui una piccola quantità è presente in tutti gli acciai inossidabili. Il manganese svolge la funzione di elemento di lega in quanto stabilizza l'austenite. Inoltre, esso aumenta la solubilità dell'azoto nell'acciaio inossidabile, per cui è aggiunto a molti HPASS per consentire un maggiore tenore di azoto e migliorare la resistenza meccanica ed alla corrosione.

4.7 Rame (Cu)

Il rame migliora la resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili in caso di acidi riducenti come certe miscele di acido solforico e fosforico. È usato come elemento di lega in alcuni HPASS concepiti specificamente per operare in queste condizioni di servizio.

4.8 Silicio (Si)

Come il manganese, il silicio è usato per disossidare l'acciaio liquido, per cui una piccola quantità è presente, come piccole inclusioni contenenti silicio, manganese ed altri elementi disossidanti. Tali inclusioni possono avere lievi effetti nella qualità delle superfici, sulla lucidabilità, saldabilità e resistenza alla corrosione dei prodotti realizzati con acciai inossidabili.

4.9 Niobio/columbio (Nb/Cb) e titanio (Ti)

Questi elementi sono fortemente carburigeni e sono usati come alternative al basso carbonio per ridurre la sensibilizzazione. Essi conferiscono inoltre resistenza ad elevata temperatura. I tipi 347 e 321 contenenti Nb e Ti sono spesso impiegati per caldaie e nell'industria della raffinazione quando siano richieste elevate resistenza ad alta temperatura e saldabilità. Essi sono inoltre usati talvolta come disossidanti, per cui possono essere presenti in tracce negli HPASS.

4.10 Zolfo (S) e fosforo (P)

Lo zolfo ha effetti positivi e negativi sulle proprietà degli acciai inossidabili. Il suo più importante effetto positivo è la migliore lavorabilità alle macchine utensili, mentre il suo effetto negativo più grave è la ridotta lavorabilità a caldo. Gli HPASS sono intrinsecamente difficili da lavorare a caldo, quindi contengono sempre ridotti tenori di zolfo, circa 0,001 %. Lo zolfo non è impiegato di norma come elemento di lega in questi acciai.

Il fosforo non ha effetti positivi ed è dannoso per la lavorabilità a caldo durante la forgiatura e la laminazione a caldo. Esso favorisce inoltre la criccabilità a caldo in fase di raffreddamento, dopo saldatura. È ridotto al minimo tenore praticamente possibile.

5 Proprietà meccaniche e fisiche

Gli HPASS conservano le buone proprietà meccaniche complessive dei tipi standard, con una resistenza leggermente superiore ed una duttilità leggermente inferiore allo stato ricotto. L'incrudimento aumenta in modo significativo la loro resistenza. Poiché incrudiscono, hanno eccellente formabilità e possono assorbire notevoli livelli di energia in caso di rottura. La loro resistenza è dovuta agli effetti di elementi di lega in soluzione solida di sostituzione e all'idrogeno interstiziale. Queste leghe mantengono buone proprietà a basse e ad alte temperature.

5.1 Resistenza

La **Tabella 3** riassume le proprietà meccaniche a temperatura ambiente per gli HPASS. I maggiori valori di snervamento e di rottura sono dovuti soprattutto agli effetti di carbonio ed azoto. La **Figura 9** riassume gli effetti dell'azoto sulla resistenza per un certo numero di acciai inossidabili. Un aumento del tenore di azoto dal valore normale dello 0,05 % allo 0,20 % aumenta lo snervamento da 270 MPa (39 ksi) a 340 MPa (49 ksi). Ciò ha un effetto significativo sui valori minimi delle specifiche. ASTM A 240 prevede una resistenza minima a snervamento di 170 MPa (25 ksi) per il tipo 304L (circa 0,05 % di N) e 240 MPa (35 ksi) per il tipo 304N (0,15 % di N). Un ulteriore salto verso l'alto si verifica per gli HPASS per i tipi come il S31254 (0,20 % N) con uno snervamento minimo di 310 MPa (45 ksi) ed il tipo S31266 (0,50 % N) con uno snervamento minimo di 420 MPa (61 ksi).

Gli acciai inossidabili austenitici non possono essere induriti con trattamenti termici, per cui sono prodotti di norma allo stato ricotto. L'incrudimento aumenta la loro resistenza, per cui alcuni semilavorati sono prodotti allo stato laminato a freddo quando è richiesta una maggiore resistenza. Gli HPASS rispondono all'incrudimento come i tipi standard. I processi a freddo come la formatura, la tornitura in lastra, la forgiatura rotativa e l'imbutitura

possono produrre una resistenza molto elevata. L'azoto aumenta l'efficacia dell'incrudimento, così è possibile ottenere

una resistenza ancora maggiore quando queste leghe sono lavorate a freddo (**Figura 10**) a confronto con i tipi standard.

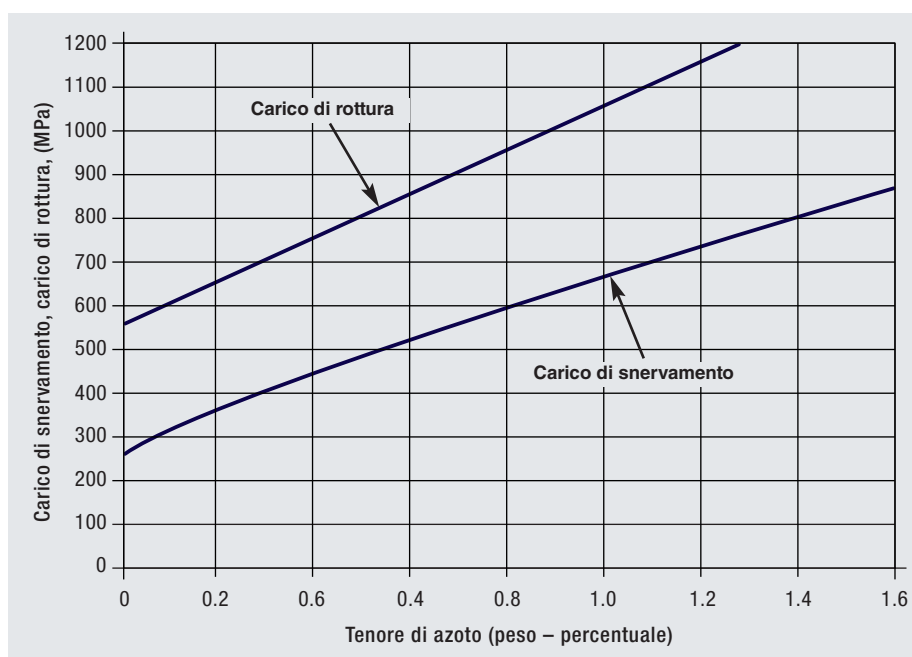


Figura 9: Effetto dell'azoto sulla resistenza degli acciai inossidabili austenitici. (5)

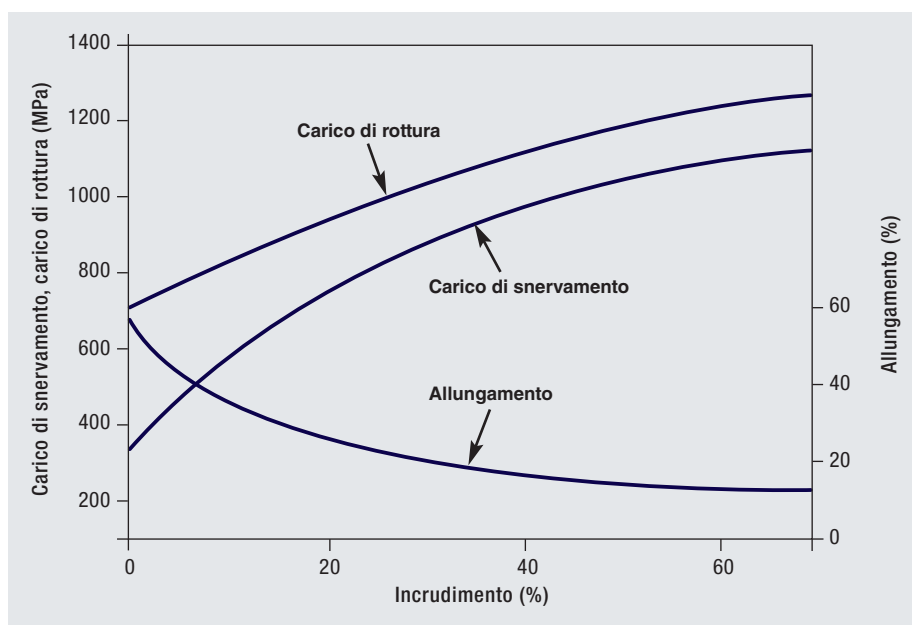


Figura 10: Effetto dell'incrudimento sulla resistenza e sulla duttilità di un acciaio HPASS con il 6 % Mo-0,2 % N. (6)

Tabella 3: Proprietà meccaniche minime degli acciai inossidabili austenitici standard e ad elevate prestazioni.

Tipo	UNS No.	EN No.	Carico di snerva- mento allo 0,2 %	Carico di rottura	Allungamento a rottura su 2"	Durezza, max	
			MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	Brinell	Rockwell B
Acciai inossidabili austenitici al cromo-nichel							
Tipo 304L	S30403	1.4307	170 (25)	515 (75)	40	201	92
Tipo 321	S32100	1.4541	205 (30)	515 (75)	40	217	95
Tipo 347	S34700	1.4550	205 (30)	515 (75)	40	201	92
Tipo 316L	S31603	1.4404	170 (25)	515 (75)	40	217	95
Tipo 317L	S31703	1.4438	205 (30)	515 (75)	35	217	95
Tipo 309S	S30908	1.4833	205 (30)	515 (75)	40	217	95
Tipo 310S	S31008	1.4845	205 (30)	515 (75)	40	217	95
Acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni							
Lega 20, 20Cb-3	N08020	2.4660	240 (35)	550 (80)	30	217	95
Lega 825*	N08825	2.4854	310 (45)	655 (95)	30		
317LM	S31725		205 (30)	515 (75)	40	217	95
317LMN	S31726	1.4439	240 (35)	550 (80)	40	223	96
904L	N08904	1.4539	220 (31)	490 (71)	35		90
155N	S31727		245 (36)	550 (80)	35	217	
Lega 28	N08028	1.4563	500 (73)	214 (31)	40		90
4565 S, Lega 24	S34565	1.4565	415 (60)	795 (115)	35	241	100
20Mo-6	N08026		241 (35)	551 (80)	30	217	95
254N	S32053		295 (43)	640 (93)	40	217	96
25-6MO, 1925 hMo	N08926	1.4529	295 (43)	650 (94)	35		
254 SMO	S31254	1.4547	310 (45)	655 (95)	35	223	96
AL-6XN	N08367		310 (45)	655 (95)	30	241	
UR 66	S31266	1.4659	420 (61)	750 (109)	35		
27-7MO	S31277		360 (52)	770 (112)	40		
3127 hMo, Lega 31	N08031	1.4562	276 (40)	650 (94)	40		
354N	N08354		295 (43)	550 (80)	40	217	96
654 SMO	S32654	1.4652	430 (62)	750 (109)	40	250	

Nota: Queste proprietà meccaniche corrispondono ai tipi ASTM secondo le designazioni UNS indicate. I tipi designati secondo la normativa europea, come indicato nella seconda colonna, sono simili ma possono non essere identici. Un acciaio certificato secondo i requisiti di una specifica nell'ambito di un sistema, per esempio ASTM, non soddisfa necessariamente i requisiti del materiale corrispondente secondo un'altra specifica, ad esempio EN oppure JIS.

* Lega 825 è una lega base nichel, non un acciaio inossidabile.

Questo forte effetto di indurimento per incrudimento può creare difficoltà in alcune lavorazioni di formatura in cui si possono incontrare limitazioni in relazione alla effettiva potenza dei macchinari. Elevate velocità di incrudimento possono creare problemi durante la lavorazione di macchina se l'utensile incrudisce la superficie del pezzo. Basse velocità ed elevate profondità di taglio sono consigliate nella lavorazione degli HPASS.

La resistenza allo snervamento di acciai incruditi legati con azoto può essere aumentata ulteriormente con un trattamento di invecchiamento, in cui l'acciaio è invecchiato per circa dieci minuti a temperature comprese tra 300 e 500 °C (da 570 a 930 °F).

La resistenza dovuta all'incrudimento si mantiene a temperature moderate, ma non ad alta temperatura. Per cui, un materiale incrudito non mantiene la propria resistenza in seguito a ricottura o a saldatura per fusione convenzionale. Alcune tecniche di saldatura specifiche per punti possono circoscrivere questa limitazione e sono usate in applicazioni quali vagoni ferroviari che impiegano lamiere laminate a freddo.

5.2 Duttilità e tenacità

Gli HPASS hanno una duttilità analoga a quella dei tipi standard, con valori dell'allungamento nell'intervallo tra il 60 ed il 70 %, molto al di sopra dei valori minimi a specifica. L'azoto impiegato per aumentare la resistenza in alcuni di questi acciai non ne riduce la duttilità.

La microstruttura cubica a facce centrate dell'austenite è responsabile della buona duttilità e dell'elevata velocità di incrudimento di questi acciai, che presentano

peraltro un'elevata tenacità a temperatura ambiente e al di sotto dello zero. A differenza degli acciai al carbonio e di altri materiali, gli acciai austenitici non presentano la transizione duttile – fragile al diminuire della temperatura. Tuttavia, alcuni degli HPASS più legati contenenti azoto presentano una diminuzione della tenacità a temperature criogeniche maggiore rispetto ai tipi inossidabili austenitici meno legati.

L'incrudimento ha un effetto notevole sulla duttilità e tenacità. Esso diminuisce la duttilità annullando la riserva di duttilità del materiale ricotto. La ricottura annulla gli effetti dell'incrudimento, riducendo la resistenza e ripristinando la duttilità e la tenacità a valori elevati.

5.3 Resistenza ad alta temperatura

Gli acciai inossidabili austenitici forniscono una buona resistenza ad alta temperatura. Molti dei tipi standard sono stati omologati per applicazioni in apparecchiature in pressione. Il Codice ASME Pressure Vessel fornisce tensioni ammissibili di progetto per temperature sino a 427 °C (800 °F). Per applicazioni in forni, in cui la pressione non è significativa, gli acciai standard ed alcuni acciai inossidabili resistenti al calore sono usati a temperature doppie di quelle succitate. Gli HPASS sono progettati in primo luogo per la resistenza alla corrosione, ma hanno anche elevata resistenza ad alte temperature. La maggiore resistenza rispetto ai tipi standard a temperatura ambiente è valida anche ad alta temperatura. Ad esempio, la tensione ammissibile secondo il Codice ASME a 427 °C (800 °F) per l'acciaio HPASS N08367 è 18 ksi (124 MPa), a confronto con il tipo 316, con 9,6 ksi (66 MPa). La **Figura 11** confronta la resistenza ad alta temperatura di tre HPASS con il tipo 316L.

Gli acciai inossidabili austenitici mantengono la propria resistenza ad alte temperature meglio degli inossidabili ferritici per via della propria microstruttura e del tenore di nichel. Essi sono molto utili ad alte temperature poiché non formano la fase alfa primo, fragilizzante, al di sopra di circa 300 °C (570 °F), ma possono formare le fasi fragilizzanti chi e sigma a temperature comprese nell'intervallo 500–1050 °C (930–1925 °F).

L'alta resistenza ha effetti positivi e negativi nella lavorazione di questi acciai. Nella ricottura di un componente fabbricato, l'alta resistenza in temperatura previene la distorsione dovuta al peso proprio. Tuttavia, se un componente si deforma, ad esempio in saldatura, l'elevata resistenza ne rende difficile la raddrizzatura rispetto al caso di componenti con bassa resistenza. Come già notato, gli acciai ad alta resistenza possono limitare l'uso di macchine per formatura di una certa potenza, limitando le sezioni che una data macchina è in grado di lavorare.

5.4 Proprietà fisiche

Gli HPASS hanno proprietà fisiche analoghe ai tipi austenitici standard, se confrontati con gli acciai al carbonio. Di conseguenza, presentano un modulo di Young leggermente inferiore, un elevato coefficiente di dilatazione termica (CTE) ed una bassa conducibilità termica. Le **Tabelle 4 e 5** riassumono i dati relativi alle proprietà fisiche per gli acciai inossidabili austenitici.

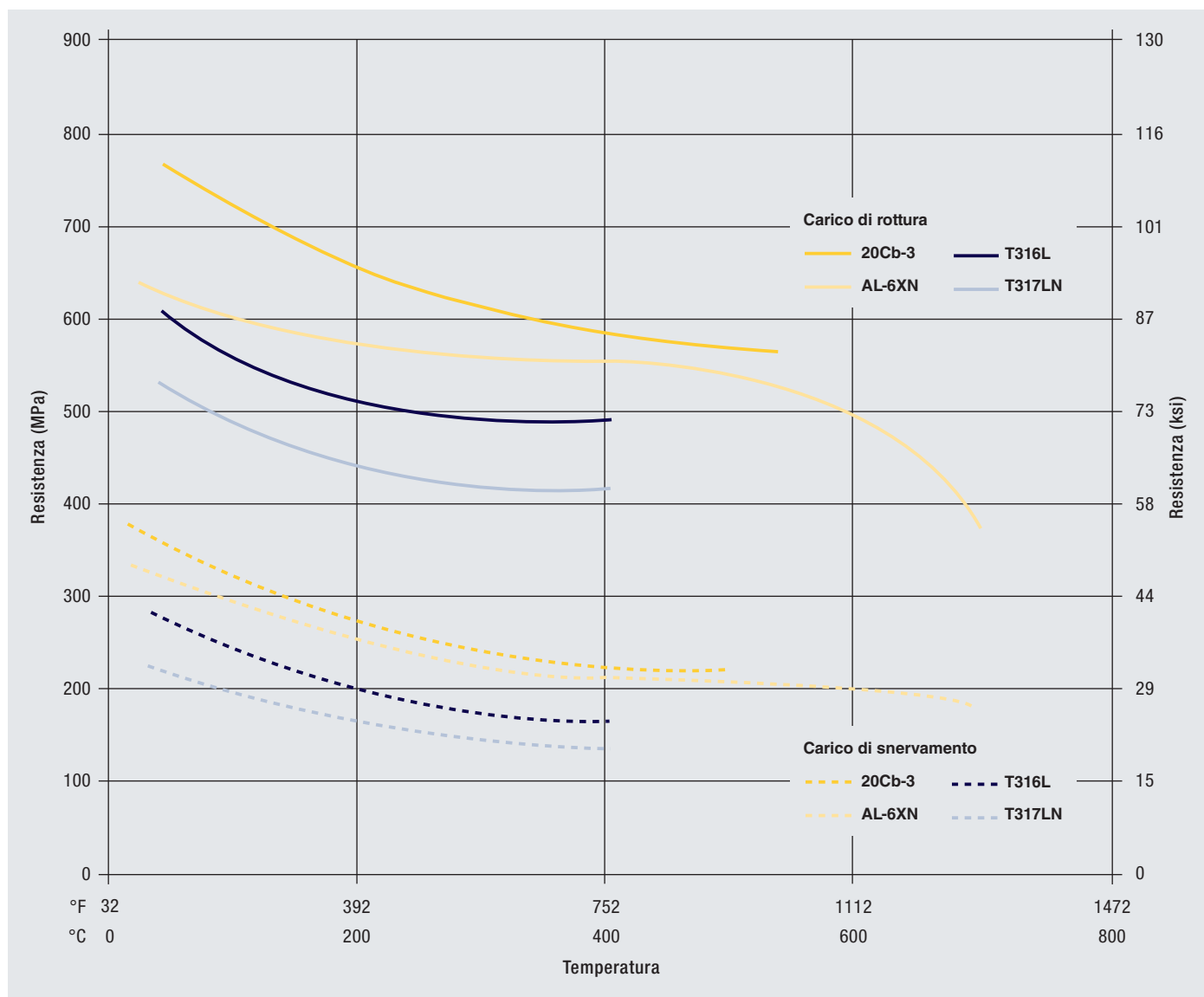


Figura 11: Resistenza ad alta temperatura di tre HPASS a confronto con il tipo 316L. (4)

Tabella 4: Proprietà Fisiche a temperature ambiente degli acciai inossidabili austenitici, tipi standard ed HPASS.

Tipo	UNS No.	Densità		Calore specifico		Resistività elettrica		Modulo di Young	
		g/cm³	lb/in³	J/kg·K	Btu/lb/°F	Ω·mm²/m	micro Ω in	GPa	10⁶ psi
Tipi standard rappresentativi									
Tipo 304L	S30403	8,03	0,290	500	0,120	0,72	28,3	193	28,0
Tipo 321	S32100	7,89	0,285	500	0,120	0,72	28,3	193	28,0
Tipo 347	S34700	7,97	0,288	500	0,120	0,73	28,7	200	29,0
Tipo 316L	S31603	7,95	0,287	469	0,112	0,74	29,1	193	28,0
Tipo 317L	S31703	7,95	0,287	460	0,110	0,79	31,1	200	29,0
Tipo 309S	S30908	7,89	0,285	500	0,120	0,78	30,7	200	29,0
Tipo 310S	S31008	7,86	0,284	500	0,120	0,85	33,5	200	29,0
Acciai inossidabili austenitici ad elevate prestazioni									
Lega 20, 20Cb-3	N08020	8,08	0,292	502	0,120	1,08	42,5	193	28,0
Lega 825*	N08825	8,14	0,294	440	0,015	1,13	44,5	193	28,0
317LM	S31725	7,95	0,287	460	0,11	0,79	31,1	200	29,0
317LMN	S31726	8,02	0,290	502	0,112	0,85	33,5	200	29,0
904L	N08904	7,95	0,287	461	0,110	0,95	37,4	190	28,0
155N	S31727	8,02	0,290	460	0,109	0,86	33,9	203	29,4
Lega 28	N08028	8,00	0,290	460	0,109	0,99	39,0	105	28,3
4565 S, Lega 24	S34565	8,00	0,290	510	0,122	0,92	36,2	190	28,0
20Mo-6	N08026	8,13	0,294	461	0,110	1,08	42,5	186	27,0
254N	S32053	8,06	0,291	460	0,109	0,93	36,6	188	27,3
25-6MO, 1925 hMo	N08926	8,15	0,294	461	0,110	0,88	34,6	192	27,8
254 SMO	S31254	7,95	0,287	498	0,119	0,85	33,5	200	29,0
AL-6XN	N08367	8,06	0,291	461	0,110	0,89	35,0	195	28,2
UR 66	S31266	8,20	0,297	450	0,113	1,00	39,4	195	28,3
27-7MO	S31277	8,02	0,289	454	0,109	1,00	39,4	191	27,7
3127 hMo, Lega 31	N08031	8,03	0,290	440	0,105	1,00	39,4	195	28,3
354N	N08354	8,16	0,295	440	0,105	1,03	40,6	193	28,0
654 SMO	S32654	8,00	0,290	510	0,122	0,78	30,7	188	27,6

* Lega 825 è una lega base nichel, non un acciaio inossidabile.

Tabella 5: Proprietà fisiche a temperature ambiente e ad elevata temperatura degli acciai inossidabili austenitici, tipi standard ed HPASS.

Tipo	UNS No.	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
Modulo elastico a trazione GPa (10⁶ psi)							
Tipo 304	S30400	193 (28,0)	193 (28,0)	193 (27,9)	187 (27,1)	183 (26,6)	179 (26,0)
Tipo 321	S32100	193 (28,0)	193 (28,0)	193 (28,0)	188 (27,3)	183 (26,6)	178 (25,8)
Tipo 316L	S31603	200 (29,0)	194 (28,1)	185 (26,9)	177 (25,9)	169 (24,5)	160 (23,2)
317LMN	S31726	200 (29,0)	194 (28,1)	186 (27,0)	179 (26,0)	171 (24,8)	163 (23,6)
4565 S, Lega 24	S34565	193 (28,0)	187 (27,1)	180 (26,1)	173 (25,1)	165 (24,0)	157 (22,9)
25-6MO, 1925 hMo	N08926	193 (28,0)	186 (27,0)	179 (26,0)	173 (25,1)	168 (24,4)	162 (23,6)
254N	S32053	188 (27,3)	184 (26,7)	178 (25,8)	172 (24,9)	165 (23,9)	
AL-6XN	N08367	195 (28,3)	189 (27,4)	180 (26,1)	172 (24,9)	163 (23,7)	158 (23,0)
UR 66	S31266	195 (28,3)		180 (26,1)		165 (23,9)	
354N	N08354	198 (28,7)	194 (28,1)	189 (27,4)	183 (36,5)	177 (25,7)	172 (24,8)
Coefficiente di dilatazione termica lineare medio - temperatura 20 °C (68 °F) a T - 10⁻⁶/K (10⁻⁶/°F)							
Tipo 304	S30400		16,6 (9,20)	16,9 (9,40)	17,4 (9,65)	17,6 (9,75)	18,0 (10,0)
Tipo 321	S32100		16,6 (9,20)				17,1 (9,50)
Tipo 316L	S31603		16,5 (9,16)	16,9 (9,38)	17,3 (9,61)	17,6 (9,78)	18,0 (10,00)
Lega 20, 20Cb-3	N08020		14,9 (8,27)	15,2 (8,44)	15,5 (8,61)	15,9 (8,83)	16,1 (8,94)
317LMN	S31726		16,6 (9,22)	17,2 (9,55)	17,8 (9,89)	18,5 (10,30)	
904L	N08904		15,3 (8,50)	15,7 (8,72)	16,1 (8,94)	16,5 (9,17)	16,9 (9,39)
155N	S31727		15,9 (8,83)	16,4 (9,11)	16,7 (9,28)	17,0 (9,44)	17,2 (9,55)
4565 S, Lega 24	S34565		14,5 (8,00)	15,5 (8,60)	16,3 (9,00)	16,8 (9,30)	17,2 (9,50)
20Mo-6	N08026		14,8 (8,22)	14,9 (8,29)	15,3 (8,52)	15,7 (8,73)	16,0 (8,89)
254N	S32053		14,5 (8,00)	15,0 (8,28)	15,4 (8,55)	15,8 (8,78)	
25-6MO, 1925 hMo	N08926		15,0 (8,33)	15,7 (8,72)	16,1 (8,94)	16,4 (9,11)	16,7 (9,28)
254 SMO	S31254		16,0 (8,89)				17,0 (9,44)
AL-6XN	N08367		15,3 (8,50)	15,5 (8,60)	15,7 (8,80)	16,0 (8,90)	16,0 (8,90)
UR 66	S31266		15,0 (8,33)		16,0 (8,90)		16,5 (9,17)
354N	N08354		14,1 (7,83)	14,6 (8,11)	14,8 (8,22)	15,1 (8,40)	15,4 (8,55)

Tabella 5 (continuazione): Proprietà fisiche a temperature ambiente e ad elevata temperatura degli acciai inossidabili austenitici, tipi standard ed HPASS.

Tipo	UNS No.	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
Conduktivita termica - W/m·K (Btu in/hr ft ² °F)							
Tipo 304	S30400	14,6 (100)	16,2 (112)	17,0 (117)	19,6 (135)	20,3 (140)	21,4 (148)
Tipo 316L	S31603	14,0 (97)	14,9 (103)	16,0 (111)	17,3 (120)	18,6 (129)	19,9 (138)
317LMN	S31726	14,0 (97)	14,4 (100)				
Lega 20, 20Cb-3	N08020	11,6 (81)	13,1 (91)	15,0 (104)	16,6 (115)	18,2 (126)	19,6 (136)
904L	N08904	11,5 (80)	13,1 (91)	15,1 (105)			
155N	S31727	12,5 (87)	14,1 (98)	16,2 (112)	18,2 (126)	19,9 (138)	21,8 (151)
4565 S, Lega 24	S34565	14,5 (101)	14,5 (101)				
20Mo-6	N08026	11,6 (81)	13,1 (91)	15,0 (104)	16,6 (115)	18,2 (126)	19,6(136)
254N	S32053	11,6 (81)	12,5 (87)	14,4 (100)	16,1 (112)	17,6 (122)	
25-6MO, 1925 hMo	N08926	12,0 (83)	12,9 (89)	14,4 (100)	16,5 (114)	18,5 (128)	20,1 (139)
254 SMO	S31254	13,4 (92)	14,5 (100)	15,9 (110)	17,3 (119)	18,7 (129)	20,2 (139)
AL-6XN	N08367	11,5 (80)	13,0 (90)	15,1 (105)	17,2 (120)	19,3 (134)	21,2 (147)
UR 66	S31266	12,0 (83)		13,0 (90)		14,0 (97)	
354N	N08354	11,3 (78)	13,2 (91)	15,3 (106)	17,6 (122)	19,1 (132)	20,8 (144)
654 SMO	S32654	8,6 (59)	9,8 (68)	11,3 (78)	12,6 (87)	14,5 (100)	

6 Resistenza alla corrosione

Gli HPASS presentano la massima resistenza alla corrosione tra gli acciai inossidabili. Per quanto ogni tipo abbia diverse peculiarità, tutti si distinguono in una o più delle tre aree in cui si esplicano le prestazioni, in questo ambito: corrosione generalizzata, vaiolatura e corrosione interstiziale, tensocorrosione.

Il film di passività negli HPASS è reso più resistente dal molibdeno. Tuttavia, esso può rompersi in presenza di condizioni ambientali avverse, che consentono l'innescare della corrosione. Un deterioramento diffuso del film comporta la corrosione dell'intera superficie (corrosione generalizzata). Per contro, una dissoluzione localizzata del film provoca corrosione per vaiolatura. Per via della presenza di molibdeno, il film negli HPASS è più resistente alla dissoluzione rispetto al caso dei tipi standard.

Gli ingegneri dei materiali devono selezionare il tipo di acciaio inossidabile meno costoso in grado di mantenere il film di passività nell'ambiente di interesse. Il fabbricante e gli utilizzatori devono conoscere i fattori che provocano riduzione della resistenza degli acciai a causa di problemi di lavorazione o delle condizioni operative. Questo paragrafo presenta alcuni principi di base relativi alla resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili. Informazioni di maggiore dettaglio circa le prestazioni degli acciai inossidabili in ambienti corrosivi possono essere trovate nei riferimenti citati nell'Appendice.

6.1 Corrosione generalizzata

La corrosione generalizzata è una perdita uniforme di materiale in superficie che comporta un assottigliamento uniforme

della sezione trasversale. Con gli acciai inossidabili, ciò avviene di norma in acidi forti, ad alta temperatura. La corrosione generalizzata indica in genere che l'ambiente è troppo aggressivo per il tipo selezionato. Se l'ambiente è ossidante, un tipo a più alto cromo può offrire un comportamento migliore. Se l'ambiente è riducente, tipi a più alto cromo, nichel, molibdeno e rame si comporteranno meglio. Piccoli tenori di impurezze possono cambiare sostanzialmente l'aggressività delle condizioni ambientali, modificandone la capacità di ossidazione o di riduzione. Tali variazioni possono modificare di conseguenza la resistenza alla corrosione dell'acciaio inossidabile.

6.2 Corrosione localizzata

6.2.1 Vaiolatura e corrosione interstiziale

La vaiolatura e la corrosione interstiziale si verificano in una regione localizzata, sulla superficie del metallo. Il film di passività può essere interrotto localmente in molti modi, per cui tali forme di corrosione sono quelle più ricorrenti. Per definizione, la vaiolatura si verifica in una superficie relativamente pulita e senza macchie. La corrosione interstiziale si verifica appunto in prossimità di un interstizio, come ad esempio un bullone o dell'ossido. Questi tipi di corrosione sono particolarmente insidiosi, poiché spesso si verificano in un ambiente favorevole e, una volta innescati, possono penetrare molto rapidamente.

La resistenza ad attacchi localizzati aumenta con maggiori tenori di Cr, Mo e N, che rappresentano la maggioranza delle aggiunte di questi alliganti negli HPASS. Le condizioni ambientali che favoriscono vaiolatura e corrosione inter-

stiziale includono gli ioni alogeni (specialmente cloro), ossidanti come il manganese, elevate temperature e condizioni acide non abbastanza aggressive da comportare corrosione generalizzata. Progettazione scarsa oppure condizioni di servizio pericolose possono creare interstizi dovuti a giunzioni imbullonate e depositi causati da insufficiente pulizia come superfici ossidate. Una lavorazione poco curata può anche favorire la corrosione localizzata creando sporcizia superficiale o macchiature che innescano la corrosione. Occasionalmente, la scarsa pulizia interna degli acciai e talune inclusioni non metalliche indesiderate o fasi intermetalliche possono innescare la corrosione localizzata.

Gli HPASS forniscono la maggiore possibile resistenza alla vaiolatura e corrosione interstiziale per un determinato insieme di requisiti afferenti ai costi ed alla fabbricabilità. Per classificare le diverse leghe a seconda della loro relativa resistenza e per supportare nello sviluppo di acciai migliori sono condotte prove di vaiolatura e di corrosione interstiziale in laboratorio con soluzioni altamente corrosive. Molte di queste prove usano la temperatura come criterio di classificazione per un determinato insieme di condizioni ambientali di prova. La classificazione è espressa in termini di temperatura critica di vaiolatura (CPT) o temperatura critica di corrosione interstiziale (CCT). La temperatura critica è quella in cui può iniziare la corrosione a fronte di un incremento della temperatura stessa (quindi, è meglio una temperatura critica maggiore di una inferiore). Per una data lega, la CCT è sempre inferiore rispetto alla CPT in quanto la corrosione interstiziale inizia più facilmente rispetto alla vaiolatura.

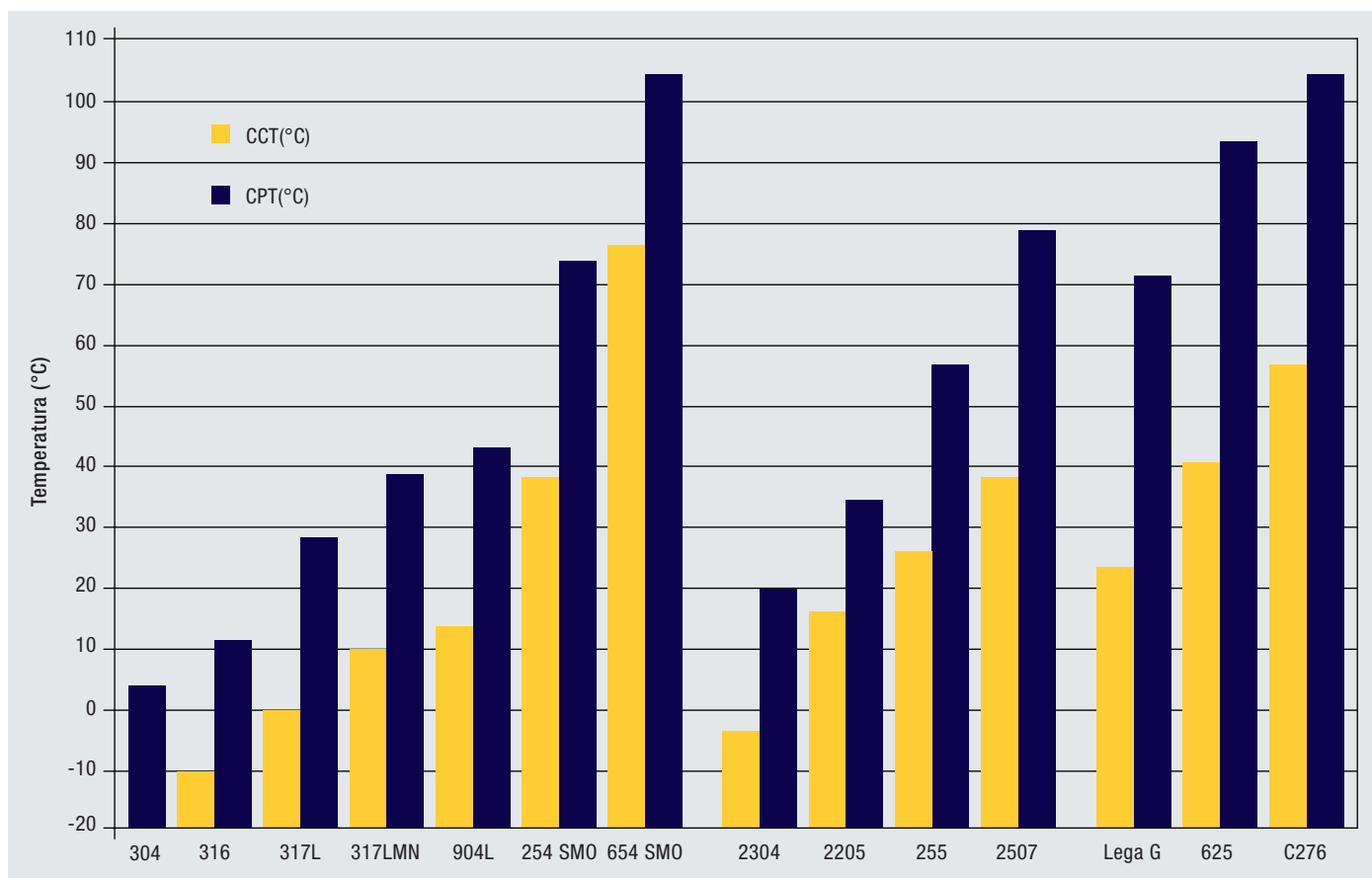


Figura 12: Temperature critiche di vaiolatura e di corrosione interstiziale per gli acciai inossidabili e le leghe di nichel. (4)

La **Figura 12** mostra le temperature critiche di vaiolatura e corrosione interstiziale misurate in soluzione di cloruro ferrico per un certo numero di acciai inossidabili. Si notino le migliori prestazioni degli HPASS rispetto al tipo standard inossidabile 316.

Le prove di classificazione e le relative temperature critiche non mostrano nello specifico come si comporterà una lega in determinate condizioni ambientali, ma leghe con maggiore CCT o CPT presentano in genere una migliore resistenza alla corrosione in uno spettro di ambienti reali. L'esperienza acquisita sul campo consente alcune correlazioni generali tra le temperature critiche e le prestazioni in servizio. Il tipo 316L, con una CPT secondo ASTM G48 di 10 °C (50 °F) non è adatto per tubazioni di condensazione vapore per servizio acquamarino.

L'acciaio HPASS 254 SMO, con una CPT di 75 °C (167 °F), fornisce prestazioni soddisfacenti in quell'ambiente.

6.2.2 Effetto delle fasi secondarie sulla corrosione localizzata

Benché gli acciai inossidabili austenitici siano leghe monofasiche, essi possono contenere fasi secondarie come normale effetto dei processi di fabbricazione dell'acciaio. Le fasi presenti comprendono inclusioni di ossido e di solfuri dovuti alle fasi di affinazione dell'acciaio nei convertitori, la ferrite dovuta alla separazione delle fasi durante la solidificazione e carburi, fase sigma e chi che si possono formare durante la ricottura o la saldatura. Tali fasi rappresentano altrettante discontinuità nella superficie dell'acciaio e possono promuovere la vaiolatura o la corrosione interstiziale in quanto

interrompono il film di passività. I trattamenti di decapaggio e passivazione spesso le rimuovono dalla superficie e ne minimizzano gli effetti.

Tuttavia, quando si formano le fasi sigma e chi, esse possono costituire un problema, in certe condizioni. Esse derivano dalla segregazione di elementi di lega durante la solidificazione iniziale dell'acciaio e possono formarsi anche durante i trattamenti termici successivi oppure la saldatura, come discusso nel Paragrafo 3.3. Poiché esse contengono alte percentuali di cromo e molibdeno, possono impoverire le aree circostanti di elementi di lega e ridurre la resistenza alla corrosione. Se si formano durante i processi di fabbricazione dell'acciaio, di norma non sono dannose, poiché i successivi processi di laminazione e ricottura dissolvono le fasi intermetalliche. Tuttavia, se si

formano durante la saldatura o la ricottura in officina, esse possono risultare estremamente dannose.

La **Figura 13** illustra le temperature ed i tempi per cui inizia a verificarsi precipitazione di fase sigma in un acciaio HPASS al 6 % di Mo. In questa figura, la formazione di fasi secondarie è rilevata determinando la temperatura critica di vaiolatura per saggi trattati in condizioni isoterme per varie combinazioni tempo/temperatura. Usando il criterio per cui una CPT < 85 °C (185 °F) risulta inaccettabile, possono essere tollerate solo permanenze molto brevi intorno a 700 °C (1290 °F) prima di compromettere la resistenza a vaiolatura. Quindi, i cicli di ricottura e saldatura devono essere controllati con cura per evitare precipitazione di fasi secondarie che compromettano la resistenza alla corrosione. Una modesta quantità di precipitati può essere tollerata se è permessa una CPT inferiore. Se queste fasi si sono formate, esse possono essere eliminate mediante un trattamento di ricottura di solubilizzazione che le dissolva e ripristini la resistenza alla corrosione dell'acciaio.

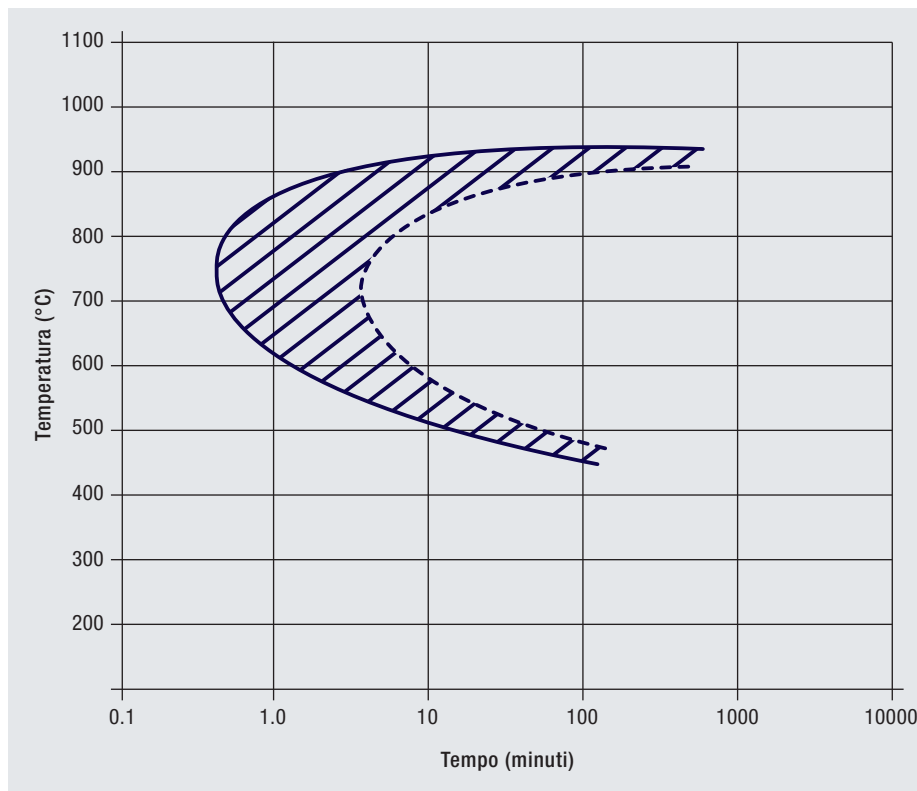


Figura 13: Effetto della temperatura sul tempo di innesco della corrosione in un acciaio austenitico al 6 % di Mo valutato mediante la temperatura critica di vaiolatura.

6.2.3 Criccabilità da tensocorrosione

In molte leghe, una combinazione tra tensione ed un dato ambiente può causare una tipologia di corrosione nota come tensocorrosione (SCC). Questa forma di corrosione si verifica in

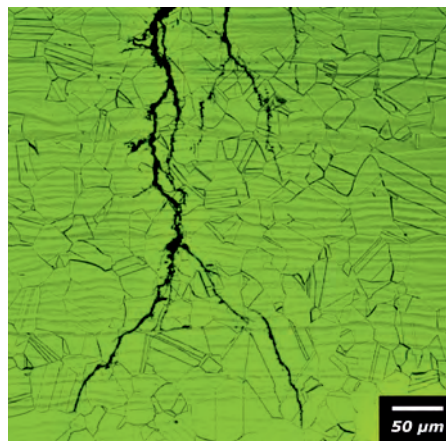


Figura 14: Cricche da tensocorrosione ramificate transgranulari in un acciaio inossidabile austenitico.

genere in forma di cricche ramificate che attraversano il bordo dei grani (**Figura 14**). Nel caso degli acciai inossidabili, questo avviene in genere negli ambienti contenenti cloruri, per cui si parla di tensocorrosione da cloruri (CSCC). Perché si verifichi SCC, devono essere presenti tensioni e specifiche tipologie di ambienti corrosivi. L'origine delle tensioni possono essere le tensioni di servizio oppure tensioni residue dovute ai processi di lavorazione. Dato che le tensioni residue sono spesso elevate, esse rappresentano spesso un elemento critico per la SCC. Gli acciai inossidabili austenitici standard come i tipi 304 e 316 sono molto sensibili a questo tipo di corrosione. Gli HPASS sono al contrario molto resistenti.

6.2.3.1 Tensocorrosione da cloruri (CSCC)

Quando si verifica CSCC in un acciaio inossidabile austenitico ricotto, lo stesso

presenta cricche transgranulari con una morfologia correlata con la direzione delle tensioni. La sensibilizzazione aumenta la sensibilità alla SCC e favorisce la criccabilità intergranulare. Elevate tensioni, temperature, alte concentrazioni di cloruri e bassi pH favoriscono il rischio di tensocorrosione. La **Figura 15** presenta una sintesi dei dati disponibili in materia di CSCC per i tipi 304 e 316. In acque neutre, il tenore di cloruri richiesto per avere criccabilità in queste leghe a temperatura prossima a quella di ebollizione o maggiori è inferiore ad 1 ppm. A temperature inferiori, prossime a quella ambiente, rotture per tensocorrosione possono verificarsi ancora ma per livelli di cloruri un po' superiori – nell'intervallo 1–10 ppm o maggiori. Condizioni di concentrazione di cloruri, come superfici umide/asciutte sotto coibente, possono causare CSCC anche quando l'ambiente contenga nominalmente solo poche ppm di cloruri.

Gli acciai inossidabili austenitici contenenti nichel al di sopra dell'intervallo 8–12 % dei tipi 304 e 316 forniscono tutti prestazioni migliori nei confronti della CCCC. Gli HPASS, che hanno il vantaggio del maggiore tenore di cromo e di molibdeno, come pure di nichel, sono particolarmente resistenti alla CCCC. Ad esempio, nel caso della lega UNS N08367 (AL-6XN) (Figura 15), la criccabilità non si manifesta se non a temperature e tenori di cloruri molto maggiori. I valori di soglia della temperatura sono ben al di sopra di 100 °C (212 °F), il che significa che soluzioni neutre di cloruri in ebollizione a pressione atmosferica non sono in grado di produrre cricche nel tipo 6 % Mo e simili HPASS, un sostanziale miglioramento dei tipi 304 e 316.

6.2.3.2 Tensocorrosione in altri ambienti

Ambienti caustici forti producono negli acciai inossidabili un tipo di tensocorrosione chiamata criccabilità caustica. I tipi 304 e 316 ed altri tipi simili sono suscettibili a temperature di circa 100 °C (212 °F) o superiori. Un maggiore tenore di nichel aumenta la resistenza alla criccabilità caustica, per cui tutti gli HPASS si comportano meglio rispetto ai tipi standard. Tuttavia, per applicazioni come evaporatori caustici che operano in ambienti molto aggressivi a quasi 150 °C (300 °F), solo leghe base Ni possono fornire un servizio adeguato.

Ambienti aventi idrogeno attivo possono causare un tipo di criccabilità definito 'criccabilità da idrogeno'. Tali ambienti includono gas con alta pressione di idrogeno, acidi forti, soluzioni acide contenenti un catalizzatore come l'idrogeno solforato e soluzioni per elettrodeposizione. Tutti gli austenitici standard ed i tipi HPASS sono molto resistenti a questo tipo di criccabilità, ad eccezione di quelli metastabili come il 301, che può contenere martensite. Tuttavia, ogni tipo che abbia subito lavorazioni a freddo per aumentarne la resistenza e la durezza risulta vulnerabile. Le norme NACE MR0175 ed ISO 15156 forniscono informazioni dettagliate circa i tipi approvati e le relative durezze accettabili.

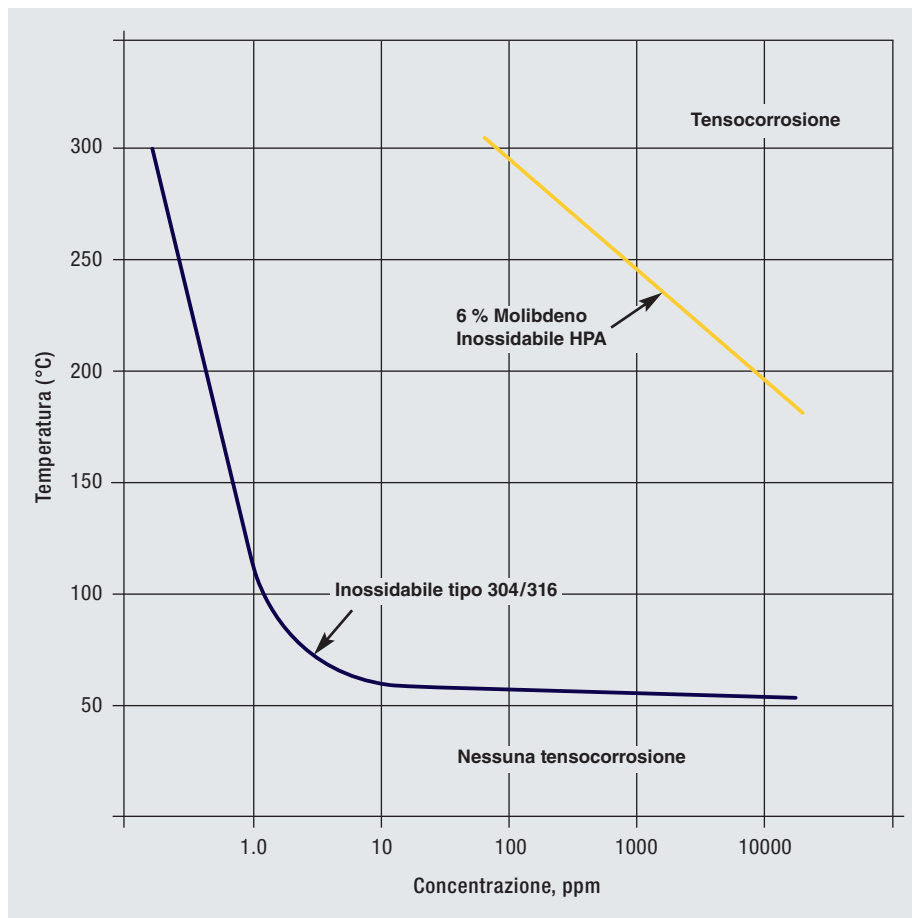


Figura 15: Valori limite di criccabilità da cloruri in acque clorate quasi neutre per i tipi 304 e 316 confrontati con HPASS al 6 % Mo.

L'acido politionico ($H_2S_4O_6$) può anche causare SCC negli acciai inossidabili austenitici sensibilizzati. L'uso dei tipi 304 e 316, sottoposti ad opportuni trattamenti termici, oppure dei tipi resistenti alla sensibilizzazione come i 321 e 347 consente di evitare questo pericolo. Tuttavia, anche questi tipi possono sensibilizzarsi a fronte di permanenze molto prolungate nell'intervallo di sensibilizzazione. Gli HPASS si comportano in qualche modo meglio dei tipi standard in presenza di acido politionico.

6.3 Corrosione intergranulare (IGA)/corrosione per sensibilizzazione

La corrosione intergranulare si verifica con rapidità in corrispondenza o in

prossimità dei bordi grano, senza che il grano stesso sia attaccato, o con attacchi modesti. Per acciai inossidabili austenitici standard, questa modalità di attacco è di norma associata con la sensibilizzazione, che si verifica durante la saldatura o il trattamento termico (vedere paragrafo 3.3). In funzione del grado di sensibilizzazione e della corrosività dell'ambiente, la corrosione può assumere più di una forma. La vaiolatura è probabile, in caso di sensibilizzazione moderata. Se esiste un reticolo continuo di carburi lungo il bordo dei grani, la corrosione avrà luogo in forma intergranulare ed avrà un aspetto simile alla corrosione generalizzata, con distacco di grani dalla superficie. In caso siano presenti tensioni di trazione, può verificarsi una corrosione simile alla SCC.

I progettisti ed i fabbricanti hanno tre opzioni per minimizzare la sensibilizzazione ed il conseguente attacco intergranulare:

- Impiegare un tipo a basso carbonio (es., i tipi 304L, 316L o 317L). Il basso tenore di carbonio aumenta il tempo disponibile prima dell'inizio della precipitazione durante il raffreddamento (Figura 3). Ciò rende possibile l'impiego di processi di lavorazione ad alta temperatura, la saldatura e la ricottura di sezioni importanti.
- Impiegare un tipo austenitico stabilizzato, in cui un elemento stabilizzatore aggiuntivo si leghi con il carbonio. I due elementi aggiuntivi più comuni sono il titanio (Ti) ed il niobio/columbio (Nb/Cb). Questi tipi richiedono un opportuno trattamento termico di stabilizzazione, che forma di preferenza carburi di titanio o niobio/columbio al posto dei carburi di cromo.

- Effettuare la ricottura di solubilizzazione del materiale sensibilizzato per ripristinare la resistenza alla corrosione. Le temperature di solubilizzazione raccomandate sono nell'intervallo 1030–1175 °C (1900–2150 °F). Il trattamento di solubilizzazione deve essere l'ultimo trattamento termico subito dal componente. Esso non elimina il pericolo di sensibilizzazione a lungo termine per componenti soggetti in servizio ad elevata temperatura.

Gli HPASS sono leghe a basso carbonio che contengono in genere azoto a sufficienza per scongiurare ogni rischio di sensibilizzazione da carburi di cromo. Tuttavia, come già discusso, si possono formare in questi acciai fasi intermetalliche a temperature analoghe a quelle capaci di produrre sensibilizzazione nei tipi standard. Se avviene ciò, una corrosione per vaiolatura accelerata è l'effetto più probabile, se l'acciaio risulta esposto ad ambienti aggressivi.

6.3.1 Sensibilizzazione dei giunti saldati/ decadimento della saldatura

La saldatura porta il metallo nell'intervallo di temperature di sensibilizzazione per un certo arco di tempo, in zona fusa e nelle vicinanze. La sensibilizzazione dell'acciaio da parte della saldatura dipende dal tipo di lega, dallo spessore e dall'apporto termico. La **Figura 16** illustra schematicamente un ciclo termico tipico e la zona ad esso associata, suscettibile di decadimento dopo saldatura. La figura mostra una fascia di materiale sensibilizzato formatasi da entrambi i lati del giunto. Il decadimento dopo saldatura è minimizzato controllando le condizioni di saldatura ed usando uno o più dei tre approcci sopra discussi per il controllo della sensibilizzazione. Per le ragioni di cui in 6.3, gli HPASS in genere non subiscono precipitazione di carburi durante la saldatura. Tuttavia, i cicli termici di saldatura possono favorire la formazione di composti

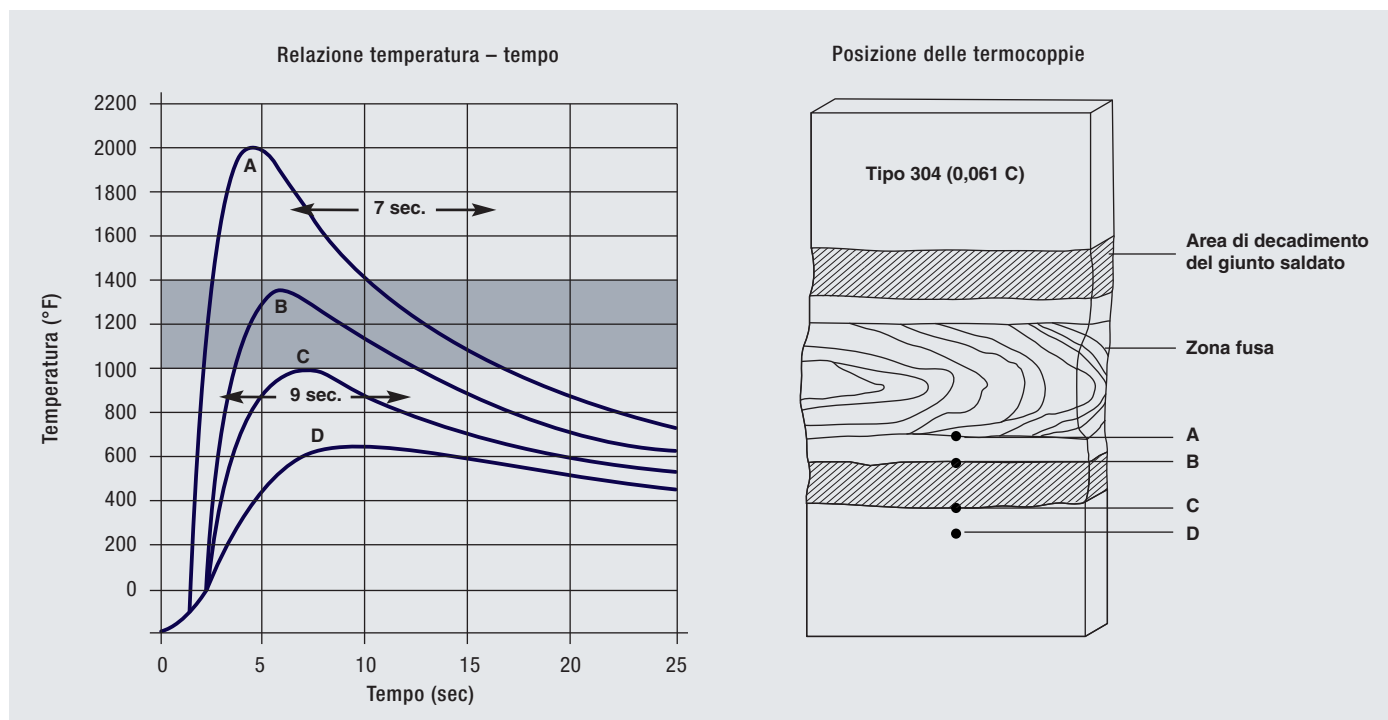


Figura 16: Curve tempo-temperatura durante la saldatura ad arco elettrico dell'acciaio inossidabile tipo 304 e relative zone sensibilizzate e di decadimento del giunto. (7)

intermetallici che peggiorano la resistenza a vaiolatura. I parametri di saldatura devono minimizzare la permanenza nell'intervallo critico ed è opportuno evitare la saldatura multipass.

6.3.2 Corrosione a lama di coltello

La corrosione a lama di coltello è una particolare forma di sensibilizzazione che si verifica solo nei tipi stabilizzati 321 e 347. Se la saldatura dissolve TiC o NbC/CbC, carburi di cromo si possono formare durante il successivo trattamento termico. Questo fenomeno crea una zona sensibilizzata molto stretta vicina alla zona fusa, da cui il nome. La maggior parte degli acciai inossidabili austenitici e gli HPASS non sono suscettibili a questa corrosione a lama di coltello, in quanto non stabilizzati.

6.4 Relazione tra lavorazione e resistenza alla corrosione

In questo capitolo ci si è occupati soprattutto dei fattori metallurgici ed ambientali che influenzano la corrosione. Tuttavia, è possibile affermare che alcuni banali errori di lavorazione sono la causa di numerosi problemi di corrosione. Gli acciai inossidabili hanno bisogno di un film di passività continuo e resistente per garantire resistenza alla corrosione. Purtroppo, molte usuali attività di lavorazione possono influenzare il film di passività in senso negativo. È fondamentale ricordare che tutto ciò che danneggia il film di passivazione superficiale peggiora la resistenza alla corrosione. Due ampie categorie di danno possono essere definite: la condizione superficiale e la contaminazione superficiale. La condizione superficiale include la rugosità, le tensioni residue e la deplezione di elementi di lega, tutti

aspetti intrinseci del componente. La contaminazione superficiale è materiale esterno introdotto sulla superficie ed è un aspetto estrinseco del componente. La lista dei contaminanti è lunga, tra i più comuni vi sono le matite colorate contenenti cloruri oppure i solventi, le contaminazioni di ferro degli utensili, gli ossidi dovuti alla ricottura o alla saldatura. I capitoli 7 e 14 forniscono ulteriori informazioni su questi aspetti e raccomandazioni per i fabbricanti per eliminare o limitare i loro effetti.

Fortunatamente, la corrosione dovuta a problemi di lavorazione può essere evitata comprendendone le cause ed assumendo le dovute azioni correttive per eliminarle. Ciò significa la buona cura nella manutenzione unita ad efficaci procedure di pulitura. La **Tabella 6** riassume le cause e gli effetti corrosivi associati ai problemi di lavorazione in officina.

Tabella 6: Influenza potenziale dei processi di lavorazione sulle modalità di corrosione (lo specifico effetto dipende da numerosi fattori).

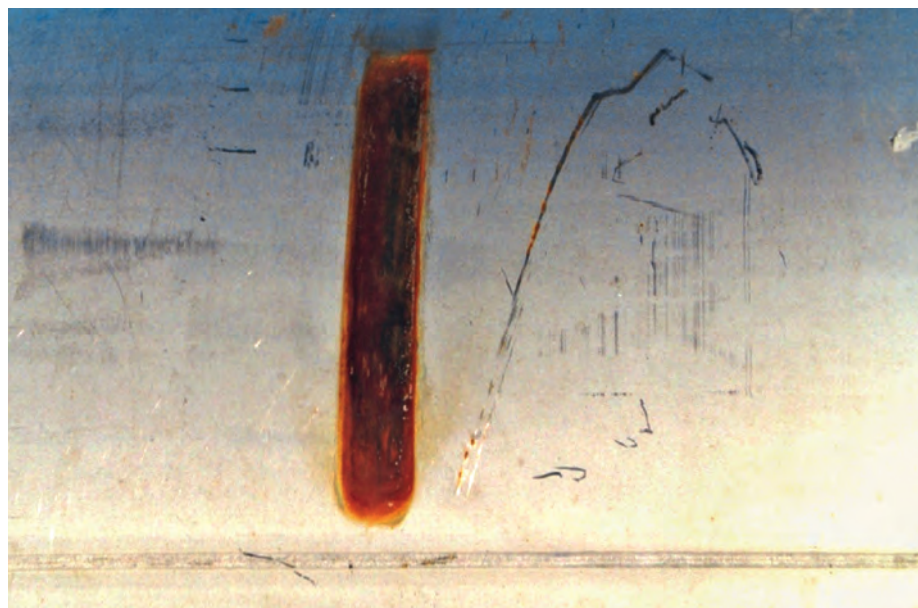
Processo di lavorazione	Tipi di acciaio inossidabile comuni			
	304, 316	304L, 316L	321, 347, 316Ti	Tipi ad alto Mo
Formatura a caldo	IGC	IGC	IGC	IGC, P, CC
Formatura a freddo	SCC	SCC	SCC	SCC
Lavorazione di macchina	SCC	SCC	SCC	SCC
Saldatura				
Effetti termici	IGC		KLA	P, CC
Effetti delle tensioni	SCC	SCC	SCC	SCC
Colore di rinvenimento	P, CC	P, CC	P, CC	P, CC
Giunzione meccanica (bullonatura, rivettatura, aggraffatura)	CC	CC	CC	CC
Contaminazione superficiale da ferro (da vari processi di lavorazione)	P, CC	P, CC	P, CC	P, CC

Nota: IGC = corrosione intergranulare; P = vaiolatura; CC = corrosione interstiziale; SCC = tensocorrosione; KLA = corrosione a lama di coltello

7 Cura in officina – mantenere le superfici lisce e pulite

La regola più importante da seguire in officina con gli HPASS è mantenere le superfici lisce e pulite, proprio come per gli acciai inossidabili standard. Maneggiare questi acciai ed impiegarli in lavorazione senza cura può rovinare il film di passività, riducendone la resistenza alla corrosione. Contaminanti superficiali, in particolare particelle di acciaio al carbonio ed ossidi, superfici rugose o abrase introdotte in officina sono cause comuni di interruzione del film.

In officina si dovrebbero seguire procedure atte a preservare la condizione superficiale dell'acciaio durante i suoi movimenti. Le procedure dovrebbero riguardare il ricevimento e lo stoccaggio, inizialmente, quindi tutte le fasi di manipolazione e lavorazione, come pure l'immagazzinamento finale e la spedizione. Esse dovrebbero inoltre riguardare anche il tipo ed ogni altro dato identificativo utile alla tracciabilità, dato che esistono numerosi diversi tipi di acciaio inossidabile.



L'impiego di reggette di acciaio al carbonio ha causato aree arrugginite su un tubo di acciaio inossidabile.

7.1 Protezione superficiale – fornitura iniziale e stoccaggio

I fabbricanti dovrebbero ordinare gli acciai inossidabili con opportune confezioni protettive, consegnandoli con camion protetti dall'acqua, se possibile. Gli acciai consegnati con camion aperti dovrebbero essere ispezionati e le loro confezioni aperte, nel caso che sia penetrata acqua al loro interno. Ciò è molto importante in inverno, quando è probabile l'esposizione a sali usati per scongelare. Gli acciai ancora confezionati dovrebbero essere stoccati in un ambiente pulito a bassa umidità. Lamiere, tubi ed altri prodotti di grandi dimensioni possono essere stoccati all'aperto, se necessario, in aree adibite allo scopo. Le aree di stoccaggio dovrebbero essere prive di sali di scongelamento e contaminanti atmosferici come fumi acidi e polvere di molatura. Le scaffalature non dovrebbero essere realizzate in acciaio al carbonio e dovrebbero evitare il contatto con l'acqua del suolo.



Non dovrebbe essere permesso camminare sugli acciai inossidabili. Coprire le superfici con carta, cartone o plastica, se gli operai sono costretti a farlo.

Oli, vernici oppure altri rivestimenti superficiali usati in officina non dovrebbero essere impiegati per proteggere gli acciai inossidabili durante lo stoccaggio o la lavorazione.

Gli acciai inossidabili dovrebbero essere stoccati separatamente dall'acciaio al carbonio in aree pulite, in cui non siano svolte attività di lavorazione su acciai al carbonio. Ciò è estremamente importante, dato che la superficie di un acciaio inossidabile contaminata da particelle di acciaio al carbonio può assumere in breve un aspetto arrugginito, molto brutto a vedersi.

I lamierini dovrebbero essere conservati in confezioni di legno per conservare la planarità e prevenire danneggiamenti ai bordi, interponendo fogli di carta o plastica per preservare la qualità superficiale. Le confezioni dovrebbero essere coperte per prevenire contaminazioni atmosferiche. Le lamiere dovrebbero essere conservate verticalmente in opportune scaffalature, in un locale chiuso ed asciutto, per minimizzare la contaminazione atmosferica ed evitare che le impronte dei piedi contaminino la superficie delle lamiere.

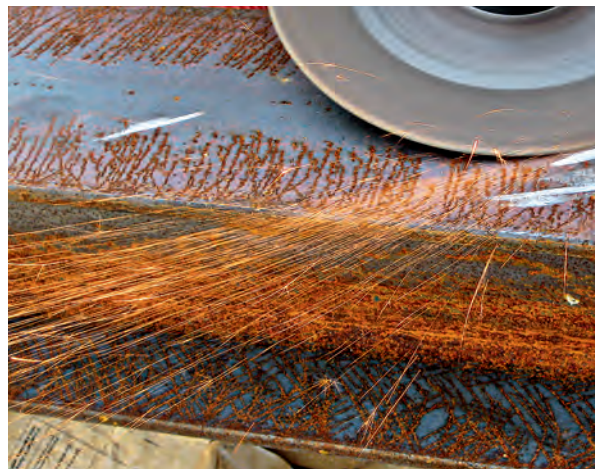
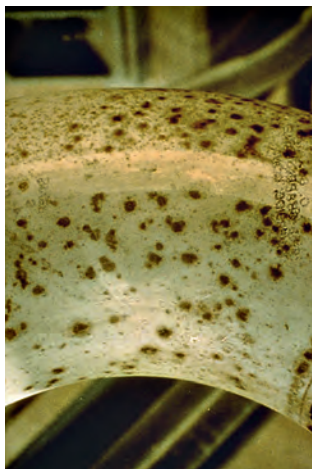
Gli acciai inossidabili non devono essere immagazzinati a contatto o nella stessa area, con acciai zincati. La contaminazione superficiale da rame, zinco o analoghi metalli a bassa temperatura di fusione può infragilire gli acciai durante la saldatura o il trattamento termico.

L'acciaio inossidabile può essere ordinato con una pellicola di plastica protettiva, opzione utile quando l'aspetto superficiale è importante, come per componenti ed applicazioni architettoniche. Questi film rimovibili restano al loro posto durante l'immagazzinamento e la lavorazione. Essi sono spesso rimossi dopo l'installazione. Essi minimizzano le piccole rigature ed i danneggiamenti meccanici di minore entità e prevengono la contaminazione da acciaio al carbonio e da altre particelle.

Gli acciai inossidabili protetti da pellicole dovrebbero inoltre essere immagazzinati in condizioni controllate di bassa umidità, dato che l'umidità può penetrare negli spigoli e portare a corrosione interstiziale. Gli acciai inossidabili protetti da pellicole non dovrebbero essere immagazzinati in presenza di luce solare diretta o riscaldati, poiché la pellicola può diventare difficile da rimuovere. Le pellicole protettive dovrebbero essere rimosse in caso di



Spazzole di acciaio al carbonio usate per pulire acciai inossidabili possono causare scoloritura ed arrugginimento. © Outokumpu Stainless



Molare l'acciaio al carbonio in prossimità di un'area dove siano stoccati acciai inossidabili o siano usati in lavorazione può causarne la contaminazione come mostrato dal tubo piegato corrosivo, a sinistra.

stoccaggi prolungati nel tempo, dato che la pellicola stessa ha una durata definita, trascorsa la quale perde le proprie proprietà protettive.

7.2 Lavorazione

Il contatto con l'acciaio al carbonio dovrebbe essere evitato durante la lavorazione e la movimentazione. Morsetti per il trasporto, ganci ed altri dispositivi dovrebbero essere o di acciaio inossidabile oppure protetti da plastica o cartone per prevenire la contaminazione da acciaio al carbonio. Speciali set di utensili dovrebbero essere dedicati esclusivamente agli acciai inossidabili. Può essere utile identificare con codici colore diversi gli utensili usati per acciai al carbonio da quelli impiegati per acciai inossidabili.

Sugli acciai inossidabili dovrebbero essere usati solo dischi mola, nastri abrasivi e consumabili per sabbiatura (vetro, sabbia e graniglia) puliti. Nessuno di essi può

essere usato prima su acciaio al carbonio. Prodotti contaminati possono trasferire acciaio al carbonio sulla superficie dell'acciaio inossidabile, causando quindi ruggine. La pallinatura con acciaio non dovrebbe essere usata con gli acciai inossidabili, perché può causare intrappolamento di acciaio al carbonio sulla superficie dell'acciaio inossidabile. Per la stessa ragione, dovrebbero essere usate solo spazzole e lane di acciaio inossidabile. Essi non possono essere stati impiegati in precedenza su acciaio al carbonio. La figura a sinistra illustra i problemi dovuti all'uso scorretto di spazzole.

Rulli, presse e stampi usati per la lavorazione degli acciai inossidabili dovrebbero essere puliti accuratamente per rimuovere particelle o ossidi, nel caso siano stati usati prima per lavorazioni su acciaio al carbonio. Per proteggere dalla contaminazione da acciaio al carbonio degli utensili è possibile usare carta o film plastici protettivi.

8 Formatura a caldo e a freddo

8.1 Formatura a caldo

Gli acciai inossidabili austenitici hanno eccellenti caratteristiche di formabilità mediante laminazione a caldo, forgiatura ed estrusione. I tipi austenitici standard presentano una maggiore resistenza ad alta temperatura rispetto agli acciai al carbonio. Di conseguenza, la riduzione per ogni passaggio risulterà inferiore rispetto agli acciai al carbonio e può essere limitata dalle potenzialità degli impianti per gli HPASS. È importante che gli acciai inossidabili siano riscaldati durante tutta la durata della lavorazione a caldo. Ciò implica tempi di riscaldamento più lunghi rispetto all'acciaio al carbonio a causa della loro minore conduttività termica. D'altro canto, i tipi ad elevato molibdeno tendono ad ossidarsi molto rapidamente; di conseguenza, gli operatori devono minimizzare la stasi durante le fasi di preriscaldamento.

La temperatura limite superiore per la lavorazione a caldo di un acciaio inossidabile è molto inferiore alla sua temperatura di fusione, dato che queste leghe presentano una brusca diminuzione della duttilità ad alta temperatura, per varie ragioni. La formazione di ferrite delta causa

questa perdita di duttilità nei tipi austenitici. Per i HPASS, la perdita è dovuta ai solfuri o fosfuri bassofondenti presenti nella microstruttura. La temperatura limite inferiore per la lavorazione a caldo è legata alla capacità dell'acciaio di ricristallizzarsi e diminuire la durezza, durante la lavorazione. Una lavorazione effettuata a temperatura troppo bassa può portare a cedimenti di componenti degli impianti a causa dei rapidi fenomeni di incrudimento, oppure rotture dei manufatti in produzione dovute alla perdita di duttilità. Quest'ultimo fenomeno è particolarmente critico per gli HPASS.

La **Tabella 7** riporta gli intervalli di temperatura per la formatura a caldo per varie categorie di acciaio inossidabile austenitico. Tutti i tipi hanno una temperatura limite superiore nell'intervallo 1175–1200 °C (2150–2200 °F), ma il limite superiore dipende fortemente dal tipo. Esso è piuttosto basso per i tipi standard, ed è notevolmente maggiore per i tipi più legati, per via della loro maggiore resistenza. Tale dipendenza del limite inferiore dal tipo, significa che la finestra per la lavorazione a caldo per i tipi più legati è più ridotta, avendo gli HPASS una minore finestra in cui operare.

È importante mantenere nel pezzo una temperatura uniforme durante la lavorazione a caldo. Le zone del pezzo a temperatura minore (ad esempio, gli spigoli appaiono facilmente più scuri del corpo del pezzo o anche neri rispetto ad una superficie rossa) possono essere molto più resistenti di quelle più calde per effetto della dipendenza della temperatura dalla resistenza delle leghe. Le zone più fredde possono strapparsi o rompersi per l'insufficiente capacità di tollerare ulteriori deformazioni.

Il pezzo dovrebbe essere solubilizzato dopo la formatura a caldo per garantire una microstruttura priva di sensibilizzazione, fasi secondarie dannose e tensioni residue. Il mancato ottenimento di una struttura completamente ricotta aumenta i rischi di sensibilizzazione nella successiva saldatura o servizio ad alta temperatura ed il rischio di corrosione connesso con le fasi chi e sigma. Essa garantisce inoltre la distensione delle tensioni residue che può causare instabilità dimensionale in servizio.

Se la temperatura del materiale non scende mai al di sotto della temperatura di solubilizzazione durante le operazioni di

Tabella 7: Intervalli di temperatura per la formatura a caldo di acciai inossidabili austenitici.

Tipi	Intervallo di temperatura di formatura a caldo		Temperatura di solubilizzazione	
	°C	°F	°C	°F
Tipi standard Tipi 304, 316, 321	870 ÷ 1200	1600 ÷ 2200	Min. 1040	Min. 1900
Tipi per alte temperature Tipi 309, 310	980 ÷ 1175	1800 ÷ 2150	Min. 1050	Min. 1925
Tipi 6 % Mo-0,2 % N S31254, S31266, N08367, N08926	980 ÷ 1200	1800 ÷ 2190	Min. 1150	Min. 2100
7 % Mo-0,5 % N S32654	1100 ÷ 1200	2000 ÷ 2200	Min. 1150	Min. 2100



Formatura a caldo di spicchi per la testata di un recipiente a pressione, © Antonius Vesselheads BV

formatura, è possibile considerare che la solubilizzazione sia svolta durante la lavorazione a caldo, nel caso in cui la temperatura della lavorazione a caldo è impiegata per effettuare la ricottura di solubilizzazione. Tuttavia, è difficile che la solubilizzazione, in questo caso, sia ottenuta nell'intero pezzo per via del raffreddamento non uniforme durante la lavorazione a caldo.

Gli acciai inossidabili austenitici richiedono un raffreddamento rapido dopo la lavorazione a caldo. La velocità di raffreddamento ottimale dipende dallo spessore di parete e dalla composizione chimica (in particolare, dal tenore di carbonio nei tipi standard). Nei tipi più legati, il tenore di cromo, molibdeno, ed azoto è particolarmente importante perché influenza la precipitazione di fasi intermetalliche. I tipi non stabilizzati aventi più dello 0,030 % di C dovrebbero essere raffreddati in acqua per prevenire la sensibilizzazione. I tipi standard con meno dello 0,030 % di C oppure i tipi stabilizzati come i 321, 347 o 316 Ti possono essere raffreddati in aria. I tipi aventi più dello 3 % di Mo dovrebbero essere raffreddati in acqua per prevenire la formazione di fasi intermetalliche. Un aumento della sezione comporta un incremento della velocità di raffreddamento necessaria ad evitare fasi secondarie.

8.2 Formatura ad alta temperatura

Lamiere di acciaio inossidabile austenitico aventi sezioni di grandi dimensioni sono spesso formate ad alta temperatura per sfruttare la minore resistenza ad elevata temperatura. A differenza dei tipi ferritici e duplex, gli austenitici non formano fasi secondarie sino a circa 480 °C (900 °F). Ciò definisce un limite superiore per la formatura ad alta temperatura dei tipi austenitici. Il limite può essere maggiore per i tipi a basso carbonio o stabilizzati o per materiali solubilizzati dopo formatura ad alta temperatura.

8.3 Formatura a freddo

Gli acciai inossidabili austenitici hanno elevate duttilità a temperature ambiente, che si traduce in un'eccellente formabilità a freddo, dalla semplice piegatura sino alle più complesse imbutiture profonde e stirature. Le differenze tra i tipi consistono nella differenza della resistenza meccanica

e nel diverso incrudimento. I tipi ad alta resistenza come gli HPASS richiedono maggiore potenza di lavoro o una riduzione delle sezioni lavorate. I tipi ad alto incrudimento, come il tipo 301, si comportano meglio in lavorazioni tipo stiratura.

Variazioni del carico di snervamento e dell'incrudimento causano una certa variabilità nel ritorno elastico e nelle dimensioni finali. L'instabilità dell'austenite (come nel tipo 301) e l'alligazione con azoto (come negli HPASS) aumentano la resistenza meccanica ed il tasso di incrudimento. Questi acciai ad alta resistenza richiedono maggiori forze di formatura e presentano un maggiore ritorno elastico, tale da richiedere una piegatura maggiore per ottenere il profilo desiderato. Le variazioni del tenore di azoto all'interno degli intervalli previsti per una data composizione possono causare variazioni significative nella formabilità, anche in tipi standard aventi al massimo 0,10 % di N.

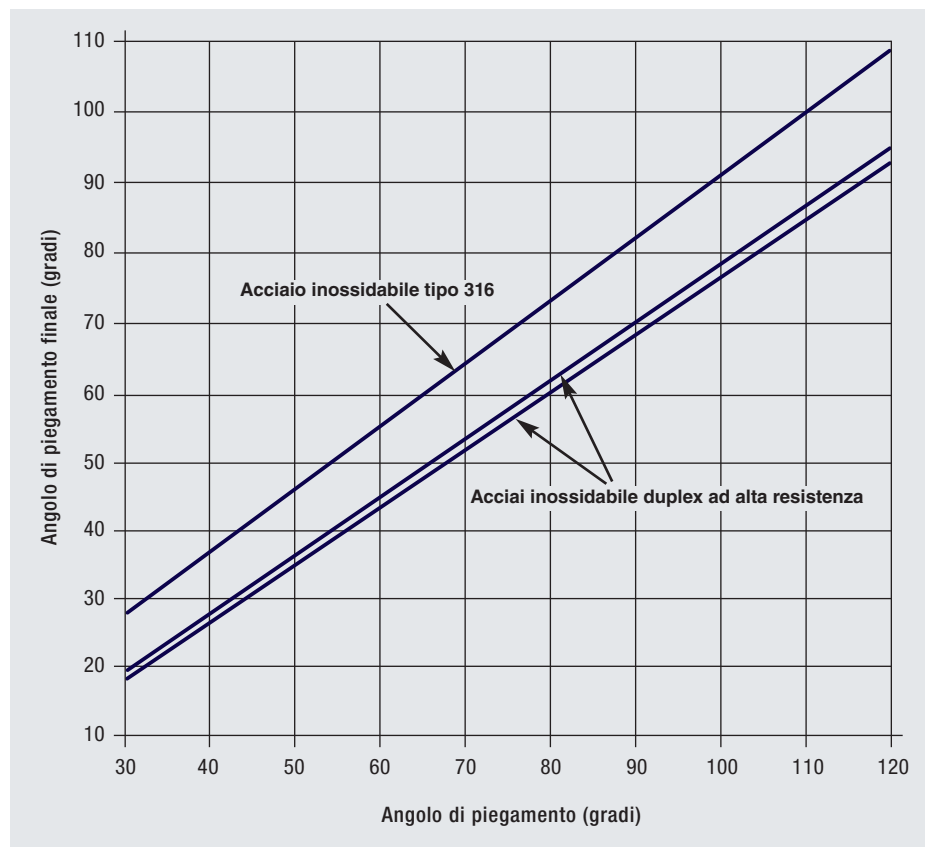


Figura 17: Gli HPASS hanno un ritorno elastico durante la formatura maggiore dei tipi standard, simile ai tipi duplex ad elevate resistenza qui riportati. (7)

La **Figura 17** confronta il ritorno elastico di un lamierino di acciaio duplex ricotto, di spessore 2 mm, con quello di un 316L. Gli acciai inossidabili austenitici con maggiori tenori di azoto e quelli laminati per incrementarne la resistenza (vedere ASTM A666) hanno un ritorno elastico più simile ai tipi duplex in figura rispetto ai tipi austenitici standard. Quando il ritorno elastico è considerato correttamente, i tipi legati con azoto ed incruditi permettono riduzioni degli spessori, risparmiando in termini di peso e di costi.

8.3.1 Piegatura

Gli acciai inossidabili austenitici possono essere formati con modesti raggi di curvatura allo stato ricotto. Una piegatura a 180° con un raggio pari a metà dello spessore del materiale (piegatura 1/2 t 180°), indipendentemente dalla direzione di laminazione, è un criterio di accettabilità comune. Tale criterio deve essere un poco moderato per acciai ad alta resistenza o skinpassati.

Gli stessi lamierini fortemente incruditi mantengono una sostanziale duttilità. I tipi 301, 304 e 316 possono essere piegati 1/2 t 180° allo stato incrudito ad 1/4 (carico di snervamento minimo 2,5 volte rispetto allo stato ricotto) e 1t 180° allo stato incrudito ad 1/2 (con carico di snervamento minimo 3,6 volte rispetto allo stato ricotto). Questa riserva di duttilità consente la



Il fondo di un grande reattore in acciaio inossidabile austenitico fabbricato con sezioni formate a freddo.
© Antonius Vesselheads BV

piegatura o la formatura di lamierini incruditi e conferisce resistenza all'urto (assorbimento di energia) ai veicoli ferroviari.

8.3.2 Profilatura a rulli

La profilatura a rulli è un metodo efficiente ed economico per produrre semilavorati a sezione aperta come angolari e profilati ad U. Esso è inoltre un ottimo modo per irrigidire i pannelli con rilievi e scanalature, riducendo lo spessore necessario per

applicazioni architettoniche o nei trasporti. Gli acciai austenitici sono profilabili a rulli facilmente, ma la varietà nella resistenza meccanica e nel tasso di incrudimento dei materiali comporta una certa differenza nelle tolleranze dimensionali dei prodotti profilati a rulli. Gli acciaieri minimizzano tale variabilità riducendo per ogni tipo le variazioni del tenore di nichel, carbonio ed azoto.

8.4 Stampaggio e stiratura

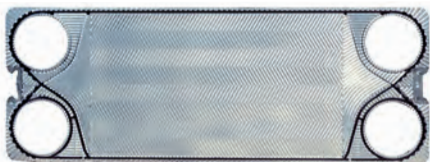
La variabilità delle proprietà di duttilità e di incrudimento degli acciai inossidabili austenitici determina un ampio spettro di operazioni di stampaggio e stiratura o loro combinazioni. I materiali da stampare devono avere una duttilità sufficiente per scorrere nello stampo in condizioni di basso vincolo dei bordi, per cui risultano favoriti i materiali ad alta duttilità e basso tasso di incrudimento. La stiratura richiede un vincolo forte alle estremità del semilavorato e la deformazione si verifica per stiratura all'interno dello stampo, con assottigliamento del lamierino. Un alto tasso di incrudimento consente al semilavorato di stirarsi senza rompersi, consentendo notevoli profondità di formatura.



Un lavello di forma complessa che richiede stampaggio e stiratura può essere fatto in acciaio inossidabile austenitico. © ThyssenKrupp Stainless

La maggior parte delle lavorazioni di formatura impiega una combinazione di stampaggio e stiratura, così che le proprietà del semilavorato devono essere adeguate al grado di stampaggio o stiratura richiesto dalla geometria del pezzo finito. I diversi tipi degli acciai inossidabili austenitici offrono un'ampia gamma di proprietà di formatura, consentendo una grande libertà nella progettazione. Le sofisticate tecnologie di formatura dei lamierini hanno generato composizioni mirate per gli acciai all'interno dei tipi standard. Ad esempio, un lavello di forma complessa richiede sia stampaggio che capacità di stiratura (si veda la figura in fondo a pag. 31). Per soddisfare queste esigenze, sono disponibili composizioni per il tipo 304 che coniugano duttilità e capacità di incrudimento.

Taluni tipi hanno composizioni bilanciate per favorire la formazione di martensite per deformazione, il che aumenta il grado di stiratura. Ad esempio, il tipo 301 ad alto carbonio e basso tenore di nichel presenta un tasso di incrudimento molto alto che rende più resistenti le aree assottigliate dalla formatura. Ciò sposta l'allungamento alle zone adiacenti, in modo che la deformazione può proseguire senza rotture. La figura sotto mostra uno scambiatore di calore formato facendo ampio ricorso alla stiratura. La lunghezza del profilo dopo la formatura è molto maggiore di quella iniziale. Solo l'eccellente capacità di incrudimento dei tipi austenitici consente all'acciaio di realizzare i canali senza fratture in corrispondenza delle piegature.



Una lamiera formata per stiratura per uno scambiatore di calore tipo flat-plate sfrutta le proprietà di stiratura degli acciai inossidabili austenitici. © Paul Mueller Company



La tornitura in lastra del fondo di un recipiente di acciaio inossidabile austenitico sfrutta l'alta duttilità dell'acciaio e le modeste proprietà di incrudimento. © Antonius Vesselheads BV

8.5 Tornitura in lastra (spin forming)

La tornitura in lastra richiede un'alta duttilità e bassi tassi di incrudimento, per cui gli alti tassi di incrudimento di alcuni tipi austenitici standard limitano il loro impiego con questo processo. La modifica della composizione chimica può risolvere questo problema. I tipi 305, 309, 310 e 904L contengono elevati tenori di nichel (e talvolta piccole aggiunte di rame) che riducono l'effettivo tasso di incrudimento, producendo leghe più facili da imbutire e da tornire in lastra. Malgrado la loro alta duttilità, questi acciai possono richiedere trattamenti di ricottura intermedi per consentire ulteriore tornitura in lastra.

8.6 Ricalcatura a freddo

Bulloni inossidabili ed altri sistemi di fissaggio possono essere fabbricati facilmente per ricalcatura a freddo (stampaggio assiale). Un certo incrudimento è desiderabile per aumentare la resistenza della

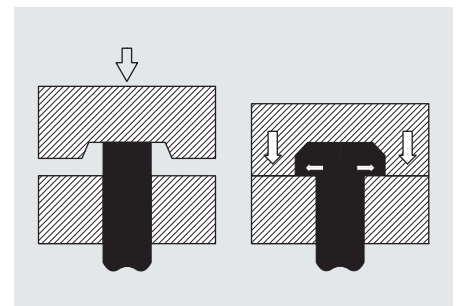


Figura 18: La formatura a freddo della testa di un bullone richiede un facile scorrimento del flusso del metallo nello stampo. © Forging Industry Association

testa del bullone, ma un'elevata duttilità e bassi tassi di incrudimento rendono il processo più semplice da eseguire. Il tipo 304 a maggiore tenore di nichel (tipo 305) o rame (S30433, talvolta denominato '302HQ') presenta eccellenti proprietà di scorrimento, riducendo il rischio di cricabilità degli spigoli. La **Figura 18** illustra il processo di ricalcatura a freddo.

9 Taglio

Gli acciai inossidabili austenitici possono essere agevolmente segati, cesoiati, tranciati e tagliati con processi plasma o laser. Questi metodi possono tagliare lamiere ed altre parti di grandi dimensioni con precisione dimensionale e qualità delle superfici che talvolta soddisfano i requisiti finali. Gli stessi metodi possono tagliare gli HPASS, ricordando che l'esigenza di un taglio corretto è ancora più sentita per effetto dei loro alti tassi di incrudimento.

9.1 Taglio con sega

Il taglio degli inossidabili con seghe a nastro o alternative richiede lame particolarmente affilate, un tasso di alimentazione positivo ed un corretto llineamento. Un fluido lubro-refrigerante efficace deve essere diretto verso il punto di taglio. Le emulsioni sintetiche sono l'ideale per questo scopo. Un'alimentazione positiva ed una minima instabilità della lama sono fattori importanti nel taglio degli acciai inossidabili austenitici per via del loro alto tasso di incrudimento. La sega deve avere la potenza sufficiente per guidare la lama al di sotto della superficie di taglio

precedentemente indurita (**Figura 19**).

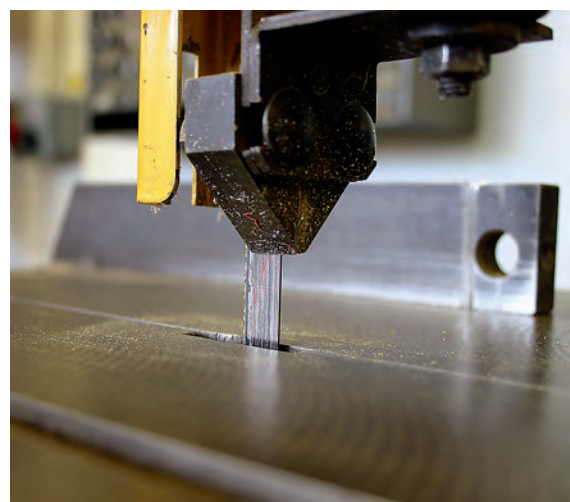
Se la lama striscia sulla superficie anziché tagliarla, essa si indurisce e oppone resistenza all'ulteriore taglio, causando una rapida usura della lama e perdita della capacità di taglio.

I tipi più legati, sia quelli con aggiunte di azoto che quelli con molibdeno ed azoto, possono opporre resistenza al taglio di sega anche con macchine particolarmente potenti per via della loro combinazione tra alta resistenza e tasso di incrudimento. Se la sega non riesce a mantenere un'alimentazione positiva, può essere necessario un altro metodo di taglio.

9.2 Cesoitura

La cesoitura è un metodo rapido, preciso e molto efficace per tagliare gli acciai inossidabili austenitici. L'alta duttilità e tasso di incrudimento degli acciai inossidabili austenitici richiedono l'impiego di macchine più potenti rispetto a quelle impiegate per gli acciai al carbonio. Essi richiedono inoltre una regolazione più accurata. Le differenze tra acciai al carbonio e HPASS sono anche più

significative. Una regolazione adeguata richiede macchine rigide, lame affilate e tolleranze più precise rispetto al caso degli acciai al carbonio. Gli impianti moderni ad elevata resistenza forniscono un'eccellente forma ed accuratezza dimensionale per gli acciai inossidabili austenitici per lamiere sino a 25 mm (1 pollice) di spessore. Per lavorare i tipi a maggiore resistenza, l'intervallo di



Taglio di sega

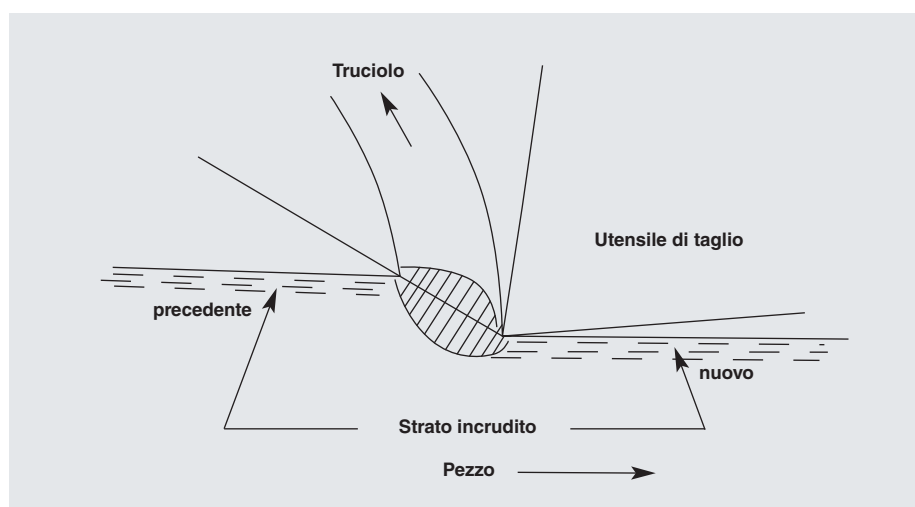


Figura 19: Un taglio positivo asporta materiale al di sotto dello strato precedentemente incrudito. Figura basata sul riferimento 8.



La punzonatura, uno dei tanti processi di cesoitura.

spessore da lavorare deve essere ridotto in modo proporzionale alla loro maggiore resistenza rispetto al tipo 304. La resistenza a taglio degli acciai inossidabili può essere assunta pari a 0,6 volte la loro resistenza a rottura, dando così un'indicazione sulle limitazioni per le lavorazioni più impegnative.

9.3 Punzonatura

La punzonatura è una tipologia di cesoiatura che usa un punzone ed uno stampo per tagliare il materiale invece di utensili da taglio a bordi retti. Utensili affilati e tolleranze controllate sono richiesti anche per la punzonatura degli acciai inossidabili. Anche in questo caso, i tipi a maggiore resistenza o tasso di incrudimento richiedono maggiore potenza ed accuratezza nella regolazione rispetto ai tipi austenitici standard.

9.4 Taglio plasma

Il taglio plasma è il metodo di taglio più diffuso per il taglio di qualunque tipo di acciaio inossidabile di spessore maggiore o uguale a 25 mm (1 pollice). L'evoluzione della progettazione delle torce plasma ha migliorato enormemente la precisione e la qualità del taglio, rendendo la tecnologia ideale per il taglio di linee dritte come anche di forme più complesse. In alcuni



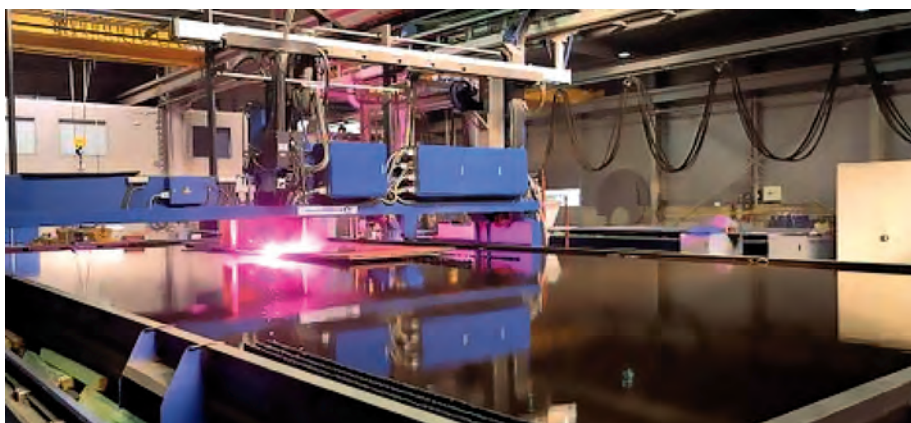
Taglio laser

casi, i lembi tagliati con plasma hanno una qualità sufficiente ad essere impiegati in servizio o anche saldati senza ulteriori finiture. Unità plasma portatili sono disponibili per il taglio di parti e di saggi di prova. Il taglio sotto battente d'acqua riduce l'emissione di fumi.

9.5 Taglio laser

Nel taglio laser, il fascio laser fonde il materiale mentre un flusso di azoto espelle il materiale fuso dal fronte di taglio. L'azoto

previene l'ossidazione e la riduzione di resistenza alla corrosione. La pressione dell'azoto usato nel taglio laser è maggiore rispetto a quella impiegata per il taglio di acciai al carbonio e deve essere aumentata nel caso di spessori maggiori per rimuovere il materiale fuso in modo efficiente. Gli spessori di HPASS e di acciai inossidabili austenitici standard sono spesso tagliati alle dimensioni finali con il laser, eliminando la necessità di ulteriori lavorazioni di macchina. Vi sono lievi differenze tra le caratteristiche del taglio laser degli HPASS e dei tipi standard.



Taglio plasma

Il taglio plasma degli acciai inossidabili richiede azoto ad elevata purezza. Una piccola percentuale di ossigeno potrebbe ossidare il cromo dell'acciaio, impoverendo la superficie di cromo ed abbassandone la resistenza alla corrosione. Una leggera decolorazione della superficie di taglio indica l'ossidazione del cromo. Se si verifica una decolorazione significativa, è richiesto un decapaggio acido o la fresatura dei lembi per ripristinare la resistenza alla corrosione. L'azoto usato per il taglio deve avere una purezza certificata pari ad almeno il 99,95 % con un tenore massimo di ossigeno pari a 200 ppm.

10 Lavorazioni di macchina

La notevole resistenza e duttilità degli acciai inossidabili austenitici richiede l'uso di macchine utensili di potenza elevata e provoca una forte abrasione nell'interfaccia utensile-truciolo. Inoltre il calore generato da abrasione e deformazione non viene facilmente rimosso a causa della bassa conducibilità termica dell'acciaio. Questi fattori rendono gli acciai inossidabili austenitici più difficili da lavorare degli acciai al carbonio. La resistenza più elevata dei HPASS presenta una sfida anche più grande. In ogni caso tutti questi acciai possono essere con successo lavorati con macchine utensili a patto di rispettare principi basilari per gli acciai inossidabili (macchine potenti, configurazioni rigide, tagli positivi che siano in grado di penetrare lo strato incrudito in via di formazione).

Gli acciai inossidabili austenitici possono essere divisi in quattro grandi gruppi, con riferimento alla lavorabilità alla macchina utensile.

- Tipi standard, tra cui i tipi 304 e 316, in forma di lamiera e di lamiera sottile.
- Tipi standard a lavorabilità migliorata, tipicamente per prodotti in barra.
- Tipi free-machining, normalmente in forma di barra.
- Tipi più legati e a maggiore resistenza, compresi gli HPASS.

I tipi standard in forma di lamiera e di lamiera sottile sono concepiti per la saldabilità e la finitura superficiale piuttosto che per la lavorabilità. Gli acciai ottimizzati rispettano tutte le specifiche dei tipi standard, ma prevedono un particolare processo e controllo di processo, spesso brevettati, per ottenere la migliore lavorabilità. Tali processi ottimizzati richiedono un controllo rigoroso della composizione e della microstruttura, in particolare la

dimensione, la forma e la distribuzione delle inclusioni non metalliche come solfuri ed ossidi.

I tipi free-machining sono concepiti per la migliore lavorabilità. Il tipo più lavorabile è il 303, che è un tipo 304 con aggiunta di zolfo ed altre modifiche. Il tipo 303 contiene 0,3–0,4 % di zolfo a confronto dello 0,015 % tipico del 304. Lo zolfo genera inclusioni che riducono le forze di taglio ed aiutano la formazione del truciolo. Le inclusioni di solfuri possono in sostanza peggiorare la resistenza alla corrosione, la tenacità, la duttilità e la saldabilità, limitando il campo di applicazione del tipo 303 per la lavorazione di apparecchi in pressione o altre applicazioni.

Gli HPASS sono più difficili da lavorare dei tipi standard per una serie di ragioni. La più importante, essi contengono un bassissimo tenore di zolfo (0,001 % o meno) per migliorare il comportamento in caso di incrudimento e la resistenza alla corrosione. L'elevato tenore di molibdeno comporta una maggiore usura degli utensili. Infine, l'azoto è particolarmente dannoso per la lavorabilità di macchina in quanto aumenta significativamente la resistenza, il tasso di incrudimento e la tenacità.

10.1 Criteri generali

I seguenti criteri generali per le lavorazioni di macchina sono applicabili a tutti gli acciai inossidabili.

- Impiegare macchine particolarmente potenti, rigide e robuste, con sistemi portautensili e di bloccaggio dei pezzi rigidi. Ciò provoca tagli positivi e minimizza le vibrazioni. Tali requisiti sono essenziali per la lavorazione dei tipi più legati.
- Per via dei maggiori carichi dovuti all'alto tasso di incrudimento degli acciai inossidabili austenitici, il raggio

del tagliente dell'utensile non deve essere maggiore del necessario per garantire allo stesso una durata adeguata.

- L'affilatura dell'utensile deve essere la più accurata possibile, compatibilmente con la sua durata. Geometrie molto aggressive sono possibili per i tipi a lavorabilità ottimizzata e free-machining, ma nel caso degli acciai più legati possono conferire all'utensile una resistenza insufficiente durante il taglio.
- La velocità di avanzamento deve essere sufficiente a tagliare al di sotto dello strato indurito creato dal precedente taglio, tipicamente almeno 0,076 mm (0,003 pollici).
- La velocità di taglio deve essere molto al di sotto del valore limite per l'insieme utensile - portautensili in termini di rigidità e vibrazioni, per evitare la formazione di strati induriti.
- Gli utensili devono essere sostituiti o affilati ad intervalli regolari prima di perdere il filo. Gli utensili che hanno perso il filo causano la formazione di uno strato incrudito.
- È essenziale l'uso di un flusso di fluido lubro-refrigerante diretto verso il punto di taglio. Le emulsioni con additivi tipo 'estreme-pressure' (EP) sono particolarmente indicate.
- Inserti rivestiti in carburo, in particolare quelli con angolo di frattura positivo, forniscono buoni risultati nella lavorazione sia di acciai inossidabili tipo standard che di quelli più legati, più difficili.
- Gli utensili ad alta velocità devono essere della migliore qualità.

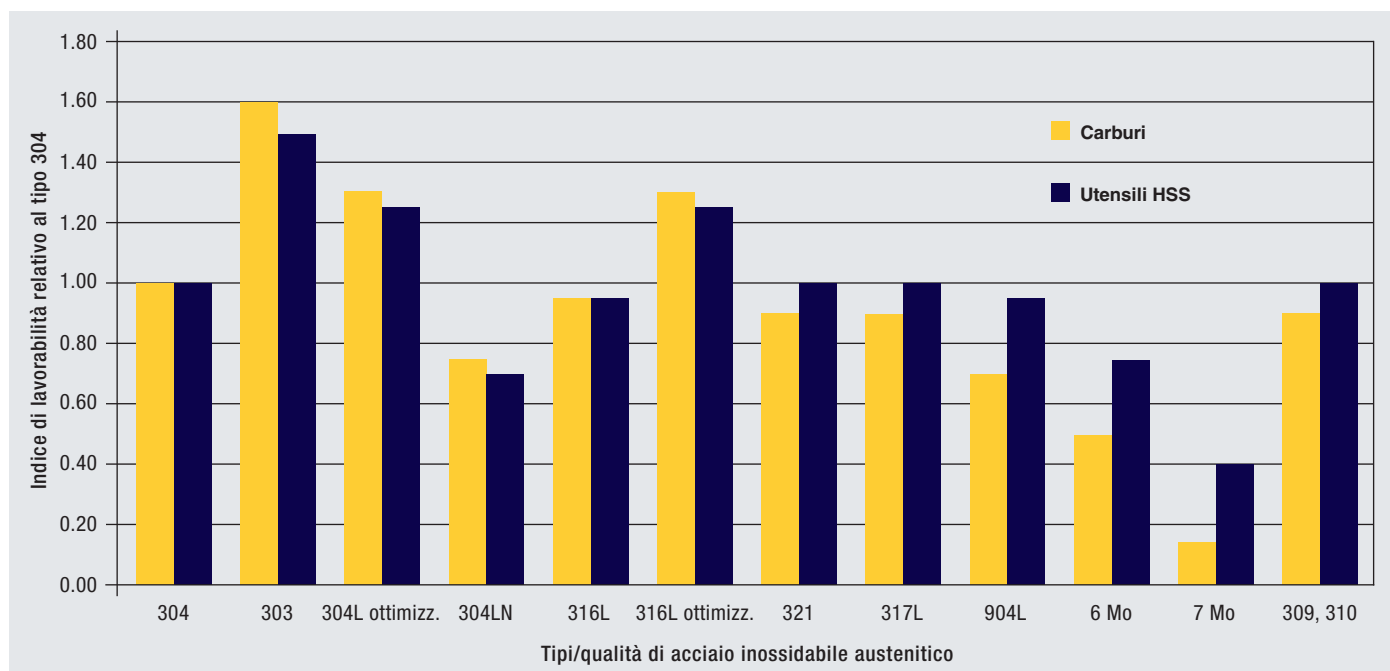


Figura 20: Indice di lavorabilità per diversi acciai inossidabili confrontato con il tipo standard 304. La lavorabilità relativa è simile per utensili in carburo e ad alta velocità. (9)

10.2 Lavorabilità alle macchine utensili di diversi tipi di acciaio inossidabile

Gli acciai inossidabili hanno una lavorabilità molto variabile in funzione delle proprietà di ogni tipo e dello spettro di possibili lavorazioni. Un unico indice di lavorabilità non può rappresentare tutti i tipi o gli stati di fornitura, semmai vari indici valorizzati in funzione dei singoli tipi. Essi possono aiutare a stabilire condizioni iniziali per lavorare un nuovo tipo. La **Figura 20** confronta diversi tipi di acciaio inossidabile mediante un indice di lavorabilità.

10.3 Tornitura

La tornitura degli acciai inossidabili richiede la massima rigidezza e ridotte vibrazioni. I rompitrucciolo sono spesso richiesti. Alcune linee guida per la tornitura degli acciai inossidabili austenitici sono riportate nella **Tabella 8**.

10.4 Fresatura frontale con carburi cementati

In accordo a queste linee guida, i migliori risultati si possono ottenere fresando con carburi cementati:

- Usare inserti rivestiti oppure inserti di grado duro per la sgrossatura ed una profondità di taglio superiore a 0,5 mm (0,020 pollici). Se si desidera una finitura superiore, usare un inserto di grado più duro, velocità maggiori e minori velocità di alimentazione.
- In caso di fresatura concorde, usare una velocità di alimentazione di 0,10–0,25 mm (0,004–0,010 pollici) per dente, un angolo di spoglia superiore fortemente positivo ed un angolo di spoglia radiale leggermente negativo, con una larghezza di taglio pari ad $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$ del diametro dell'utensile usato.

- Il requisito più importante per il taglio interrotto è espellere il truciolo dall'utensile invece di trascinarlo con l'utensile, per tagliarlo di nuovo. Ciò è possibile con una velocità sufficiente ad ottenere una temperatura adeguata all'interfaccia tra truciolo ed inserto, in modo che il truciolo non si attacchi allo spigolo o alla faccia dell'inserto. In caso di sgrossatura, è meglio non usare refrigerante per ottenere questo risultato. Per finiture spinte, il refrigerante può aiutare ad allontanare il truciolo dall'utensile, ma sono richieste una velocità molto maggiore ed una velocità di avanzamento inferiore per evitare che il truciolo non aderisca all'utensile.
- Le linee guida per la scelta dei parametri per la fresatura frontale sono riportate nella **Tabella 9**.

Tabella 8: Linee guida per la tornitura degli acciai inossidabili austenitici.

Linea guida	Carburi		Utensili ad alta velocità
	Sgrossatura	Finitura	
Tipi standard			
Velocità, m/min (sfm)	120–150 (395–490)	150–210 (490–690)	20–25 (65–82)
Velocità di alimentazione, mm (pollici/giro)	0,3–0,6 (0,012–0,024)	0,05–0,30 (0,002–0,012)	0,05–0,20 (0,002–0,008)
Profondità di taglio, mm (pollici)	2–5 (0,080–0,20)	0,5–2,0 (0,020–0,080)	0,5–2,0 (0,020–0,080)
Tipo ISO	P20–P35	P10–P15	
Tipi ottimizzati			
Velocità, m/min (sfm)	170–180 (560–590)	230–250 (750–820)	25–35 (82–115)
Velocità di alimentazione, mm (pollici/giro)	0,3–0,5 (0,012–0,020)	0,1–0,3 (0,004–0,012)	0,3–0,5 (0,012–0,020)
Profondità di taglio, mm (pollici)	2–5 (0,080–0,20)	< 2 (< 0,080)	2–5 (0,080–0,20)
Tipo ISO	P20	P10	
Tipi HPASS			
Velocità, m/min (sfm)	60–80 (195–262)	80–100 (262–307)	4–6 (12–19)
Velocità di alimentazione, mm (pollici/giro)	0,3–0,6 (0,012–0,024)	0,05–0,30 (0,002–0,012)	0,05–0,20 (0,002–0,008)
Profondità di taglio, mm (pollici)	2–5 (0,080–0,20)	0,5–2,0 (0,020–0,080)	0,5–2,0 (0,020–0,080)
Tipo ISO	P30–P50	P25–P35	

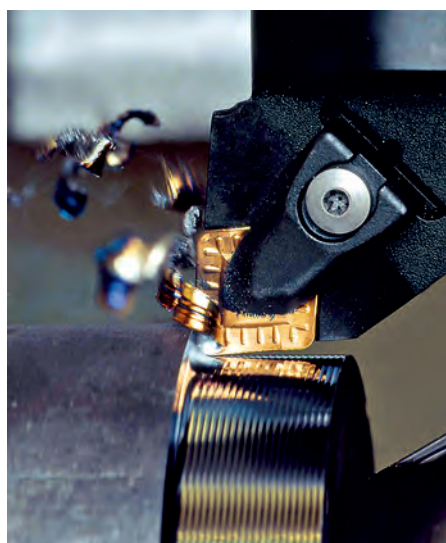
Tabella 9: Linee guida per la fresatura frontale degli acciai inossidabili austenitici.

Linea guida	Carburi		Utensili ad alta velocità
	Sgrossatura	Finitura	
Tipi standard			
Velocità, m/min (sfm)	160–190 (525–625)	190–220 (625–720)	15–20 (50–65)
Velocità di alimentazione, mm (pollici/dente)	0,2–0,4 (0,008–0,016)	0,1–0,2 (0,004–0,008)	0,10 (0,004)
Profondità di taglio, mm (pollici)	2–5 (0,080–0,20)	1–2 (0,040–0,080)	0,1 x diametro dell’utensile
Tipi ottimizzati			
Velocità, m/min (sfm)	180–210 (600–700)	305–350 (1000–1150)	25–30 (80–100)
Velocità di alimentazione, mm (pollici/dente)	0,2–0,4 (0,008–0,016)	0,1–0,2 (0,004–0,008)	0,10 (0,004)
Profondità di taglio, mm (pollici)	2–5 (0,080–0,20)	1–2 (0,040–0,080)	0,1 x diametro dell’utensile
Tipi HPASS			
Velocità, m/min (sfm)	40–60 (130–195)	60–80 (195–262)	6–8 (20–25)
Velocità di alimentazione, mm (pollici/dente)	0,2–0,4 (0,008–0,016)	0,1–0,2 (0,004–0,008)	0,10 (0,004)
Profondità di taglio, mm (pollici)	2–5 (0,080–0,20)	1–2 (0,040–0,080)	0,1 x diametro dell’utensile

10.5 Foratura con punte elicoidali in acciaio superrapido

Quando si usano utensili ad alta velocità, è molto importante prevenire il surriscaldamento della punta di taglio. La ridotta conduttività termica degli acciai inossidabili austenitici favorisce il surriscaldamento, che porta ad una foratura più debole, perdita di affilatura, ulteriore surriscaldamento e rottura catastrofica dell'utensile. È essenziale la presenza di refrigerante sulla punta. Per ottenere ciò, sono metodi efficaci mantenere un flusso di refrigerante lungo la punta ed allontanarla di tanto in tanto (ritirare periodicamente la punta per consentire al refrigerante di scorrere nel foro).

Velocità di alimentazione elevate sono necessarie per la foratura degli acciai inossidabili, tuttavia essi richiedono un elevato carico assiale e possono mettere a dura prova la resistenza a imbozzamento della punta. Mantenere un allineamento della punta stabile perpendicolarmente al pezzo aiuta ad evitare vibrazioni ed imbozzamento. Usare punte con lunghezza non superiore al necessario per la lavorazione, per una buona stabilità.



Tornitura di acciai inossidabili usando carburi con rompitruciolo. © Seco Tools



Fresatura a disco con utensili in carburo. © Seco Tools

Linee guida per la foratura elicoidale con punte in acciaio superrapido:

- Usare un angolo superiore di 130° per rompere meglio il truciolo. In angolo superiore minore, ad esempio 109°, crea un foro più liscio ma trucioli più lunghi.
- Usare punte con geometria auto allineante e punte con anima sottile nel caso di forature di grande diametro.
- Sono richiesti raffreddamento e lubrificazione. Usare un'emulsione refrigerante al 10 % con un flusso abbondante verso il punto di foratura. Per punte piene, la punta deve essere ritirata periodicamente ed il foro allagato di refrigerante quando la profondità supera il doppio del diametro. Il passaggio del refrigerante attraverso la punta elimina la necessità di ritirarla periodicamente, se non per il controllo del truciolo.
- Le velocità possono essere aumentate del 10 % per punte rivestite in TiN e del 10-20 % con flusso di refrigerante attraverso la punta.



Fresatura frontale di acciai inossidabili austenitici con utensili ad inserto di carburo. © Seco Tools

Tabella 10a: Linee guida per la foratura con punte elicoidali degli acciai inossidabili austenitici (unità metriche).

Velocità/alimentazione, m/min (mm/giro)			
Diametro della punta (mm)	Austenitico standard	Austenitico ottimizzato	Austenitico altolegato
1–3	6–10 (0,05)	10–12 (0,10)	5–8 (0,04)
5	10–12 (0,10)	12–14 (0,20)	8–10 (0,08)
10	10–12 (0,20)	12–15 (0,30)	8–10 (0,15)
15	10–12 (0,25)	12–15 (0,40)	8–10 (0,20)
20	10–12 (0,30)	12–15 (0,45)	8–10 (0,25)
30	10–12 (0,35)	12–15 (0,55)	8–10 (0,30)
40	10–12 (0,40)	12–15 (0,60)	8–10 (0,35)

Tabella 10b: Linee guida per la foratura con punte elicoidali degli acciai inossidabili austenitici con punte ad alta velocità (unità inglesi).

Velocità/alimentazione, sfm (pollici/giro)			
Diametro della punta (pollici)	Austenitico standard	Austenitico ottimizzato	Austenitico altolegato
0,040–0,120	20–33 (0,002)	33–40 (0,004)	16–26 (0,0015)
0,20	33–40 (0,004)	40–46 (0,008)	26–33 (0,003)
0,40	33–40 (0,008)	40–49 (0,012)	26–33 (0,006)
0,60	33–40 (0,010)	40–49 (0,016)	26–33 (0,008)
0,80	33–40 (0,012)	40–49 (0,018)	26–33 (0,010)
1,20	33–40 (0,014)	40–49 (0,022)	26–33 (0,012)
1,60	33–40 (0,016)	40–49 (0,024)	26–33 (0,014)

11 Trattamenti termici – ricottura e distensione

Gli acciai inossidabili non possono essere induriti con trattamento termico. Il trattamento termico di queste leghe è usato unicamente per eliminare gli effetti dell'incrudimento, ri-dissolvere fasi secondarie non desiderate e ridurre le tensioni residue ad un livello accettabile.

La ricottura di solubilizzazione diminuisce la durezza del materiale dopo le lavorazioni a freddo e dissolve eventuali fasi secondarie precipitate durante le lavorazioni a caldo o la saldatura. L'espressione 'ricottura completa' significa spesso che il materiale omogeneizzato è nel suo stato metallurgico ottimale, con fasi secondarie completamente dissolte. Questo stato fornisce la migliore resistenza alla corrosione e duttilità. Dato che è eseguita ad alta temperatura, la ricottura in aria crea ossidi superficiali che devono essere rimossi con trattamenti di decapaggio e passivazione per ripristinare la resistenza alla corrosione superficiale.

I trattamenti di distensione riducono le tensioni residue che si sviluppano durante la formatura e la saldatura e diminuiscono il rischio di distorsione o di criccabilità da tensocorrosione. La distensione è condotta a temperature inferiori a quelle di ricottura e può non richiedere il decapaggio e la passivazione necessari dopo la ricottura completa.

11.1 Ricottura di solubilizzazione

11.1.1 Preparazione

Grasso, olio, fluido di taglio, lubrificanti per stampaggio, segni di matita ed altri contaminanti devono essere rimossi dalla superficie prima della ricottura. La ricottura può bruciare i contaminanti sulla superficie, rendendoli difficili da rimuovere, se non mediante molatura. Contaminanti contenenti carbonio possono carburare e sensibilizzare la superficie, rendendola

sensibile alla corrosione intergranulare in servizio. Il paragrafo 14 descrive i metodi di pulitura idonei per gli acciai inossidabili.

Contaminazioni superficiali da metalli con bassa temperatura di fusione come piombo, rame e zinco sono molto pericolose. Esse possono penetrare in forma intergranulare e provocare il cosiddetto infragilimento da fase liquida. Tali contaminanti devono essere eliminati dalla superficie prima della ricottura o della saldatura.

11.1.2 Temperatura

La temperatura minima di ricottura è la minima in grado di dissolvere i carburi ed i precipitati intermetallici. La ricottura deve essere eseguita al di sopra di questa temperatura per assicurare la completa dissoluzione dei precipitati e ripristinare la resistenza alla corrosione. Il limite superiore dell'intervallo di temperatura di ricottura è dato dalla velocità

di riscaldamento e dalle dimensioni della sezione e dalla necessità di evitare eccessiva ossidazione, che può risultare difficile da rimuovere. La **Tabella 11** fornisce indicazioni circa le temperature di ricottura per alcuni acciai inossidabili austenitici. Gli HPASS tendono a formare composti intermetallici (chi e sigma) che richiedono temperature più elevate per essere dissolti rispetto ai carburi, per cui essi presentano temperature di ricottura maggiori di altri acciai.

11.1.3 Durata della ricottura

Una permanenza in temperatura pari a due o tre minuti per millimetro di spessore (tre minuti per 0,1 pollici) è sufficiente a dissolvere piccole quantità di carburi ed altre fasi secondarie e a diminuire la durezza di materiali formati a freddo. Nel caso siano presenti grandi quantità di precipitati, in particolare fasi chi e sigma, sono necessarie permanenze più lunghe.

Tabella 11: Temperature minime di ricottura di solubilizzazione per gli acciai inossidabili.

UNS No.	Tipo	Temperatura di ricottura	
		°C	°F
S20101	Tipo 201	1040	1900
S30400/S30403	Tipo 304/304L	1040	1900
S30409	Tipo 304H	1040	1900
S31600/S31603	Tipo 316/316L	1040	1900
S34700	Tipo 347	1040	1900
N08020	Lega 20, 20Cb-3	1150	2100
N08904	904L	1095	2000
N08367	AL-6XN	1105	2025
S31254	254 SMO	1150	2100



Sgrassaggio di un acciaio inossidabile austenitico. © Sandvik

Una ricottura di solubilizzazione troppo lunga o a temperatura eccessiva può causare eccessiva ossidazione, difficoltosa e costosa da rimuovere. Gli HPASS ad alto molibdeno di ossidano rapidamente in forni atmosferici. Il triossido di molibdeno di solito volatilizza e lascia la superficie in forma gassosa. Se la volatilizzazione è inibita, il triossido di molibdeno liquido si può accumulare sulla superficie ed accelerare il processo di ossidazione. Le precauzioni per minimizzare l'ossidazione degli acciai ad alto molibdeno sono:

- Evitare condizioni che inibiscano la volatilizzazione (cariche eccessivamente compattate e forni troppo piccoli).
- Non ricuocere materiali ossidati pesantemente.
- Evitare esposizioni prolungate al di sopra della temperatura minima di ricottura.
- Impiegare la temperatura di ricottura minima possibile.

11.1.4 Atmosfere

L'aria e gas di combustione ossidanti sono atmosfere soddisfacenti per la ricottura degli acciai inossidabili. La ricottura in aria produce ossidi che vanno rimossi per ripristinare la resistenza alla corrosione. Atmosfere protettive come argon, elio, idrogeno, ammoniaca dissociata, miscele idrogeno/azoto ed il vuoto prevengono la formazione di ossidi. La ricottura in atmosfera protetta è svolta di norma in idrogeno o ammoniaca dissociata con temperatura di rugiada di -40°C (-40°F) o inferiore. Se effettuata correttamente, la ricottura in atmosfera protettiva non crea ossidazione, quindi non richiede trattamenti di pulitura successivi.

11.1.5 Raffreddamento

Gli acciai inossidabili austenitici possono richiedere un raffreddamento rapido dopo la ricottura per evitare la precipitazione di carburi di cromo o altre fasi intermetalliche. Tale esigenza e la scelta del mezzo di raffreddamento dipendono dalla sezione e dal tipo.

In molte situazioni, sottili sezioni di tipi 304L e 316L possono essere raffreddate in aria. Se le sezioni, il tenore di carbonio ed il grado di alligazione aumentano, aumenta anche la necessità di raffreddamenti rapidi. Metodi comuni sono il raffreddamento con getti di aria, spruzzi di acqua o tempra in acqua. Durante la ricottura in vuoto, la tempra con gas inerti può raffreddare senza formazione di ossidi.

Se un materiale è soggetto ad ulteriori processi a caldo, dopo la ricottura, ad esempio la saldatura, è meglio raffreddare il più rapidamente possibile, ad esempio con tempra in acqua, dopo la ricottura. Ciò aumenta la possibilità di tollerare gli effetti dannosi di ulteriori cicli termici. La possibilità di deformazioni dovrebbe essere considerata durante la scelta di un mezzo di raffreddamento.

11.1.6 Pulitura dopo ricottura

Il metallo immediatamente al di sotto degli ossidi della ricottura ha un basso tenore di cromo e modesta resistenza alla corrosione, dato che l'ossido è ricco di cromo. Tanto gli ossidi quanto il metallo impoverito di cromo devono essere rimossi per ripristinare la resistenza alla corrosione.

Il metodo di pulitura più comune è la sabbiatura degli ossidi, quindi un decapaggio acido per rimuovere il metallo impoverito di cromo. Il decapaggio per immersione è la tecnica più comune per decapare l'acciaio inossidabile, ma il decapaggio è anche eseguito con spray, gel e paste.

Gli acidi decapanti sono molto pericolosi ed è molto importante rispettare tutte le prescrizioni in materia di sicurezza durante il loro impiego (ventilazione, guanti, occhiali, indumenti protettivi etc.). Dopo il decapaggio, il pezzo deve essere quindi

neutralizzato ed asciugato con cura con abbondante acqua a basso tenore di cloruri. I fluidi utilizzati devono essere raccolti separatamente e smaltiti nel rispetto delle vigenti disposizioni di legge per i rifiuti.

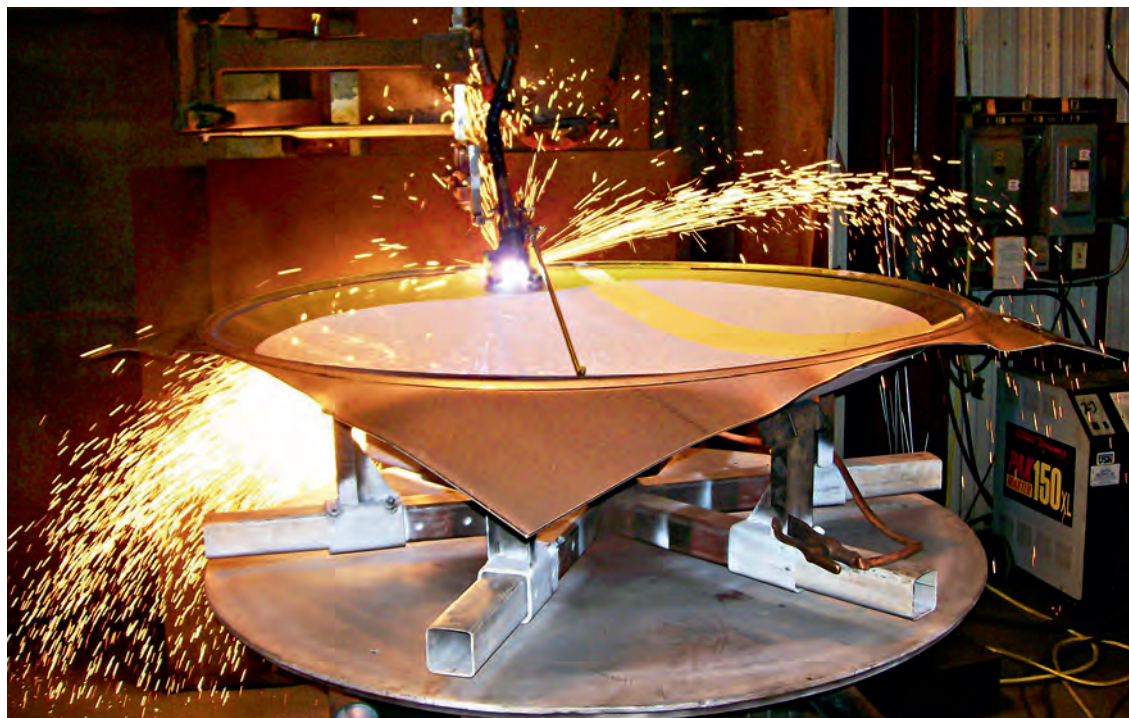
Il paragrafo 14.2 fornisce informazioni dettagliate circa i metodi di pulitura. Si consiglia ai lettori di leggere con attenzione quel paragrafo prima di iniziare qualunque operazione di pulitura.

11.2 Distensione

Le temperature di distensione sono inferiori a quelle di ricottura e non sono abbastanza elevate per dissolvere precipitati o diminuire la durezza. La distensione riduce ma non elimina le tensioni residue. Il processo di distensione è lento, per cui le durate della distensione sono dell'ordine di grandezza di alcune ore, confrontate con i minuti della ricottura. Le temperature di distensione spesso cadono nella parte inferiore dell'intervallo in cui si

verifica precipitazione di fasi secondarie. A quelle temperature, la durata del trattamento deve essere scelta con cura per evitare precipitazioni che possano ridurre la resistenza alla corrosione. Questa limitazione spesso riduce l'efficacia della distensione. Il vantaggio della potenziale distensione deve essere valutato in relazione al rischio di sensibilizzazione, decidendo se scegliere una temperatura di distensione bassa, una intermedia oppure una ricottura completa.

Vi sono numerosi casi in cui manufatti misti, fabbricati con acciai inossidabili ed acciaio al carbonio devono essere trattati, a causa della necessità di distendere l'acciaio al carbonio. In tali casi, i codici o le specifiche per l'acciaio al carbonio guidano il tempo e la temperatura del trattamento. Gli ingegneri devono decidere se il ciclo termico richiesto possa influenzare negativamente l'acciaio inossidabile. In tal caso, può essere necessario ricorrere ad un diverso acciaio inossidabile.



Rifilatura al plasma di un recipiente di acciaio inossidabile prodotto per hydroforming e saldato TIG per applicazioni sanitarie.
© DCI, Inc, St. Cloud, MN USA

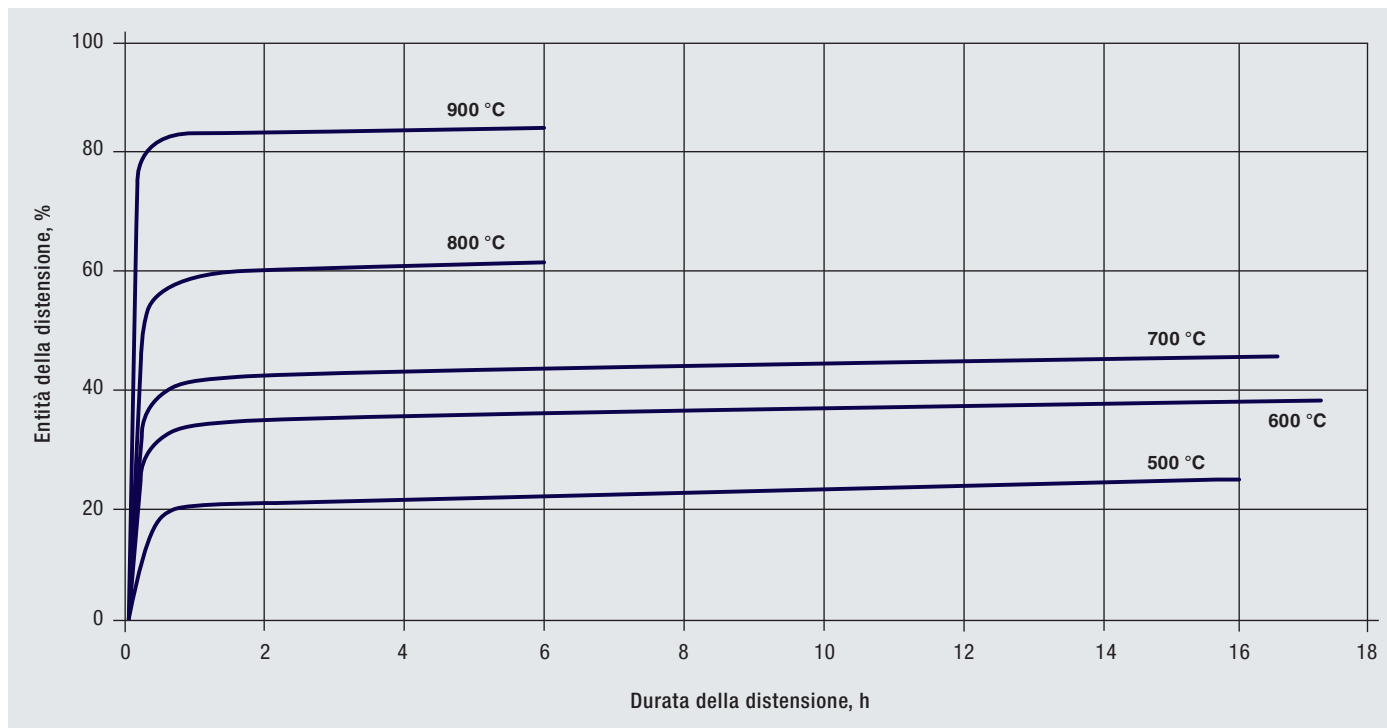


Figura 21: Distensione dell'acciaio inossidabile tipo 347 in funzione della temperatura e del tempo. Il valore delle tensioni residue prima della ricottura era 230 MPa (33 ksi). (10)

Per distensione a bassa temperatura si intende quella condotta nell'intervallo 'sicuro', sino a circa 540 °C (1000 °F). La **Figura 21** mostra che questo trattamento riduce le tensioni sino a circa il 40 % del loro valore iniziale. Il vantaggio principale del trattamento a bassa temperatura è che non vi è rischio di produrre sensibilizzazione. La figura mostra anche che un trattamento a temperatura intermedia consente una distensione maggiore, ma tali temperature si trovano nell'intervallo tra 540 e 900 °C (da 1000 a 1650 °F). In questo caso, la durata della permanenza deve essere ridotta drasticamente. Per fortuna, la maggior parte della distensione si verifica entro la prima mezz'ora in cui si è raggiunta la temperatura in questo intervallo.

Quando si impiegano temperature intermedie per la distensione, l'effetto cumulativo di tutti i cicli termici deve essere considerato. Il ciclo di distensione include il riscaldamento, la durata della

permanenza ed il raffreddamento. La zona termicamente alterata (ZTA) di giunti saldati a passata multipla può essere rimasta già un tempo significativo in temperatura prima della distensione. L'aggiunta di una ulteriore permanenza nell'intervallo di temperatura critico TTS durante la distensione può provocare la precipitazione indesiderata di fasi secondarie che possono peggiorare la resistenza alla corrosione e le proprietà meccaniche in ZTA. Molti degli HPASS ad alto cromo o molibdeno formano fasi intermetalliche in tempi relativamente brevi, per cui sono candidati solo per trattamenti di distensione a bassa temperatura.

La scelta delle modalità di raffreddamento dei pezzi dopo la distensione merita un'attenta considerazione. Una velocità di raffreddamento elevata, ad esempio un raffreddamento in acqua, può reintrodurre tensioni dovute ai gradienti di temperatura. Può essere molto difficile raffreddare

componenti grandi e complessi, con sezioni variabili, senza introdurre nuove tensioni. Per trattamenti nell'intervallo TTS, un raffreddamento con aria ventilata sino alla temperatura inferiore dell'intervallo seguito da ulteriore raffreddamento in aria è un'opzione interessante. Un raffreddamento in aria è in genere soddisfacente nel caso di trattamenti di distensione a bassa temperatura.

La preparazione della superficie dell'acciaio inossidabile prima della distensione è identica rispetto alla solubilizzazione e consiste in una pulitura scrupolosa per rimuovere le contaminazioni. I trattamenti di distensione a bassa temperatura non producono i medesimi ossidi grossolani di quelli di ricottura, ma possono causare ossidazione superficiale. Se la superficie appare dorata o bluastra dopo il trattamento, allora deve essere decapata per ottenere la massima resistenza alla corrosione.

12 Saldatura, brasatura forte e dolce

Saldatura, brasatura forte e dolce sono impiegate diffusamente sugli acciai inossidabili. È più complessa la giunzione degli acciai inossidabili rispetto agli acciai al carbonio in quanto occorre mantenere sia le proprietà di resistenza alla corrosione del materiale base che quelle meccaniche. Le differenze tra le proprietà del giunto e del materiale base possono essere minimizzate con un'adeguata preparazione del giunto, tecnica di giunzione e pulitura finale. Questo paragrafo presenta una guida di tipo generale per la saldatura e la giunzione degli acciai inossidabili. Gli HPASS richiedono tecniche leggermente diverse rispetto agli acciai inossidabili austenitici standard.

12.1 Saldatura

12.1.1 Influenza delle proprietà fisiche sulla saldatura

Dilatazione termica, resistività elettrica e conduttività termica sono importanti proprietà fisiche che influenzano la saldabilità. La **Tabella 12** riassume alcuni di questi parametri per l'acciaio al carbonio e per acciai inossidabili standard. Si noti che le proprietà fisiche degli acciai

inossidabili hanno valori molto diversi rispetto agli acciai al carbonio.

Un CTE maggiore aumenta la tendenza degli acciai inossidabili austenitici a deformarsi. La puntatura deve quindi essere eseguita con minore distanza tra punti rispetto agli acciai al carbonio per controllare le deformazioni.

La maggiore resistività elettrica riduce l'intensità di corrente necessaria per produrre lo stesso apporto termico negli acciai inossidabili austenitici. Per cui, considerando la minore temperatura di fusione, è necessaria una minore intensità di corrente per saldare gli acciai inossidabili austenitici.

La ridotta conduttività termica concentra il calore vicino alla saldatura negli acciai inossidabili austenitici, creando un maggiore gradiente di temperatura ed una maggiore tendenza alle tensioni di ritiro ed alla deformazione, rispetto agli acciai al carbonio. Uno smaltimento del calore lento, a causa della bassa conduttività termica, mantiene zona fusa e zona termicamente alterata più a lungo ad alta temperatura, dando più tempo per i

fenomeni di precipitazione di carburi e di fasi intermetalliche.

12.1.2 Preparazione dei lembi

- Scelta del giunto ed assiemaggio: Il bagno di fusione degli inossidabili è meno fluido rispetto agli acciai al carbonio, quindi la penetrazione è inferiore, a parità di parametri di saldatura. Per compensare, le giunzioni degli acciai inossidabili hanno un maggiore angolo di apertura, una spalla minore ed una luce maggiore rispetto agli acciai al carbonio. Ricordare queste considerazioni durante la definizione della preparazione dei lembi aiuta a prevenire gli sfondamenti ed aiuta ad ottenere giunti a piena penetrazione. Una valida raccolta di esempi di preparazione è fornita dalla pubblicazione del Nickel Institute No. 11007. (3)
- Preparazione dei lembi: Una preparazione scrupolosa è importante per la corretta saldatura degli acciai inossidabili austenitici. Lembi rettilinei, puliti e privi di bave consentono un allineamento più semplice, favoriscono la stabilità dell'arco e creano giunti con

Tabella 12: Proprietà fisiche degli acciai inossidabili austenitici e dell'acciaio al carbonio.

Proprietà fisica	Acciaio al carbonio	Acciaio inossidabile austenitico 19 Cr-9 Ni	Commento
Coefficiente di dilatazione termica lineare	11,7 6,5	17,6 9,8	20–628 °C (20–500 °C per inossidabili) : $[x 10^{-6}/K]$ 68–1162 °F (68–932 °F per inossidabili) : $[x 10^{-6}/^{\circ}F]$
Rapporto tra le conduttività termiche	100 100	28 66	Percentuale rispetto all'acciaio al carbonio a 100 °C (212 °F) Percentuale rispetto all'acciaio al carbonio a 650 °C (1200 °F)
Resistività elettrica	0,125 1,25	0,72 1,26	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a 20 °C (68 °F) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a 885 °C (1625 °F)
Temperatura di fusione indicativa	1540 2800	1425 2600	°C °F

penetrazioni ottimali. Una corretta preparazione dei lembi aiuta il saldatore a realizzare giunti adeguati. La lavorazione di macchina dei lembi è l'ottimale, ma la stessa molatura è una preparazione accettabile, a condizione di rimuovere le bave metalliche e di ottenere una luce uniforme.

12.1.2.1 Pulitura dei lembi

- Ossidi: Gli acciai inossidabili creano ossidi ad alta temperatura di fusione durante il taglio plasma o laser. Se tali ossidi non sono rimossi dai lembi prima della saldatura, possono essere inglobati in zona fusa, creando concentrazioni locali di tensioni e siti di innesco per la corrosione. Tutti gli ossidi devono essere rimossi con lavorazioni di macchina o molatura di finitura per saldare su materiali base completamente puliti. La spazzolatura, per quanto effettuata con spazzole con fili di acciaio inossidabile, non rimuove sempre ossidi molto aderenti.
- Contaminazione organica: La contaminazione organica può causare cricche in zona fusa o porosità, se non rimossa. Il carbonio proveniente dalle contaminazioni organiche può andare in soluzione nell'acciaio inossidabile e creare sensibilizzazione, contaminanti organici come oli, fluidi di taglio o segni di matita devono essere rimossi con opportuni solventi.
- Contaminazione da metalli: rame, piombo e zinco portati in diluizione in zona fusa possono penetrare il bordo del grano ed infragilire l'acciaio inossidabile. La contaminazione con questi metalli è tipica del contatto con utensili o piatti di sostegno al rovescio, oppure di contatti dovuti allo stoccaggio o alla movimentazione. Questi metalli devono essere rimossi prima della saldatura. Molatura e decapaggio sono i metodi più efficaci per rimuovere le contaminazioni da metalli.

Tabella 13: Spaziatura della puntatura raccomandata in funzione dello spessore. (11)

Spessore della lamiera		Spaziatura della puntatura	
mm	pollici	mm	pollici
1–1,5	0,04–0,06	30–60	1,2–2,4
2–3	0,08–0,12	70–120	2,8–4,7
4–6	0,16–0,24	120–160	4,7–6,3
Maggiore di 6	Maggiore di 0,24	150–200	5,9–7,9

12.1.2.2 Assiemaggio, puntatura e bloccaggio

Un corretto assiemaggio prima della saldatura è essenziale per gli acciai HPASS completamente austenitici, che richiedono un apporto termico ridotto, per evitare criccabilità a caldo. Il saldatore non deve oscillare per recuperare una luce tra i lembi eccessiva o irregolare. Un buon assiemaggio consente una luce ed un allineamento uniformi lungo la saldatura. Ciò è possibile con una preparazione dei lembi precisa e con il bloccaggio oppure la puntatura della saldatura.

La **Tabella 13** indica la corretta spaziatura dei tratti di puntatura per gli acciai inossidabili austenitici e la **Figura 22** illustra la corretta sequenza per una saldatura rettilinea. La puntatura per tubi che vada incorporata nella saldatura finale non dovrebbe essere eseguita in giunti a piena penetrazione e deve essere priva di ossidi. È molto importante che i tratti di saldatura per spessori elevati non generino difettosità nella saldatura finale. Tratti di puntatura molto convessi oppure con estremità poco raccordate dovrebbero essere ripresi di mola. I saldatori dovrebbero evitare colpi d'arco o lo spegnimento dell'arco in tratti di puntatura.

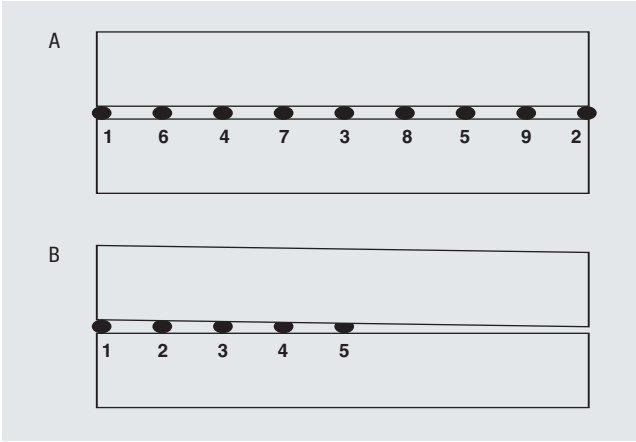


Figura 22: Corretta sequenza di puntatura per evitare la chiusura a forbice della luce in saldatura. A: Corretta, B: Scorretta. (3)

12.1.3 Materiali d'apporto

La **Tabella 14** elenca i materiali d'apporto comunemente usati per la saldatura degli acciai inossidabili austenitici. La Tabella dovrebbe essere usata solo come guida, poiché sono spesso disponibili consumabili alternativi a quelli indicati.

Per acciai più legati rispetto ai tipi al 6 % di Mo, è particolarmente importante consultare i certificati forniti dal fabbricante per

verificare che il consumabile sia indicato tanto per la resistenza alla corrosione che per le proprietà meccaniche.

12.1.4 Difetti di saldatura

12.1.4.1 Microcricche, cricche a caldo

Le microcricche sono cricche sottili e corte che si possono verificare negli acciai inossidabili austenitici. Esse si propagano e raramente causano cedimenti strutturali, ma in alcuni ambienti possono innescare

corrosione per vaiolatura. La criccabilità a caldo, più correttamente criccabilità da solidificazione, a sua volta, è un serio difetto di saldatura che va evitato.

La composizione dei più utilizzati consumabili, i tipi 308(L) e 316(L), è ottimizzata per ottenere tenori di ferrite tra il 5 ed il 10 per cento, il che aumenta notevolmente la resistenza alla microcriccabilità ed alla criccabilità a caldo. La ferrite assorbe le tensioni residue e consente un'elevata

Tabella 14: Consumabili consigliati per la saldatura di alcuni acciai inossidabili comuni.

Materiale base	Designazione	Elettrodo rivestito (AWS)	Filo elettrodo e bacchetta (AWS)
Tipo	UNS No.	A5.4 (inossidabili) A5.11 (leghe di nichel)	A5.9 (inossidabili) A5.14 (leghe di nichel)
304	S30400	E 308/E 308L(1)	ER 308/ER 308L(1)
304L	S30403	E 308L	ER 308L
309S	S30908	E 309/E 309L(1)	ER 309/ER 309L(1)
310S	S31008	E 310	ER 310
316L	S31603	E 316L	ER 316L
317L	S31703	E 317L	ER 317L
317LM	S31725	Vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo	Vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo
317LMN	S31726	Vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo	Vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo
904L	N08904	E 385 oppure vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo	ER 385 oppure vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo
Lega 20, 20Cb-3 (2)	N08020	E 320 oppure E 320L	ER 320 oppure ER 320L
Lega 825	N08825	Vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo	Vedere consumabili per acciai inossidabili al 6 % Mo
Lega 28	N08028	E 383	ER 383
Acciai inossidabili al 6 % Mo			
254 SMO (2,3)	S31254	E NiCrMo-3, E NiCrMo-4, E NiCrMo-10, E NiCrMo-12, E NiCrMo-13, E NiCrMo-14.	ER NiCrMo-3, ER NiCrMo-4, ER NiCrMo-10, ER NiCrMo-13, ER NiCrMo-14.
AL-6XN (2,3)	N08367		
25-6MO, 1925 hMo (2,3)	N08926		
20Mo-6 (2,3)	N08026		
254N (2,3)	S32053		

Tabella 14 (continuazione): Consumabili consigliati per la saldatura di alcuni acciai inossidabili comuni.

Fusioni	Designazione	Elettrodo rivestito (AWS)	Filo elettrodo e bacchetta (AWS)
Tipo ACI	UNS No.	A5.4 (inossidabili) A5.11 (leghe di nichel)	A5.9 (inossidabili) A5.14 (leghe di nichel)
CF-8	J92600	E 308(1)	ER 308(1)
CF-3	J92500	E 308L	ER 308L
CF-8M	J92900	E 316(1)	ER 316(1)
CF-3M	J92800	E 316L	ER 316L
CN-7M	J95150	E 320 or E 320L	ER 320 or ER 320L
CK-3MCuN (3)	J93254	E NiCrMo-3, E NiCrMo-4, E NiCrMo-10, E NiCrMo-12, E NiCrMo-13, E NiCrMo-14.	ER NiCrMo-3, ER NiCrMo-4, ER NiCrMo-10, ER NiCrMo-13, ER NiCrMo-14.
CN3MN (3)	J94651		

Note:

- (1) I tipi "L" (low carbon) oppure i tipi stabilizzati sono spesso usati per la lavorazione mediante saldatura, tranne pochi casi in cui la resistenza meccanica leggermente superiore dei tipi standard è più importante di una migliore resistenza alla corrosione ottimale.
(2) Nome commerciale.
(3) Qualunque consumabile che contenga almeno il 9 % di Mo risulta adatto.

solubilità dello zolfo, del fosforo e di altre impurezze che infragiliscono l'austenite. Microcricche e cricche a caldo non si verificano di norma nei giunti di tipi standard contenenti il richiesto tenore di ferrite, ma possono verificarsi in caso di apporti termici molto elevati, forti condizioni di vincolo o profili del giunto concavi. L'American Welding Society (AWS A5.4) definisce il Ferrite Number per esprimere il tenore di ferrite in una saldatura. L'FN corrisponde indicativamente alla frazione percentuale di ferrite presente nell'acciaio inossidabile austenitico. La **Figura 23** indica la zona fusa di due giunti con diversi tenori di ferrite delta.

I consumabili concepiti per la saldatura degli HPASS non generano zone fuse contenenti ferrite, per cui la saldatura di questi tipi è più sensibile alla microcriccabilità ed alla criccabilità a caldo. I consumabili per HPASS contengono quantità molto basse di fosforo e zolfo per minimizzare questi problemi. Un attento controllo dell'apporto termico e di altri

parametri di saldatura è inoltre necessario per ottenere buoni risultati nella saldatura degli HPASS. Un limite comune per l'apporto termico è 1,5 KJ/mm.

Ogni variazione che incrementi la dimensione del bagno di fusione (es.: eccessiva oscillazione) dovrebbe essere evitata nella saldatura degli acciai inossidabili austenitici. Un bagno di fusione abbondante genera tensioni di ritiro maggiori. Un bagno di fusione abbondante può inoltre creare

ingrossamento del grano in zona fusa ed in ZTA. Un materiale a grano ingrossato ha un minore sviluppo di bordi grano rispetto ad uno a grano fine.

Ciò porta ad una maggiore concentrazione di impurezze a bordo grano ed ad una possibile riduzione della resistenza alla corrosione. Eccessive tensioni di ritiro ed eccessive concentrazioni di impurezze a bordo grano favoriscono la criccabilità a caldo.

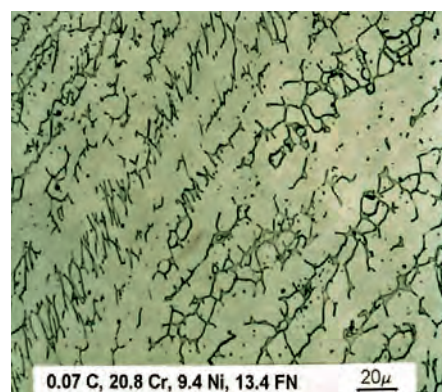
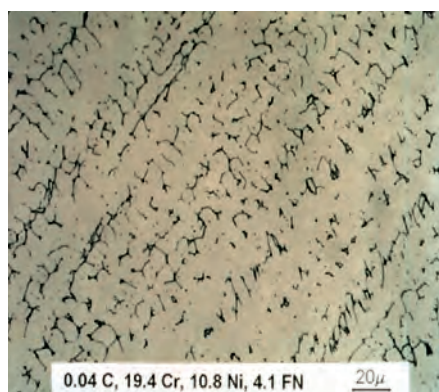


Figura 23: Acciaio inossidabile austenitico, metallo d'apporto con differenti contenuti di ferrite.
© Lincoln Electric

12.1.4.2 Sensibilizzazione

I tipi standard ad elevato tenore di carbonio possono essere sensibilizzati da permanenze relativamente brevi a temperature tra 480 e 900 °C (900 e 1650 °F) (vedere Figura 4), con possibile sensibilità alla corrosione intergranulare in ambienti acquosi o acidi (vedere paragrafo 6). Tuttavia, i moderni tipi standard sono spesso 'tipi L' e resistono alla sensibilizzazione durante le normali saldature di lavorazione, a condizione che non vi sia un successivo trattamento termico. Ad esempio, è necessaria circa un'ora per sensibilizzare un acciaio inossidabile tipo 304 con circa 0,042 % di carbonio alla temperatura di sensibilizzazione più rapida (vedere Figura 4). Ciò è molto lontano dal tempo di permanenza a tale temperatura in saldatura. Tuttavia, la permanenza nell'intervallo critico di temperature durante la saldatura dovrebbe essere limitata, per spessori rilevanti.

L'impiego di tipi low carbon aiuta ad evitare la sensibilizzazione di forti spessori saldati e componenti soggetti a trattamenti termici dopo saldatura. Il tipo 304L tollera una permanenza prolungata in temperatura, che consente un raffreddamento sicuro anche per spessori rilevanti (vedere Figura 4). La stessa distensione di giunti eterogenei nella costruzione con acciaio inossidabile ed acciaio al carbonio diviene possibile, con l'impiego di tipi L.

I tipi per alta temperatura contengono spesso un carbonio minimo pari a 0,04 % (tipo 304H) con migliore resistenza ad alta temperatura. Per fortuna, la corrosione in soluzioni acquose dovuta alla sensibilizzazione non è in genere un problema, per applicazioni ad elevata temperatura. Questi tipi richiedono in genere un consumabile ad alto carbonio per fornire adeguata resistenza ad elevata temperatura.

I tipi stabilizzati 321 e 347 possono soffrire di corrosione a lama di coltello, se esposti a temperature tra 480 e 900 °C

(da 900 e 1650 °F) in saldatura. Se la corrosione a lama di coltello è un problema, una ricottura di solubilizzazione dopo saldatura seguita da un trattamento di stabilizzazione dovrebbe essere prescritta. Vedere il punto 6.3.2 per l'analisi del meccanismo della corrosione a lama di coltello.

Molti degli HPASS hanno un tenore di carbonio anche inferiore ai tipi L standard, dato che essi si sensibilizzerebbero più rapidamente dei tipi standard, a parità di tenore di carbonio. Tuttavia, la formazione di fasi secondarie è in genere lontana da costituire un problema per gli HPASS rispetto alla sensibilizzazione dovuta all'apporto termico di saldatura.

12.1.4.3 Fasi secondarie

Le fasi sigma e chi si formano nell'intervallo di temperature tra 500 e 1050 °C (da 930 a 1925 °F). Gli acciai inossidabili contenenti fasi sigma e chi hanno in sostanza minore resistenza alla corrosione e tenacità. Il 5 % di fase sigma può dimezzare la tenacità.

L'entità della formazione di fasi secondarie dipende dalla presenza di ferrite, dall'analisi chimica dell'acciaio e da condizioni termiche sfavorevoli. Gli acciai contenenti ferrite sono più sensibili, in quanto le fasi secondarie si formano più velocemente nella ferrite. Il cromo ed il molibdeno promuovono fortemente la formazione di fasi secondarie. I tipi standard in genere contengono una certa quantità di ferrite. Tuttavia, la formazione di fase sigma non si verifica in questi tipi per permanenze in temperatura inferiori a 100 ore circa, per cui in questi acciai la formazione di fasi secondarie è un problema delle condizioni di servizio, non di lavorazione. Può essere necessario impiegare consumabili completamente austenitici, quando è possibile che si formi fase sigma in servizio.

Le fasi sigma e chi possono formarsi negli HPASS in meno di un minuto, nell'intervallo di temperature critico. Di

conseguenza, i parametri di saldatura per questi acciai devono prevedere un ridotto apporto termico (inferiore a 1,5 kJ/mm [38 kJ/in]) ed una temperatura di interpass non superiore a 100 °C (212 °F) per minimizzare la permanenza nell'intervallo di temperature critico. La temperatura di interpass dovrebbe essere misurata in zona fusa, con una termocoppia elettronica per accuratezza. Non impiegare matite termo colore, che possono contaminare la saldatura.

12.1.4.4 Segregazioni in zona fusa

Le microsegregazioni di molibdeno in zona fusa, negli HPASS, sono significative nei giunti saldati ad alto molibdeno. La micro segregazione si verifica in saldatura, in quanto il primo metallo che solidifica contiene meno molibdeno del successivo, formando microgradienti nel tenore di molibdeno, nell'acciaio al 6 % di Mo, le zone a basso molibdeno possono contenere meno del 4 % di Mo, formando un'area con resistenza alla corrosione significativamente inferiore.

Gli HPASS, tuttavia, richiedono una saldatura con consumabili più legati, per compensare la microsegregazione. Il consumabile consigliato base nichel per acciai inossidabili al 6 % di Mo contiene almeno il 9 % di Mo, il che garantisce almeno il 6 % di Mo nelle aree che solidificano per prime, mantenendo una buona resistenza alla corrosione.

Componenti di acciaio inossidabile austenitico ad elevate prestazioni che non possano essere ricotti dopo saldatura non dovrebbero essere saldati con saldatura autogena (senza consumabile), per via dei problemi di micro segregazione. Saldature autogene sono accettabili solo se il componente saldato è successivamente ricotto, per omogeneizzare la saldatura e ridurre la micro segregazione, il che ne ripristina la resistenza alla corrosione.

12.1.5 Processi di saldatura

12.1.5.1 Protezione gassosa

Gli acciai inossidabili dovrebbero essere protetti, durante la saldatura, per evitare l'ossidazione della zona fusa e della zona termicamente alterata. L'ossidazione durante la saldatura può ridurre tanto la resistenza alla corrosione che le proprietà meccaniche. Un modo per proteggere l'acciaio è impiegare un gas inerte per proteggere la zona fusa e la ZTA durante la saldatura. Il gas di protezione aiuta inoltre a stabilizzare l'arco e può influenzare la penetrazione ed il profilo della passata. La **Tabella 15** elenca i gas di protezione per diversi processi di saldatura.

Il rovescio del giunto dovrebbe a sua volta essere protetto per massimizzare la resistenza alla corrosione dopo saldatura. Argon, azoto e la miscela 90 % N + 10 % H₂ sono utilizzati per la protezione al rovescio. L'azoto si discioglie nel bagno di fusione, aumentando il tenore di azoto in zona fusa. L'azoto aumenta la resistenza meccanica del giunto, senza peggiorarne la resistenza alla corrosione.

Un sostegno al rovescio in rame è spesso usato, saldando lamiere di piccolo spessore. Il sostegno al rovescio raffredda la saldatura, previene lo sfondamento ed aiuta il gas di protezione a proteggere il rovescio del giunto. È importante evitare

lo sfregamento dell'acciaio inossidabile contro il rame, che può contaminare la superficie dell'acciaio e provocare criccabilità per infragilimento da metallo liquido, una volta fuso.

12.1.5.2 Saldatura ad elettrodo infusibile (GTAW, detta anche TIG)

La saldatura ad elettrodo infusibile è usata in primo luogo per saldare lamiere e tubi di piccolo spessore e per la prima passata dei giunti tra tubi. È relativamente lenta, ma produce un giunto pulito, di alta qualità, privo di scoria e spruzzi. Può essere impiegata in tutte le posizioni.

Tabella 15: Gas di protezione per vari processi di saldatura. (11)

Processo	Gasi di protezione	Vantaggio/Svantaggio
TIG manuale	99.95 % Ar	Buona penetrazione, bassa portata di gas, basso rischio di sfondamento, produce giunti di alta qualità, costoso
	99.9 % Ar	Come sopra
TIG automatizzato	He	Alto apporto termico, penetrazione più profonda
	Ar + He	Migliore profilo del giunto e bagnabilità
	Ar + H	Migliore penetrazione e velocità di saldatura
	Ar + He + H	Migliore penetrazione e velocità di saldatura
	Ar + N ₂	Limita la perdita di azoto nei tipi legati all'azoto, migliora la resistenza alla corrosione/ può deteriorare l'elettrodo di tungsteno
MAG spray arc	99.95 % Ar	Per acciai inossidabili al 6 % molibdeno
	Ar + 1–2 % O ₂	Migliore stabilità dell'arco, bagnabilità a confronto con Ar puro
	Ar + 2 % O ₂	Migliore saldabilità per saldatura in posizione
GMAW short arc and pulsed arc	99.95 % Ar	Per acciai inossidabili al 6 % molibdeno
	Ar + 7.5 % He + 2.5 % CO ₂	Preferito in Europa
	Ar + 30 % He + 1 % O ₂	Per acciai inossidabili 904L e 6 % Mo
	He + 7.5 % Ar + 2.5 % CO ₂	Preferito in Nord America
	He + 30 % Ar	Per 904L
Filo animato	Ar + 20–25 % CO ₂	Preferito per saldatura in posizione frontale
	100 % CO ₂	Preferito per saldatura in posizione verticale

Tabella 16: Parametri di saldatura tipici del TIG (11)

Diametro dell'elettrodo di tungsteno		Intensità di corrente	Tensione	Spessori di parete tipici	
mm	pollici	A	V	mm	pollici
1,6	0,063	50–120	10–12	<1	<0,040
2,4	0,095	100–230	16–18	1,0–3,0	0,040–0,120
3,2	0,12	100–200	15–18	>2,0	>0,80

Il TIG impiega un elettrodo di tungsteno refrattario per generare un arco elettrico che fonde il materiale base. Il processo può essere impiegato in modo autogeno (senza consumabile) oppure con consumabili pieni, alimentati manualmente come bacchette o automaticamente, da bobine. Un gas inerte, introdotto mediante una torcia, protegge il bagno di fusione e l'elettrodo di tungsteno. Il TIG autogeno può essere impiegato per la saldatura di lamiere di acciaio inossidabile di piccolo spessore oppure per realizzare la prima passata in altre saldature. La saldatura autogena non dovrebbe essere usata con acciai inossidabili ad elevate prestazioni, a meno di non eseguire un trattamento di solubilizzazione dopo saldatura, a causa della possibile perdita di resistenza alla corrosione, dovuta alla microsegregazione di molibdeno.

Il TIG è applicato di norma con generatori a corrente costante e dispositivi di innesco dell'arco ad alta frequenza. La saldatura dovrebbe essere eseguita in corrente continua, polarità diretta (CCPD), con elettrodo al negativo, poiché la polarità inversa (CCPI) causa deterioramento dell'elettrodo.

Un elettrodo comunemente impiegato è l'elettrodo di tungsteno toriato al 2 % (classificazione AWS A5.12 EWTh-2; EN ISO 6848). Il controllo dell'arco è favorito dalla molatura dell'elettrodo che conferisce conicità alla punta con un angolo al vertice di circa 20 gradi per materiali sottili e 65 per materiali più spessi, con una punta piccola ed arrotondata. Il 'giusto' elettrodo e preparazione dipendono dalla preferenza dell'operatore. Per

TIG automatico, alcune prove in condizioni di produzione possono determinare la geometria ideale per raggiungere la penetrazione richiesta.

Un gas lens o un apposito beccuccio migliorano la protezione gassosa, prevenendo la turbolenza e minimizzano l'aspirazione di aria nel gas di protezione. Il flusso di gas dovrebbe iniziare alcuni secondi prima dell'accensione dell'arco e mantenuto alcuni secondi dopo il suo spegnimento per evitare la contaminazione con l'ossigeno. La **Tabella 16** riassume i parametri tipici per il TIG.

12.1.5.3 Saldatura a filo continuo con protezione gassosa (GMAW, detta anche MIG)

Il processo a filo continuo con protezione gassosa consente il deposito rapido di grandi quantità di metallo d'apporto. Esso consente una maggiore velocità di saldatura e costi inferiori rispetto al TIG oppure all'elettrodo rivestito (SMAW).

Nel GMAW, il filo consumabile è anche l'elettrodo ed è alimentato automaticamente da una bobina attraverso la torcia. Il processo è in genere semiautomatico, qualora il saldatore controlli manualmente la torcia, ma può essere automatizzato per geometrie semplici. Il gas di protezione scorre nella torcia e protegge il bagno di fusione.

Il GMAW richiede attrezzature specifiche, compreso un generatore a tensione costante, a pendenza ed induttanza variabili oppure capacità di operare in arco pulsato. Il GMAW dovrebbe essere impiegato con corrente continua, polarità

inversa (CCPI), elettrodo positivo. Vi sono tre modalità di trasferimento per il GMAW:

- **Trasferimento per corto circuito:** questa modalità richiede controlli della pendenza e dell'induttanza separati, ed è utile per materiali di spessore sino a circa 3 mm (1/8 pollice). Il trasferimento del metallo dall'elettrodo fusibile avviene per ripetuti cortocircuiti, con un tasso di deposito conseguente relativamente basso. Tale modalità fornisce il minore apporto termico ed è particolarmente utile per piccoli spessori, in cui sussiste il rischio di distorsioni. Può essere utilizzata per la saldatura in posizione.
- **Trasferimento pulsato:** questa modalità richiede un generatore specifico che genera impulsi di corrente e di tensione. Tale combinazione ha il vantaggio di consentire maggiori tassi di deposito di metallo rispetto al trasferimento per corto circuito, sebbene con apporti termici ridotti. Può essere impiegato anche per saldatura in posizione.
- **Trasferimento spray:** Questa modalità consente un elevato tasso di deposito con un arco stabile, ma presenta un apporto termico elevato. Il metallo è trasferito nella forma di un flusso fine di goccioline. Questa modalità è limitata alla posizione di saldatura piana ed è impiegata per lamiere di spessore maggiore o eguale a 3 mm (0,120 pollici). Essa risulta economica per l'esecuzione di passate lunghe, rettilinee in giunti saldati di medie o elevate dimensioni.

Il MIG/MAG, come ogni processo di saldatura con protezione gassosa, può non essere adatto per la saldatura all'aperto o in campo, o per saldatura in cui vi possano essere flussi d'aria che disturbano il gas protettivo contaminando il giunto saldato con ossigeno. La **Tabella 17** elenca i parametri di saldatura tipici per diverse modalità di trasferimento per protezione gassosa con argon puro. Questi parametri possono variare in caso di miscele con gas differenti, per cui è meglio consultare il fornitore del gas per avere i parametri per una specifica miscela.

12.1.5.4. Saldatura con filo animato (FCAW)

Il processo con filo animato consente tassi di deposito ancora maggiori rispetto al MIG/MAG. Esso è indicato per un'ampia gamma di spessori e può essere impiegato per la saldatura in posizione.

Nel FCAW, il filo riempito di flusso è alimentato automaticamente attraverso la torcia, con le medesime attrezzature usate per il MIG/MAG. Il flusso interno al filo crea una scoria che protegge il giunto dall'atmosfera. Tale scoria aiuta il gas di protezione alimentato dalla torcia a proteggere la ZTA. Nel caso di fili elettrodi

FCAW autoprotetti, il flusso genera inoltre un gas protettivo, per quanto questo tipo non è mai impiegato per applicazioni che richiedano resistenza alla corrosione. Come per il MIG/MAG, il processo può essere semiautomatico o automatico. I fili animati per acciai inossidabili sono trattati da AWS A5.22. pochissimi fili animati sono disponibili per gli HPASS. I due gas principali usati per la saldatura con filo animato degli inossidabili sono argon con 15–25 % di anidride carbonica, che fornisce la migliore saldabilità, oppure 100 % di anidride carbonica, che consente la migliore penetrazione. Le portate sono tipicamente 20–25 litri/min. (0,7–0,9 cfm). I parametri di saldatura tipici per il processo a filo animato sono forniti dalla **Tabella 18**.

Tabella 17: Parametri di saldatura tipici per il MIG/MAG in funzione del diametro del filo e del processo di saldatura. (11)

Processo	Diametro del filo		Corrente	Tensione
	mm	pollici	A	V
GMAW short arc	0,8	0,031	90–120	19–22
	1,0	0,039	110–140	19–22
GMAW spray arc	0,8	0,031	150–170	24–27
	1,0	0,039	170–200	25–28
	1,2	0,045	200–270	26–29
	1,6	0,063	250–330	27–30
GMAW arco pulsato	1,2	0,047	75–300	24–30

Tabella 18: Parametri di saldatura tipici per il processo a filo animato. (11)

Processo	Diametro del filo		Corrente	Tensione
	mm	pollici	A	V
FCAW frontale	0,9	0,035	80–160	22–28
	1,2	0,047	150–280	24–32
	1,6	0,063	200–320	26–34
FCAW verticale ascendente	0,9	0,035	80–130	22–26
	1,2	0,047	140–170	23–28
FCAW sopratesta	0,9	0,035	80–150	22–27
	1,2	0,047	150–200	24–29

12.1.5.5 Saldatura ad elettrodo rivestito (SMAW, detta anche stick welding)

Lo SMAW impiega bacchette rettilinee di filo metallico rivestite con flussi, che operano come elettrodi consumabili. Il flusso protegge la saldatura dall'ossigeno e la scoria che si forma assorbe i contaminanti. Questo processo è spesso usato per riparazione di attrezzature in servizio e per giunti in cui risulta difficile pulire l'area circostante. È utile per la saldatura in campo perché non richiede gas di protezione o di lavaggio. Un processo con flusso è meno sensibile alle contaminazioni atmosferiche dovute a correnti, così l'elettrodo rivestito è un buon processo per la saldatura in opera. Lo SMAW richiede generatori a corrente costante ed è di norma applicato con CCPI, con elettrodo al positivo.

Lo SMAW è un processo versatile; può saldare geometrie complesse, in posti complessi. Non risulta economico per giunti rettilinei, che si possano candidare per processi automatici o ad alta efficienza.

Il rivestimento dell'elettrodo, che contiene sostanze che generano gas, è basato su un flusso scorificante. La composizione chimica del flusso influenza la stabilità dell'arco, il profilo del bagno e la purezza della saldatura. La chimica del

flusso determina anche l'applicabilità del processo in posizione, gli elettrodi sono disponibili in una varietà di tipologie concepite per specifiche posizioni, compresa la saldatura in posizione, in verticale discendente ed altre ancora.

Il rivestimento può anche portare elementi di lega in zona fusa. In questo caso, il filo pieno può essere un acciaio inossidabile standard. Il rivestimento dell'elettrodo non deve mai essere eliminato per usarlo come filo metallico, dato che l'anima può essere priva di elementi essenziali, incorporati nel rivestimento. La scoria deve essere rimossa completamente prima della passata successiva e prima che il componente fabbricato sia posto in servizio.

Gli elettrodi sono venduti in confezioni stagne e, una volta aperti, devono essere conservati in un luogo secco, a bassa umidità. Se esposti all'umidità per un certo

tempo, devono essere essiccati in un forno a 250–280 °C (480–535 °F) prima dell'uso, in modo da eliminare l'umidità che può generare porosità. I parametri di saldatura raccomandati possono cambiare da produttore a produttore e con la lega. La **Tabella 19** fornisce indicazioni di carattere generale, ma è meglio impiegare la tensione e la corrente suggerite dalla confezione dell'elettrodo. Per molti acciai HPASS, dovrebbero essere usate intensità di corrente inferiori a quelle indicate di sotto.

12.1.5.6 Saldatura ad arco sommerso (SAW)

Nel SAW, l'elettrodo fusibile è un filo pieno, che di norma ha la stessa composizione impiegata per il filo continuo in protezione gassosa. Un flusso in polvere è applicato in corrispondenza della saldatura. Il flusso in polvere fonde e forma una coltre, una volta acceso l'arco. Il flusso in polvere fuso forma una scoria protettiva sulla zona

fusa e la parte non fusa è di norma riutilizzata, l'arco non è visibile attraverso la coltre di flusso, per cui il processo deve essere automatizzato.

I tassi di deposito del SAW sono molto più elevati rispetto a quelli di altri processi. Il processo è molto adatto per componenti aventi spessori importanti, come recipienti e tubazioni. È impiegato per saldatura testa a testa e a cordoni d'angolo in posizione piana e piana-frontale. Fornisce superfici eccellenti allo stato come saldato e richiede minime finiture dopo saldatura.

Non vi sono specifiche per i flussi per acciai inossidabili, ma sono comunque disponibili diversi flussi utilizzabili. I flussi possono essere metallurgicamente neutri, acidi o basici in funzione del comportamento in zona fusa. Il fabbricante dovrebbe consultare il fornitore del flusso per scegliere la combinazione

Tabella 19: Parametri tipici per saldatura con elettrodi basici e rutilici per diverse posizioni di saldatura. (11)

Elettrodo			Corrente			
Tipo	Diametro		Tensione	Saldatura in frontale	Saldatura in verticale ascendente	Sopratesta
	mm	pollici	V	A	A	A
Rutilico	1,6	0,063	22–24	30–40	30–35	30–40
	2,0	0,078	22–24	35–55	35–40	40–50
	2,5	0,098	22–24	50–75	50–60	60–70
	3,25	0,128	22–24	70–110	70–80	95–105
	4,0	0,157	22–24	100–150	100–120	120–135
	5,0	0,197	22–24	140–190		
Basico	2,0	0,078	24–27	35–55	35–40	35–40
	2,5	0,098	24–27	50–75	50–60	55–65
	3,25	0,128	24–27	70–100	70–80	90–100
	4	0,157	24–27	100–140	100–115	125–135
	5	0,197	24–27	140–190		

Tabella 20: Parametri di saldatura tipici per saldatura SAW di acciai inossidabili standard impiegando flusso leggermente basico. (11)

Diametro del filo		Corrente	Tensione	Velocità di saldatura	
mm	pollici	A	V	cm/min	pollici/min
2,4	0,094	200–350	27–33	30–60	12–24
3,2	0,125	300–600	30–36	30–60	12–24
4,0	0,157	400–700	30–36	30–60	12–24

filo-flusso corretta per la specifica tipologia di saldatura in questione. I flussi per HPASS tendono ad essere fortemente basici, mentre per leghe di tipo standard i flussi possono essere neutri o leggermente basici.

Così come risultano invitanti gli alti tassi di deposito, l'elevato apporto termico, le passate larghe e le basse velocità di raffreddamento e di solidificazione del SAW possono comportare problemi. Per applicazioni testa a testa, i tipi standard 304L e 316L (i tipi a basso carbonio sono preferiti per elevati apporti termici) sono più semplici da saldare. Quando si impiega l'arco sommerso per gli HPASS, l'apporto termico e la temperatura di interpass devono essere attentamente controllate. Vedere anche le linee guida nel paragrafo 12.1.4.3. Come indicato nella Tabella 14, queste leghe sono saldate di norma con consumabili Ni-Cr-Mo. L'arco sommerso è particolarmente adatto per l'applicazione di placcature in posizione piana su acciaio al carbonio. Sono disponibili procedure che indicano le corrette combinazioni filo/flusso per ottenere le desiderate composizioni chimiche. La **Tabella 20** fornisce alcuni parametri di saldatura tipici.

12.1.6 Note sulla qualità dei giunti saldati

I giunti saldati degli acciai inossidabili devono essere resistenti alla corrosione e strutturalmente sani, al tempo stesso. Eventuali difetti di saldatura possono compromettere la resistenza alla corrosione

e la resistenza meccanica, pertanto devono essere evitati. Se si verificano, devono essere riparati. Di seguito sono fornite linee guida per minimizzare l'insorgenza dei difetti più comuni.

- Incompleta penetrazione del giunto: L'incompleta penetrazione del giunto si verifica più spesso in giunti testa a testa tra tubi o in altri giunti testa a testa non saldati da ambo i lati. Ciò crea un interstizio che può innescare la corrosione ed intrappolare sporcizia e contaminanti, consentendo loro di accumularsi. L'interstizio diminuisce la resistenza meccanica ed alla corrosione del giunto ed è molto difficile da sanificare (pulire). I giunti saldati testa a testa di alta qualità richiedono la piena penetrazione. Altrimenti, la resistenza meccanica ed a fatica del giunto possono essere sensibilmente ridotte. Per evitare questi problemi, è importante adottare un tipo di giunto di opportuna concezione o la ripresa al rovescio, con saldatura al rovescio, appena possibile.
- Porosità: La porosità superficiale offre un riparo per sporcizia ed altri contaminanti che possono innescare la corrosione. La porosità superficiale comporta problemi di pulitura e sanificazione in quanto intrappola sporcizia e batteri. L'umidità causa spesso porosità. Essa deriva dai rivestimenti degli elettrodi, dal gas protettivo o dalla superficie del pezzo. Una cura attenta all'essiccazione degli elettrodi, alla chimica del gas ed alle attività di pulitura

minimizza le porosità superficiali. È pure importante stabilire livelli di accettabilità delle porosità per guidare l'esame visivo delle superfici saldate.

- Ossidi superficiali: I colori di rinvenimento sulla superficie interna dei giunti saldati possono essere un problema, per molte applicazioni. Vi sono numerosi sistemi per eliminare o minimizzare i colori di rinvenimento. Uno è impiegare tecniche di protezione gassosa al rovescio. Realizzando giunti testa a testa con TIG orbitale, un assemblaggio preciso e la protezione di gas inerti sono necessari per ottenere giunti sostanzialmente privi di colori di rinvenimento. Con una prima passata in TIG, si verifica spesso un certo grado di colorazione. In funzione del tenore di colorazione e dalle condizioni di servizio previste, può essere necessario rimuovere gli ossidi mediante decapaggio o lucidatura meccanica.

I colori di rinvenimento riducono sostanzialmente la resistenza a corrosione interstiziale, specie negli acciai inossidabili austenitici standard negli interstizi formati sotto deposito, la resistenza alla corrosione indotta microbiologicamente (MIC) è ridotta. Si può verificare MIC in aree colorate da alterazione termica in servizio con acque non trattate, in particolare in presenza di condizioni di flusso ridotto o stagnante. Il mancato funzionamento dei drenaggi o dell'asciugatura dopo prova idraulica con acqua comune possono inoltre indurre MIC.

Vi sono due punti critici per definire un criterio di accettabilità per i colori di rinvenimento di giunti saldati, che non possano essere rimossi. Il primo è quantificare il grado di colorazione da rinvenimento. Un certo numero di costruttori impiegano guide fotografiche a colori per definire chiaramente criteri di accettabilità per i colori di rinvenimento. Una di queste guide è disponibile in AWS D18.1 e D18.2. Il secondo è stabilire un livello di colorazione da rinvenimento accettabile per specifiche condizioni di servizio.

La diminuzione della resistenza alla corrosione per colori da rinvenimento è più pronunciata negli acciai inossidabili legati standard (es. 304L e 316L) rispetto ai tipi più legati (es. gli HPASS). Quando risulta estremamente difficile o costoso rimuovere i colori di rinvenimento, i progettisti dovrebbero considerare un tipo più resistente alla corrosione per meglio gestirne gli effetti.

- Colpi d'arco e spruzzi: Colpi d'arco e spruzzi operano come interstizi e possono innescare la corrosione interstiziale. Per minimizzare questi difetti, il saldatore dovrebbe accendere l'arco all'interno del giunto piuttosto che in prossimità. Se essi sono presenti, devono essere rimossi per molatura fine.

12.1.7 Saldatura eterogenea (DMW)

Gli acciai inossidabili austenitici possono essere saldati facilmente con tipi austenitici diversi, con inossidabili duplex e con acciai al carbonio o bassolegati. La saldatura di metalli eterogenei richiede che vengano considerate tanto le proprietà dei metalli da saldare che quelle del consumabile, in quanto la saldatura comporta la nascita di una nuova lega dal materiale base e dal consumabile. Informazioni di dettaglio sulla saldatura eterogenea possono essere trovate nella Nickel Institute Publication No. 14 018 (12), ma anche la seguente discussione fornisce alcune informazioni di base.

Nella saldatura di un acciaio inossidabile ad un acciaio al carbonio o bassolegato, la composizione della zona fusa non dovrebbe essere tale da formare martensite. La martensite causa una bassa duttilità della saldatura ed è sensibile agli effetti dell'idrogeno. Dopo la diluizione, la zona fusa dovrebbe contenere austenite ed un 5 % minimo di ferrite per garantire buona resistenza alla cricabilità a caldo. La composizione della zona fusa può essere stimata assumendo un rapporto di diluizione attorno al 30 %. Il Diagramma di Schaeffler (Figura 2) può quindi anticipare le fasi presenti in zona fusa. Un consumabile

inossidabile ad elevato tenore di ferrite (E309L, E309MoL o 312) è una buona scelta. Con un consumabile meno legato come il tipo 308 e la diluizione di un acciaio comune, la martensite che si forma può infragilire il giunto.

I giunti eterogenei devono soddisfare le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione per le condizioni ambientali di servizio previste. La zona fusa dovrebbe avere una resistenza maggiore o eguale al meno resistente dei due materiali base. La sua resistenza alla corrosione dovrebbe essere almeno pari al materiale base meno resistente. Se le condizioni di servizio prevedono cicli termici, i valori di dilatazione termica del giunto e del materiale base dovrebbero essere più simili possibile per minimizzare le avarie per fatica termica. Tuttavia, nelle saldature tra acciai al carbonio o bassolegati ed acciai inossidabili austenitici, la differenza tra la dilatazione lineare non è considerata significativa se la temperatura di servizio è 425 °C (800 °F) o inferiore.

Nella saldatura di diversi tipi di acciai inossidabili austenitici contenenti molibdeno, si sceglie in genere un consumabile con un tenore di molibdeno eguale al materiale base a maggiore contenuto di molibdeno, saldando tipi diversi di acciai inossidabili austenitici oppure nella saldatura di tipi austenitici con acciai inossidabili duplex.

12.2 Brasatura forte e dolce

La brasatura forte e dolce consentono la giunzione dei materiali base con un consumabile fusibile avente un punto di fusione inferiore rispetto al materiale base. Con queste tecniche, il materiale base rimane sempre allo stato solido. La differenza tra brasatura forte e dolce è in primo luogo la temperatura del processo. La American Welding Society definisce brasatura dolce quella che comporta una temperatura di fusione inferiore a 427 °C (800 °F). Per quanto al di sopra di 427 °C (800 °F) si parli tecnicamente di brasatura, l'espressione 'brasatura forte' è usata per la brasatura all'argento,

che richiede tipicamente temperature nell'intervallo tra 595 e 705 °C (1100 e 1300 °F).

Tutti gli acciai inossidabili possono essere brasati o uniti per brasatura dolce. I requisiti per una buona brasatura dolce e forte per gli acciai inossidabili sono simili per tutti i tipi. Le superfici devono essere pulite, occorre usare un flussante non corrosivo e occorre fare attenzione ad evitare la sensibilizzazione, se il processo avviene nell'intervallo di temperature di sensibilizzazione. Le differenze tra i tipi riguardano prima di tutto la loro resistenza all'ossidazione. I tipi più resistenti all'ossidazione richiedono spesso flussanti più aggressivi.

12.2.1 Brasatura forte

La maggior parte degli acciai inossidabili sono brasati con consumabili che ricadono nelle seguenti categorie:

- leghe di argento – gruppo BAg
- leghe di nichel – gruppo BNi
- leghe di rame – gruppo BCu
- leghe d'oro – gruppo BAu

La lega è scelta in funzione delle proprietà meccaniche, della resistenza alla corrosione e delle proprietà ad alta temperatura richieste dalle condizioni di servizio.

Le leghe di argento (Ag-Cu-Zn e Ag-Cu-Zn-Cd) sono le più usate e sono applicabili a tutti i tipi austenitici. Le leghe contenenti cadmio sono vietate nell'industria casearia ed alimentare per via della tossicità del cadmio. Leghe prive di cadmio dovrebbero essere usate appena possibile, dal punto di vista della salute e della sicurezza.

Le temperature di brasatura per molte leghe di argento ricadono nell'intervallo di sensibilizzazione, per cui il processo può comportare precipitazione di carburi di cromo e sensibilizzazione. Per questa ragione, il tipo 347 oppure i tipi ad elevato carbonio sono preferiti per la brasatura all'argento. Dato che numerose leghe

Tabella 21: Vantaggi e limiti dei giunti realizzati con brasatura dolce.

Vantaggi	Limiti
Realizza un giunto a tenuta di liquidi e di gas a temperatura ridotta	È possibile una riduzione della resistenza alla corrosione del giunto
Evita effetti metallurgici ad alta temperatura	Rapida perdita di resistenza per maggiori temperature
Minima distorsione termica	Minore resistenza, in confronto al materiale base in acciaio inossidabile ed ai giunti saldati
Minori costi a confronto con altri metodi	L'aspetto può apparire insoddisfacente
Consente di sigillare interstizi ed angoli arrotondati	Bassa, rispetto ad altri metodi di saldatura

di argento contengono rame e/o zinco, è preferibile evitare il surriscaldamento prolungato per prevenire l'infragilimento da metallo liquido dell'acciaio inossidabile.

Le leghe di nichel sono scelte in genere per la loro eccellente resistenza alla corrosione e la buona resistenza meccanica ad elevata temperatura. Queste leghe consistono fondamentalmente in leghe Ni-Cr-B-Si. La maggior parte delle leghe di nichel richiedono elevate temperature di brasatura (da 927 a 1204 °C, da 1700 a 2200 °F). Malgrado questo intervallo di temperatura sia al di sopra delle temperature di sensibilizzazione, l'impatto metallurgico della temperatura di brasatura e del ciclo di raffreddamento sul materiale base deve essere valutato.

Le leghe di rame consistono per lo più di rame puro ed hanno temperature di brasatura elevate, con migliore fluidità rispetto a quelle di nichel, consentendo preparazioni dei lembi con minore luce. Purtroppo, le leghe di rame hanno minore resistenza alla corrosione e all'ossidazione, aspetti che limitano la loro applicabilità.

Le leghe d'oro sono usate in applicazioni speciali, in cui la resistenza alla corrosione ed i requisiti di duttilità impediscono l'uso di altre leghe. Le leghe di oro consistono soprattutto in leghe Au-Cu ed Au-Pd-Ni. Il

loro costo ne limita l'impiego ad applicazioni di nicchia, come ad esempio le attrezzature per il settore aerospaziale.

Componenti in acciaio inossidabile sono brasati in genere in forno, con atmosfere inerti oppure in vuoto. Con atmosfere fortemente riducenti o inerti non sono richiesti flussanti. La brasatura con cannello richiede invece sempre un flussante. La brasatura ad induzione ed a resistenza richiedono un flussante, se non eseguite in atmosfera protettiva o in vuoto.

Molte composizioni per flussanti sono disponibili per impiego su acciai inossidabili. Flussanti come AWS 3A e 3B sono adatti. Tali flussanti contengono acido borico, borati, fluoruri, fluoro borati e promotori della bagnabilità. Il flussante deve essere rimosso completamente dopo la brasatura per evitare corrosione indotta dai residui di flussante.

12.2.2 Brasatura dolce

Gli acciai inossidabili sono uniti con brasatura dolce con leghe stagno-piombo o stagno-argento, per quanto l'industria stia eliminando le leghe brasanti base piombo. La brasatura dolce è in primo luogo una tecnica di giunzione, ma elimina anche gli interstizi e gli angoli più stretti. La maggior parte degli acciai inossidabili

austenitici può essere unita per brasatura dolce, ad eccezione dei tipi stabilizzati al Ti, come il 321, e quelli resistenti all'ossidazione. L'elevato tenore di cromo degli HPASS li posiziona tra i tipi resistenti all'ossidazione, che presentano maggiori difficoltà. I flussanti standard non riescono a rimuovere gli ossidi tenaci degli HPASS, che impediscono la bagnabilità della superficie da parte del consumabile. Per la brasatura dolce di queste leghe sono necessari flussanti più efficaci.

Il flussante deve rimuovere il film di passività per assicurare la bagnabilità del pezzo da parte della lega brasante. I flussanti di tipo acido sono i più usati e ne sono disponibili in commercio tipi concepiti espressamente per gli acciai inossidabili. I flussanti all'acido fosforico e cloridrico forniscono buoni risultati per i tipi standard. I tipi più resistenti all'ossidazione ad elevato tenore di Cr, Mo, Al o Ti richiedono flussanti che contengano acido fluoridrico. Ciò è importante per la pulitura della superficie dopo brasatura, per prevenire successivi problemi di corrosione a causa dei residui di flussante, altamente corrosivo. L'acido fluoridrico, in questi flussi, richiede avvertenze particolari per il corretto e sicuro uso e per l'applicazione.

La finitura superficiale ha a sua volta influenza nei confronti della bagnabilità. Le superfici decapate (N. 1 o 2D) forniscono una migliore brasabilità rispetto a superfici più lisce, come le finiture 2B o le BA (ricotte in bianco).

Il giunto ottenuto per brasatura dolce introduce la presenza di metalli eterogenei, che possono limitarne la resistenza alla corrosione. Dato che le leghe brasanti sono materiali 'dolci', a basso punto di fusione, la resistenza del giunto è di fatto quella del consumabile. I giunti che contengano sovrapposizioni o geometrie a tasca hanno una resistenza meccanica maggiore per effetto della maggiore area di giunzione. La **Tabella 21** riassume i vantaggi ed i limiti della brasatura dolce degli acciai inossidabili.

13 Metodi di giunzione meccanica

Tutti i comuni metodi di giunzione meccanica possono essere impiegati per gli acciai inossidabili. Tali metodi sono tutti condotti a temperatura ambiente o quasi. Ad eccezione della rivettatura a caldo, i rischi di ossidazione, precipitazione o tensioni residue che possono verificarsi con processi di giunzione ad elevata temperatura appaiono modesti. Tuttavia, la giunzione meccanica può comportare alcune criticità. Una è la corrosione interstiziale associata con le giunzioni meccaniche. Un'altra è la corrosione galvanica tipica dei giunti eseguiti tra metalli diversi. Le giunzioni meccaniche tendono inoltre ad avere minore resistenza meccanica rispetto ai giunti saldati.

13.1 Metodi di giunzione

13.1.1 Collegamenti con bulloni, con viti

Bulloni e viti sono reperibili facilmente per i tipi standard, ma non per i tipi HPASS. Dispositivi di fissaggio di acciaio inossidabile allo stato ricotto tendono ad usurarsi, per cui sono preferiti allo stato lavorato a freddo oppure realizzati con HPASS ad alta resistenza. Aspetti importanti per giunzioni meccaniche imbullonate sono anche la posizione dei fori dei bulloni e la capacità di lavoro a taglio della giunzione. La resistenza di un giunto imbullonato è di norma inferiore a quella di un giunto saldato. Nel Riferimento 13 sono disponibili Linee Guida per la progettazione di collegamenti imbullonati.

13.1.2 Rivettatura

I rivetti di acciai inossidabili tipo standard sono reperibili con le forme più comuni per le teste e per vari diametri del corpo del rivetto. I rivetti dovrebbero lavorare a taglio, non a trazione, per cui le superfici in gioco dovrebbero essere pulite e prive di bave, ed i fori dovrebbero corrispondere con precisione al rivetto per assicurare un assiemaggio ottimale. Il fissaggio e

la formatura di un rivetto prevedono la deformazione plastica del materiale che lo costituisce. Gli acciai inossidabili austenitici, con i loro tassi di incrudimento maggiori rispetto agli acciai al carbonio, richiedono attrezzature con maggiore potenza.

La rivettatura può essere eseguita a freddo o a caldo. La rivettatura a freddo evita l'ossidazione ed i costi per il riscaldamento. La rivettatura a caldo fornisce un'ulteriore forza di compressione, una volta raffreddato il rivetto, restringendosi. I rivetti di acciaio inossidabile austenitico sono riscaldati in genere tra 1065 e 1150 °C (da 1950 a 2100 °F) prima della rivettatura a caldo. La rivettatura dovrebbe essere eseguita prima che la temperatura scenda al di sotto di 930 °C (1700 °F).

13.1.3 Clinching

Il clinching prevede una deformazione a intervalli che consente la clampatura dei materiali da unire. Esso è un'alternativa alla rivettatura o alla saldatura a punti a

resistenza e può essere applicato a materiali duttili e sottili. Il clinching e l'incollaggio sono spesso accoppiati, in modo da ottenere un giunto sigillato ermeticamente che previene la penetrazione di fluidi nella regione interstiziale.

13.1.4 Aggraffatura

L'aggraffatura comporta la piegatura delle estremità dei due lamierini con un angolo di 180° per realizzare un giunto ad orli ripiegati (**Figura 24**). Questa tecnica è più spesso usata per lamierini o nastri di acciaio inossidabile di spessore inferiore o uguale a 1,6 mm (0,062 pollici). Essa è usata spesso per la realizzazione di coperture e nella realizzazione di elettrodomestici. L'applicazione di adesivi sigillanti applicati alle superfici del giunto migliora la loro tenuta. I giunti di questo tipo hanno interstizi ridotti, che rendono più difficile la pulitura ed aumentano il rischio di corrosione interstiziale. Se le condizioni di servizio lo consentono, essi possono essere riempiti con lega brasante per evitare problemi di corrosione interstiziale.

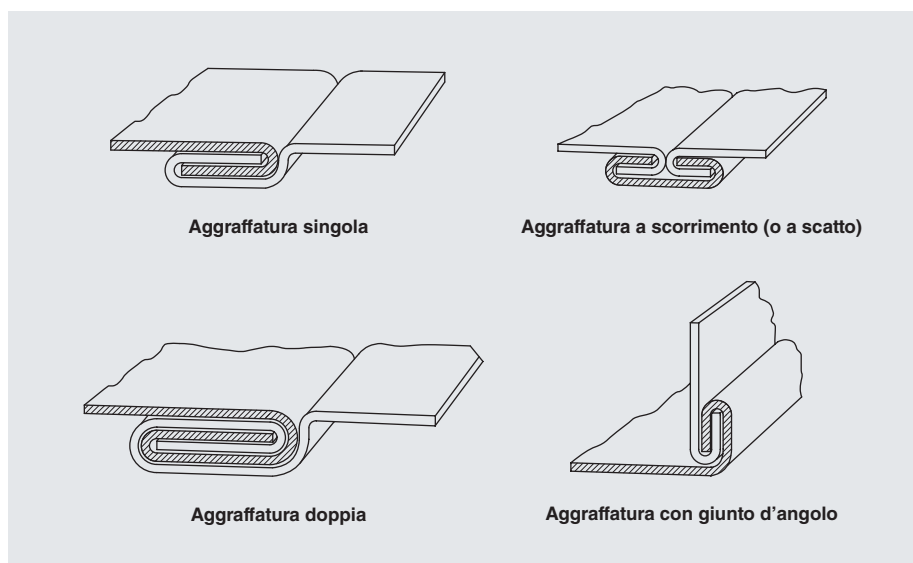


Figura 24: Tipiche forme di giunti aggraffati. (13)

13.1.5 Incollaggio

L'incollaggio può essere usato con giunzioni meccaniche per ottenere un collegamento più resistente, oppure da solo per unire lamierini o nastri di acciaio inossidabile. Dato che si tratta di un processo a bassa temperatura, l'incollaggio non influenza la microstruttura o l'aspetto superficiale dell'acciaio inossidabile. Gli adesivi fanno risparmiare una notevole quantità di peso, aspetto molto importante per il settore dei trasporti. D'altra parte, i giunti incollati hanno in genere una resistenza inferiore a quelli saldati o brasati e richiedono geometrie a sovrapposizione per fornire una resistenza sufficiente.

13.2 Note sulla corrosione dei collegamenti meccanici

13.2.1 Corrosione interstiziale

Gli interstizi presenti naturalmente tra la testa del bullone, le rondelle, il dado sono sensibili alla corrosione interstiziale. In ambienti umidi, certi fluidi possono penetrare anche negli interstizi più stretti e la composizione chimica del fluido intrappolato tende a cambiare rispetto a quella del fluido esterno, a causa della reazione con le superfici del giunto. Ciò provoca una sorta di effetto-pila, che comporta ulteriore corrosione, e si verifica con metalli simili se la corrosività dell'ambiente dell'interstizio supera la resistenza alla corrosione dei metalli. Ciò si verifica anche in giunti tra metalli dissimili, caso in cui il metallo meno resistente subisce la maggior parte dell'attacco.

Il rischio di corrosione interstiziale aumenta all'aumentare dell'aderenza dell'interstizio, nel caso di alcuni materiali per guarnizioni e con la severità delle condizioni di servizio. Le normali condizioni atmosferiche non sono di norma una minaccia per giunti imbullonati con acciai tipo 304. D'altra parte, un giunto imbullonato realizzato con HPASS in un ambiente di acqua di mare calda potrebbe rappresentare un problema. È molto difficile progettare in caso di corrosione

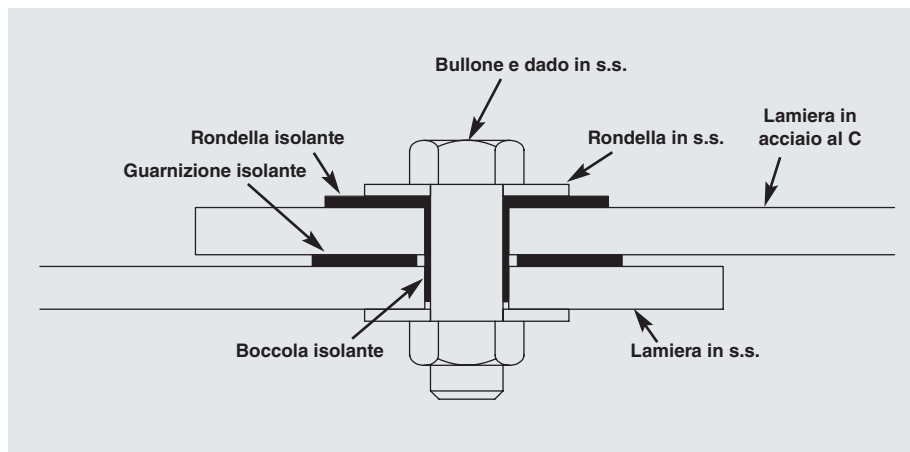


Figura 25: Rondelle isolanti impiegate per prevenire la corrosione galvanica in giunti imbullonati.

interstiziale, se l'aggressività dell'ambiente è prossima alla resistenza alla corrosione dei materiali che costituiscono il giunto. La **Figura 25** mostra un giunto imbullonato che impiega rondelle isolanti per protezione contro la corrosione galvanica. Tutte le varie interfacce di questo giunto (testa bullone/rondella, rondella/guarnizione, guarnizione/lamiera, guarnizione/dado, boccia isolante/corpo del bullone, interstizio tra le lamiere) costituiscono altrettanti siti di innesco di corrosione interstiziale.

13.2.2 Corrosione galvanica

La corrosione galvanica si verifica quando due metalli diversi sono collegati elettricamente, in un ambiente corrosivo. Uno di essi si tende a corrodere a velocità accelerata, mentre l'altro tende a non corrodere. La tendenza per l'uno e l'altro metallo a corrodere è indicata dalle cosiddette 'Serie Galvaniche'. Un metallo che si trovi in alto nella serie, lontano da un altro metallo è più soggetto alla corrosione. Vi sono quattro modi per affrontare il problema della corrosione galvanica:

- Non usare tipi di acciaio inossidabile diversi o metalli dissimili in un giunto meccanico.

- Usare isolanti per separare i metalli dissimili nella realizzazione del giunto (vedere **Figura 23**).

- Scegliere metalli dissimili che siano vicini nelle serie galvaniche.

- Disporre le superfici dei metalli dissimili in modo che il metallo più sensibile alla corrosione presenti la superficie esposta maggiore.

Gli HPASS sono relativamente nobili (resistenti alla corrosione), per cui possono causare problemi di corrosione all'acciaio al carbonio, all'alluminio, a molte leghe di rame e alla maggior parte degli acciai inossidabili, se usati impropriamente in un giunto. Essi possono essere impiegati come elementi di fissaggio per materiali meno nobili (ad esempio, bulloni per lamiere in tipo 316), perché in questo caso il metallo meno nobile presenta una superficie molto più grande rispetto all'elemento di fissaggio. Le Linee Guida per la progettazione tra le letture consigliate in Appendice forniscono approcci per evitare la corrosione galvanica grazie all'ottimizzazione della progettazione.

14 Pulitura post-lavorazione

La superficie degli acciai inossidabili deve essere pulita, liscia e priva di ogni ossido superficiale e contaminante. La lavorazione può alterare la superficie e diminuire la resistenza alla corrosione. In particolare, può contaminare la superficie con ferro libero o altri depositi; può danneggiare il film di passività a causa della deplezione del cromo; può causare danneggiamenti meccanici, come ad esempio colpi di mola. La **Figura 26** mostra esempi di queste imperfezioni superficiali.

Dopo la lavorazione, i componenti devono essere puliti e la resistenza alla corrosione ripristinata con appropriate tecniche. Il paragrafo successivo analizza i danneggiamenti superficiali e le tecniche per eliminarli.

14.1 Tipologie di danneggiamento e contaminazione superficiale tipiche

14.1.1 Contaminazione da ferro

La contaminazione da ferro è possibile qualora l'acciaio inossidabile entri in contatto con acciaio al carbonio. Si tratta di un problema comune, in quanto tutte le officine adoperano utensili e dispositivi di fissaggio in acciaio al carbonio. Le contaminazioni da ferro possono corrodere e formare macchie di ruggine sulla superficie dell'acciaio inossidabile, in ambiente umido (Figura in basso, a destra). La ruggine da ferro può anche causare corrosione dell'acciaio inossidabile, se esso è resistente alla corrosione solo in modo marginale, nelle condizioni di servizio previste dalla sua applicazione. La **Figura 27** illustra questo punto, confrontando gli effetti di diverse tipologie di contaminazione da ferro sulla corrosione di un acciaio inossidabile tipo 316 e 6 % di Mo.

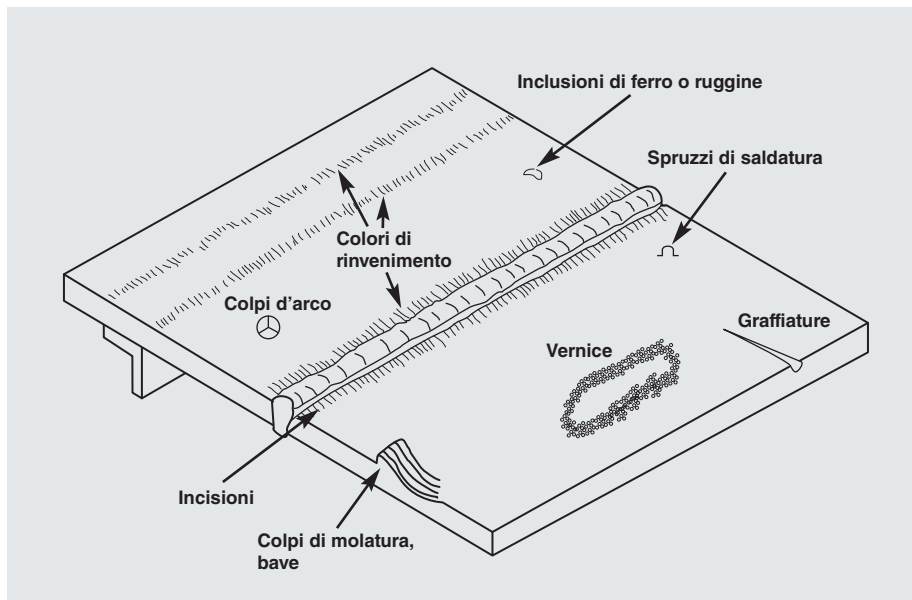
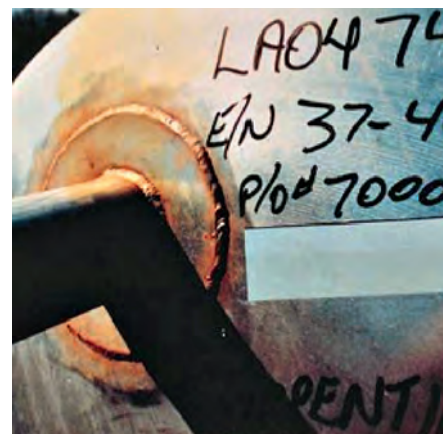


Figura 26: Danneggiamento superficiale e contaminazioni si possono produrre durante la lavorazione. (3)

Fonti di contaminazione da ferro comuni nelle officine sono:

- Polvere di acciaio al carbonio dovuta alla molatura vicino all'acciaio inossidabile
- Toccare o sfregare l'acciaio al carbonio sull'acciaio inossidabile
- Utensili di acciaio al carbonio, o utilizzati in precedenza su acciaio al carbonio
- Dischi mola usati in precedenza su acciaio al carbonio
- Mezzi per sabbiatura in acciaio al carbonio
- Mezzi per sabbiatura adoperati in precedenza su acciaio al carbonio

- Morse e ganci da trasporto in acciaio al carbonio
- Rulli per formatura, presse e stampi usati per fabbricare acciai al carbonio
- Spazzole e lana di acciaio al carbonio



L'uso di spazzole in acciaio al carbonio per pulire gli acciai inossidabili può causare decolorazione e ruggine. © Outokumpu Stainless

14.1.2 Contaminazione da composti organici

I composti organici comprendono lubrificanti, refrigeranti, segni di pennarello e sporcizia. Essi possono agire come interstizi ed innescare corrosione interstiziale in alcune condizioni di servizio. Essi possono nascondere inclusioni di ferro oppure ossidi ed impedire che il decapaggio o gli acidi della passivazione

raggiungano la superficie metallica per pulirla e passivarla. Essi carburano la superficie, per effetto dell'apporto termico successivo.

14.1.3 Ossidi formati durante la ricottura e la saldatura

Gli acciai inossidabili formano ossidi se ricotti, distesi o saldati in presenza di ossigeno. L'ossido si forma in aria ed in

atmosfera di forno ossidanti ed è molto più spesso rispetto al consueto film di passività che si forma sulla superficie pulita di un inossidabile.

Passando da strati più sottili a strati più spessi, il colore dell'ossido varia dal giallo chiaro trasparente al blu scuro sino al nero opaco. Il colore e lo spessore dell'ossido dipendono dal tempo e dalla temperatura di esposizione, con temperature maggiori e tempi più lunghi risulta favorita la crescita dello strato. (Ad esempio, gli ossidi di saldatura sono di norma più sottili e chiari rispetto a quelli tipici della ricottura.). L'ossidazione può essere minimizzata saldando con gas di protezione o ricuocendo in atmosfera protettiva, ma anche con la cura più scrupolosa è difficile evitare la decolorazione. Ogni evidenza visiva di formazione di ossido indica in genere che è necessaria una pulitura.

L'acciaio inossidabile al di sotto dello strato di ossido ha una resistenza alla corrosione minore rispetto al materiale base in quanto il cromo passa dal metallo all'ossido durante la sua formazione e crescita, con la deplezione del metallo stesso in cromo. La **Figura 28** mostra in modo schematico la variazione del cromo in una sezione di uno strato di ossido e del materiale base ad esso associato. Il valore minore di cromo può facilmente essere inferiore al 10,5 % richiesto per un acciaio inossidabile, per cui tanto l'ossido che il materiale base depleto devono essere rimossi durante la pulitura a valle della lavorazione, per ripristinare la resistenza alla corrosione.

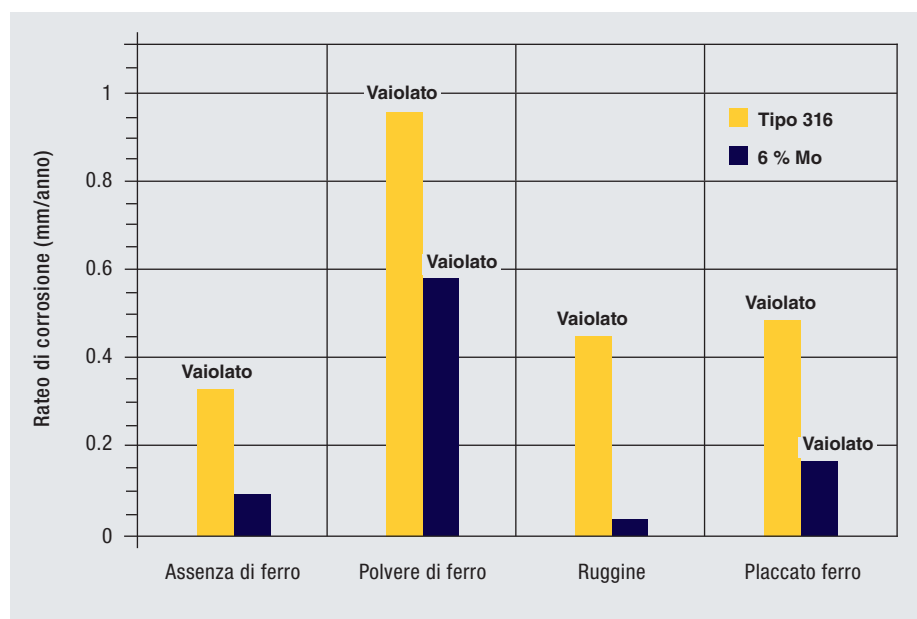


Figura 27: Effetto di varie tipologie di contaminazione da ferro sulla resistenza a vaiolatura degli acciai inossidabili tipo 316 e 6 % Mo. Campioni esposti per 24 ore ad una soluzione acquosa contenente 3 % CaCl_2 , 3 % NaCl , 0,5 % FeCl_3 ed aerata con 80 % di aria, / 20 % SO_2 . (15)

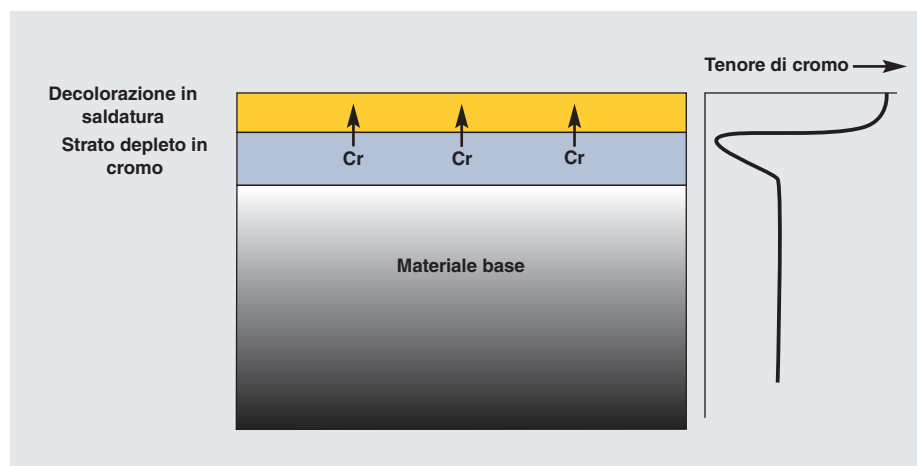


Figura 28: Profilo della concentrazione di cromo lungo la sezione di una superficie ossidata.

14.1.4 Altri difetti

I difetti di saldatura (incisioni, spruzzi e crateri) possono causare deplezione di cromo nell'acciaio inossidabile e creare interstizi che innescano la corrosione. Graffiature, solchi ed elevate rugosità possono innescare la corrosione in quanto creano una superficie 'attiva'. Metalli a bassa temperatura di fusione come il rame possono causare attacchi intergranulari a seguito di riscaldamento.

Tabella 22: Metodi di pulitura dopo lavorazione.

Difetto o contaminazione	Metodo di pulitura	Note
Olio, fluido da taglio, composti organici	Solvente Vapore caldo Acqua ad alta pressione	Rimuovere i composti organici prima del decapaggio o passivazione.
Ferro ed acciaio	Passivazione	La passivazione deve essere aggressiva a sufficienza da rimuovere.
	Decapaggio Elettrolucidatura Molatura Spazzolatura	Contaminazione da ferro. Se è previsto il decapaggio, la passivazione non è di norma necessaria. Può essere necessario il decapaggio se sono presenti elevate quantità di ferro libero superficiale.
Vernice	Sabbiatura con particelle di vetro o solvente	Usare abrasivi puliti.
Ossido di ricottura	Sabbiatura normale o con particelle di vetro seguita da decapaggio	Usare abrasivi puliti.
Incisioni Segni di molatura grossolani Graffiature Spruzzi di saldatura	Molatura	Usare solo strumenti puliti e non contaminati. Non usare la molatura per la finitura; finitura con grana fine per levigare la superficie.
Decolorazione della saldatura	Molatura/Lucidatura Decapaggio Sabbiatura Spazzolatura Elettrolucidatura	Una combinazione di molatura e decapaggio è il metodo più efficace per ripristinare la resistenza alla corrosione.

14.2 Metodi di pulitura post-lavorazione

Molti metodi meccanici e chimici sono disponibili per la pulitura post-lavorazione. I metodi sono utilizzati spesso in funzione della natura e della severità della contaminazione e dell'impiego previsto per l'acciaio inossidabile. Il migliore metodo possibile prevede sempre un trattamento chimico finale che ripristina la passività e la resistenza alla corrosione. La **Tabella 22** riassume i metodi più comuni e fornisce una breve descrizione di ognuno.

14.2.1 Sabbiatura

La sabbiatura è in grado di pulire aree estese e gravemente ossidate in modo economico. La sabbia deve essere pulita e non usata in precedenza su acciaio al carbonio. Essa può facilmente contenere

contaminanti come sporcizia o particelle ferrose. Una passivazione finale dopo sabbiatura è necessaria per garantire la resistenza alla corrosione ottimale.

14.2.2 Sabbiatura con particelle di vetro

La sabbiatura con particelle di vetro è preferita alla sabbiatura convenzionale in quanto genera una superficie relativamente liscia. La pulitura iniziale è importante in questo processo. Essa richiede anche una fase di passivazione finale.

14.2.3 Molatura e lucidatura

La molatura con dischi a grana grossa rimuove difetti come le incisioni marginali e graffi profondi. Il disco mola o il nastro abrasivo devono essere nuovi o usati solo per acciaio inossidabile. La molatura non deve surriscaldare la superficie al punto da

formare un ossido di colore giallo. L'impiego di abrasivi a grana più fine, dopo una molatura grossolana, con una finitura nell'intervallo 180–220 grit, genera una superficie levigata, con una buona resistenza alla corrosione. Una passivazione dopo molatura fornisce una resistenza alla corrosione ancora migliore.

14.2.4 Spazzole di acciaio inossidabile/ lana di acciaio inossidabile

Una spazzola con fili in acciaio inossidabile oppure una lana di acciaio inossidabile possono rimuovere i colori di rinvenimento superficiali, contaminazione superficiale e sporcizia. Essi non rimuovono tuttavia lo strato depleto di cromo. Il decapaggio acido è richiesto per ripristinare la completa resistenza alla corrosione in caso di superfici leggermente ossidate pulite con spazzolatura o lana di acciaio.

14.2.5 Sgrassaggio

Contaminanti organici come oli da taglio, lubrificanti per lavorazioni plastiche oppure segni di matite colorate possono risultare corrosivi. Essi possono impedire la bagnatura della superficie durante la pulitura chimica con acidi. I contaminanti possono essere rimossi con solventi non clorurati prima dell'impiego da parte dell'utilizzatore o del trattamento di pulitura chimica.

14.2.6 Decapaggio acido

Il decapaggio crea la superficie più resistente alla corrosione di tutti i metodi di pulitura. Esso impiega acidi forti che rimuovono gli ossidi grossolani superficiali e lo strato depleto di cromo sottostante. Poiché il decapaggio dissolve la superficie dell'acciaio inossidabile, deve essere attentamente controllato. Esso crea superfici

pulite, con colore grigio opaco, con una finitura opaca che si passiva spontaneamente per esposizione all'aria.

Vi sono numerose soluzioni acide per decapaggio. Esse contengono di solito acido nitrico diluito, fluoridrico e solforico, singolarmente o variamente miscelati. La soluzione chimicamente ottimale, la temperatura del bagno ed il tempo di immersione dipendono dagli spessori degli ossidi, dal grado di pretrattamento mediante sabbiatura o altre tecniche e dal tipo dell'acciaio inossidabile.

I tassi di decapaggio dipendono fortemente dalla lega. Le condizioni impiegate per i Tipi 304 o 316 possono non essere adeguate per leghe più resistenti alla corrosione come l'acciaio HPASS 6 % Mo. La **Figura 29** mostra che il decapaggio può richiedere tempi molto lunghi con

acciai maggiormente resistenti alla corrosione (notare la scala logaritmica). La sabbiatura riduce il tempo di decapaggio in molti casi, ma può essere richiesta in casi estremi la rimozione degli ossidi formati ad elevata temperatura con bagno di sali.

Il decapaggio può essere effettuato per immersione del pezzo in un bagno o per spruzzatura della soluzione decapante durante il passaggio in una stazione di spruzzatura. I prodotti decapanti possono anche essere applicati localmente in forma di spray, gel o pasta. Le paste decapanti possono essere usate in parti intere o su aree limitate – per esempio, solo sui colori di rinvenimento dei giunti saldati.

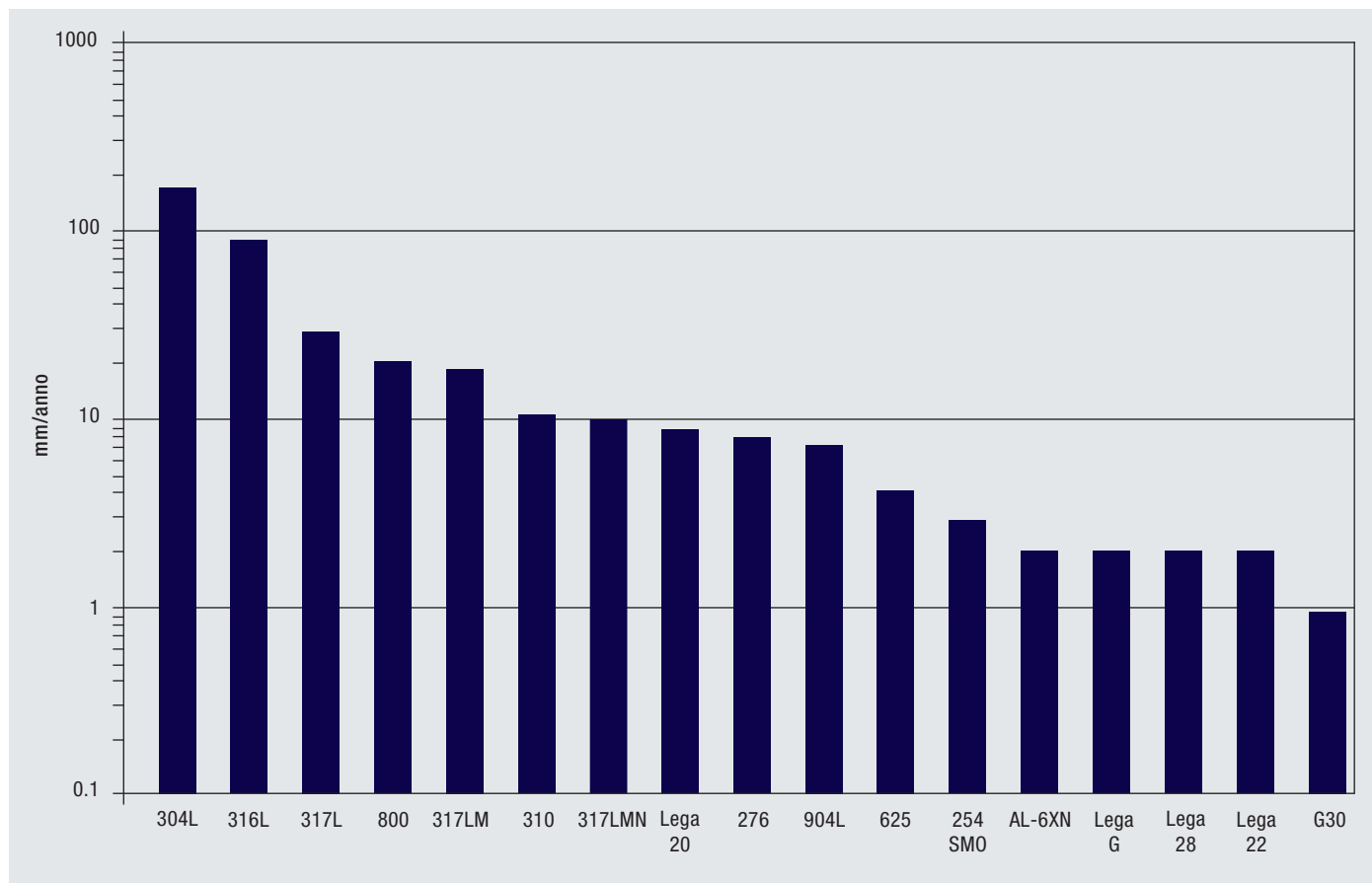


Figura 29: Tassi di rimozione del metallo per acciai inossidabili e leghe base nichel in una soluzione acida simulata, (10 % HNO₃ + 3 % HF) a 21 °C (70 °F). (16)

Dopo il decapaggio, il componente deve essere risciacquato accuratamente in una soluzione che neutralizza gli acidi decapanti trattenuti e rimasti intrappolati, quindi lavato con acqua pulita a basso contenuto di cloruri. Dopo la risciacquatura, il pezzo può essere asciugato in aria. Sono disponibili test per determinare se le superfici siano prive di acidi e ioni cloro, dopo la risciacquatura finale.

I prodotti decapanti e le soluzioni di risciacquo usati dovrebbero essere smaltiti secondo le disposizioni applicabili in materia di smaltimento dei rifiuti. È importante leggere e rispettare tutte le istruzioni per la sicurezza (ad esempio, l'uso di occhiali di sicurezza, guanti ed altri dispositivi di protezione). L'acido fluoridrico presenta rischi specifici a causa della sua capacità di penetrare la pelle e persistere nel corpo. Esso può provocare gravi danni permanenti, inclusa la morte. Le corrette precauzioni per la sicurezza e l'ambiente per il decapaggio, non devono essere sottovalutate.

14.2.7 Passivazione

La passivazione è impiegata per rimuovere le contaminazioni da ferro dalle superfici dell'acciaio inossidabile. A differenza del decapaggio, essa non rimuove gli ossidi grossolani o lo strato depleto di cromo. Una volta ultimata, essa consente alla superficie di formare il film di passività spontaneamente dopo esposizione all'aria. È un modo molto efficace per assicurare la completa pulitura dell'acciaio inossidabile che non sia stato decapato. Essa aiuta ad assicurare la completa rimozione del ferro da superfici sabbiolate, molate o spazzolate.

Le norme ASTM A 967 ed A 380 forniscono informazioni sui trattamenti di passivazione per un certo numero di acciai inossidabili. Sono anche disponibili alcuni prodotti commerciali per passivazione. I trattamenti di passivazione impiegano in genere una soluzione acquosa con acido nitrico dal 20 al 45 per cento in volume. Le parti sono immerse per circa 30 minuti

a temperature tra 21 °C e 32 °C (da 70 °F a 90 °F), quindi risciacquate in acqua. Le superfici devono essere sgrassate per assicurare che gli agenti passivanti possano raggiungere la superficie dell'acciaio inossidabile e rimuovere il ferro.

14.2.8 Elettrolucidatura

L'elettrolucidatura è un processo elettrolitico che rimuove il ferro libero superficiale, i colori di rinvenimento dei giunti saldati e le inclusioni non metalliche. Essa rende più levigata la superficie e conferisce un aspetto brillante. È spesso una operazione di finitura in applicazioni in cui è importante un'estrema pulizia. Una superficie elettrolucidata è più semplice da ispezionare e da pulire in quanto i contaminanti non riescono facilmente ad attaccarsi su una superficie liscia. Queste caratteristiche lo rendono un processo di finitura preferito per componenti usati nel settore farmaceutico, nel trattamento di gas di semiconduttori e per applicazioni nell'industria casearia.



Il decapaggio rimuove efficacemente gli ossidi di saldatura durante la lavorazione degli acciai inossidabili.

Tabella 23: Sommario dei trattamenti di pulitura dopo lavorazione.

	Trattamenti chimici				Trattamenti meccanici		
	Sgrassaggio	Decapaggio	Elettrolucidatura	Passivazione	Sabbatura	Spazzolatura	Molatura/lucidatura
Grasso ed olio	E	N	N	N	N	N	N
Colori di rinvenimento	N	E	E	N	E	E	E
Zona della saldatura depleta dal cromo	N	E	(E)3	N	N	N	(E)3
Scoria di saldatura	N	E	(E)	N	(E)1	(E)	E
Leggera contaminazione superficiale da ferro	N	E	E	E	(E)2	(E)2	(E)2
Contaminazioni da ferro libero superficiale	N	E	(E)	(E)	(E)2	N	(E)2
Difetti di saldatura, graffi meccanici	N	N	N	N	N	N	E

E = Efficace (E) = Può essere efficace N = Inefficace
1 = Problematico in angoli stretti, ecc.
2 = Contaminazioni da ferro tendono a macchiare
3 = Dato che questa zona non è visibile, non è semplice sapere se la zona sia stata rimossa

14.3 Influenza dei metodi di pulitura nei confronti della resistenza alla corrosione

La scelta del metodo di pulitura post-lavorazione può avere un effetto significativo nei confronti della resistenza alla corrosione finale. La pulitura con spugnette abrasive, con spazzole di acciaio inossidabile e la molatura sono meno efficaci nel ripristinare la resistenza alla corrosione (17). Una combinazione tra metodi di pulitura meccanici seguiti da decapaggio fornisce la massima resistenza alla corrosione. La **Tabella 23** riassume l'efficacia dei vari metodi di pulitura post-lavorazione. La **Figura 30** mostra l'efficacia relativa dei diversi metodi di pulitura nei confronti della CPT, applicati alla zona fusa, ZTA e materiale base attorno ai giunti saldati.

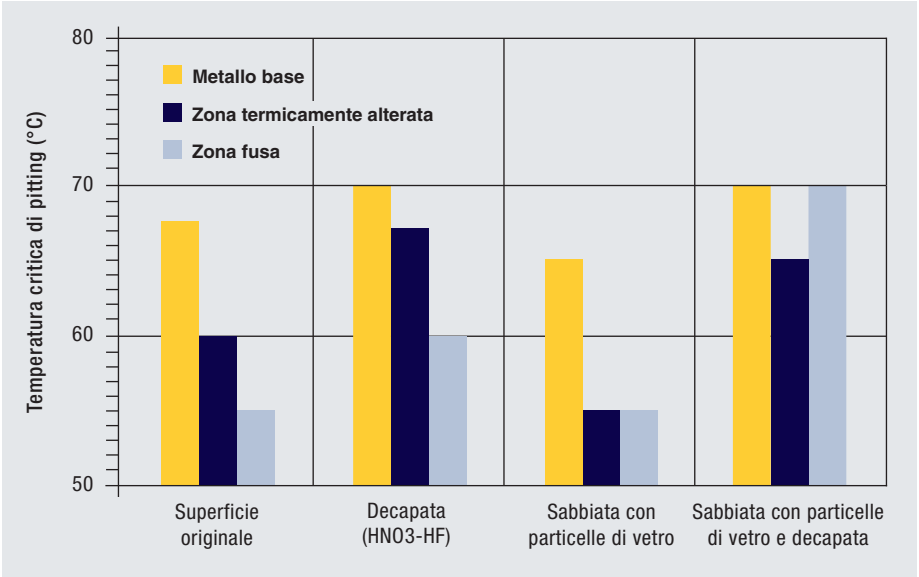


Figura 30: Efficacia dei vari metodi di pulitura nei confronti della resistenza a pitting di un acciaio inossidabile al 6 % Mo, misurata con CPT. (18)

15 Finitura superficiale

La finitura superficiale è una caratteristica importante in quanto influenza la resistenza alla corrosione, la pulibilità e l'aspetto. Le finiture lisce conferiscono in genere migliore resistenza alla corrosione e pulibilità ma sono tipicamente più costose da ottenere. La finitura di un pezzo finito riflette la storia della sua lavorazione, dall'acciaieria all'officina. L'utilizzatore finale specifica spesso un grado di finitura che soddisfi i propri requisiti di progettazione, il che può imporre un certo processo di finitura superficiale.

Gli HPASS sono prodotti con la medesima finitura superficiale che caratterizza gli altri tipi inossidabili, ma il raggiungimento di una certa finitura è talvolta più costoso per effetto della loro maggiore resistenza ai decapaggi acidi, molatura e lucidatura.

15.1 Influenza della finitura sulle prestazioni

Una superficie rugosa ha normalmente una peggiore resistenza alla corrosione rispetto ad una superficie liscia, in quanto contiene interstizi microscopici che possono innescare la corrosione oppure contaminanti che fanno da sito preferenziale per la corrosione. Gli HPASS sono intrinsecamente meno sensibili al problema, ma sono usati in ambienti più corrosivi che possono annullare questo

vantaggio. Gli utilizzatori devono specificare una finitura superficiale liscia, per la massima resistenza alla corrosione.

Molte applicazioni nell'industria farmaceutica, medica, di trattamento gas ed altre industrie richiedono una superficie facile da pulire, che non attragga contaminanti. Specifiche finiture sono spesso richieste per questi componenti. Gli HPASS offrono un vantaggio in alcune applicazioni critiche che richiedono elevata levigatezza e resistenza alla corrosione. Esempi sono impianti per il trattamento di gas corrosivi ad elevata purezza ed alcune applicazioni medicali che richiedono pulizia e resistenza alla corrosione da fluidi corporei.

L'aspetto è molto importante in numerose applicazioni ornamentali ed architettoniche. Molte finiture, brillanti o opache, rugose o lisce sono disponibili per soddisfare le esigenze dei progettisti. Esse sono disponibili per la maggior parte dei tipi, compresi gli HPASS. È consigliabile impiegare campioni in aggiunta alle norme oppure opportune descrizioni per specificare una certa finitura superficiale.

L'industria e le officine adottano varie tecniche per produrre differenti finiture superficiali. Lamiere in acciaio inossidabile laminate a caldo, ricotte o decapate hanno

una superficie più rugosa rispetto a lamiere laminate a freddo con rulli finemente lucidati. La lucidatura modifica la finitura originale con abrasivi. Essa può essere effettuata dall'acciaieria o da una ditta specializzata per la lucidatura. Le specifiche che definiscono i livelli di lucidatura definiscono due grandi classi: finiture di acciaieria e finiture per abrasione. Molte finiture brevettate come quelle goffrate o colorate sono a loro volta disponibili. (19)

15.2 Trattamenti di finitura effettuati in acciaieria

15.2.1 Lamiera spessa

Una lamiera è un prodotto piano laminato o forgiato di spessore minimo 4,76 mm (3/16 di pollice) e largo almeno 254 mm (10 pollici). È fabbricato in forma di brama laminata a caldo o forgiata oppure lingotto, che sono quindi ricotti e decalaminati. La finitura standard di una lamiera è una finitura opaca e rugosa. Per specifiche applicazioni, la laminazione a freddo oppure una passata di rinvenimento dopo la ricottura ed il trattamento di decalaminazione forniscono una finitura più curata. La **Tabella 24** riassume le finiture disponibili per le lamiere. Le lamiere di acciaio inossidabile possono inoltre avere finiture simili alle finiture ottenute per lucidatura di cui alla Tabella 27.

Tabella 24: Finiture superficiali per lamiera. (20)

Stato di fornitura e finitura	Descrizione e note
Laminata a caldo	Ossido non rimosso, non trattato a caldo; lamiera non consigliata per l'impiego finale in questo stato
Laminata a caldo o a freddo e ricotta	Ossido non rimosso, l'impiego della lamiera in questo stato in genere è limitato ad applicazioni a caldo; gli ossidi grossolani riducono la resistenza alla corrosione.
Laminata a caldo o a freddo, ricotta	Stato di fornitura e finitura comunemente preferiti per prodotti resistenti alla corrosione, decalaminati. E la maggior parte di applicazioni resistenti al calore.
Laminata a caldo o a freddo, ricotta, decalaminata e trattata con passata di rinvenimento	Finitura più curata per applicazioni specifiche.
Laminata a caldo o a freddo, ricotta, decalaminata e lucidata.	Finiture lucidate simili a quelle tipiche dei prodotti piani.

Tabella 25: Classificazione delle finiture standard di acciaieria per lamiere sottili e nastri. (20)

	Descrizione	Finiture standard di acciaieria	Operazione di finitura corrispondente
Lamiere sottili	Bobine e prodotti tagliati con spessori inferiori a 4,76 mm (3/16 di pollice) e superiori a 610 mm (24 pollici) di lunghezza.	N. 1 – Superficie rugosa, opaca.	Laminazione a caldo, seguita da ricottura e rimozione degli ossidi
		N. 2D – Finitura laminata a freddo con superficie da grigio opaco a riflettente in funzione del tipo	Laminazione a freddo seguita da ricottura e rimozione degli ossidi, può anche ricevere una passata finale leggera, con cilindri non lucidati.
		N. 2B – Finitura lucida laminata a freddo.	Stesso processo della 2D con una passata finale leggera attraverso cilindri lucidati.
		BA – Finitura con ricottura in bianco – finitura brillante, laminazione a freddo mantenuta con una ricottura finale in forno ad atmosfera controllata.	Laminazione a freddo, seguita da una ricottura in gas inerti, quindi laminazione a freddo usando cilindri con lucidatura fine.
Nastri	Nastri finiti a freddo e prodotti tagliati con spessori tra 0,127 e 4,76 mm (0,005 e 3/16 di pollice) e larghezze al di sotto di 610 (24 pollici) .	N.1 – Simile alla finitura per lamiere sottili N. 2D. Superfici da grigio opaco a riflettenti, in funzione del tipo.	Laminazione a freddo seguita da ricottura e rimozione degli ossidi, può anche ricevere una passata finale leggera, con cilindri non lucidati.
		N. 2 – Simile alla finitura 2B per lamiere sottili N. 2B. Finitura brillante, laminazione a freddo.	Stesso processo del N. 1, con l'aggiunta finale di una leggera passata a freddo con cilindri lucidati.
		BA – Finitura mediante ricottura in bianco – finitura brillante, laminazione a freddo conservata da una ricottura finale in un forno ad atmosfera controllata.	Laminazione a freddo seguita da ricottura in gas inerte, quindi laminazione a freddo con cilindri finemente lucidati.
		Lucidatura in acciaieria con dischi – finitura molto riflettente, laminazione e freddo.	Applicata a nastri N. 2 o BA mediante passate di lucidatura in continuo.

15.2.2 Lamiera sottile e nastro

Le lamiere sottili ed i nastri hanno spessore più basso rispetto alle lamiere. Essi sono ottenuti mediante varie sequenze di processi che includono la laminazione a caldo con o senza la successiva laminazione a freddo, ricottura e finitura finale e pulitura. Essi possono essere forniti in forma di bobina o in singoli pezzi ottenuti mediante taglio. Vi sono specifiche sequenze di processi concepite per ottenere sia finiture standard che finiture speciali. La **Tabella 25** descrive le finiture standard di acciaieria. Le designazioni per le finiture impiegate in Giappone ed in Europa sono riportate, per confronto, nella **Tabella 26**.

La finitura più comune per lamiere sottili e nastri è la 2B. Essa è ottenuta mediante laminazione a caldo, seguita da laminazione a freddo, ricottura e decapaggio. La lamiera sottile è quindi finita con una passata finale con cilindri lucidati, per conferire una finitura leggermente riflettente.

Tabella 26: Confronto tra finiture superficiali internazionali. (21)

Tipo di finitura	USA (ASTM A 480)	Giappone (JSSA)	Norma europea EN 10088
Acciaieria	N. 1	N. 1	1D
	N. 2D	2D	2D
	N. 2B	2B	2B
	Ricottura in bianco (BA)	BA	2R
Lucidata	N. 3	N. 3	1G or 2G
	N. 4	N. 4	1J or 2J
	–	N. 240	1K or 2K
	N. 7	N. 7	1P or 2P
	N. 8	–	1P or 2P

Nota: Nella norma europea, 1 indica un prodotto laminato a caldo e 2 un prodotto laminato a freddo.

15.3 Finitura mediante lucidatura meccanica

Le superfici lucidate sono ottenute mediante una lucidatura finale o speculare, con l'impiego di abrasivi. La finezza dell'abrasivo finale e le altre variabili del processo di lucidatura determinano la finitura finale della superficie ed il suo

aspetto. La **Tabella 27** riassume le finiture lucide più comuni.

Le finiture di acciaieria standard presentano al tempo stesso caratteristiche di rugosità (una proprietà misurabile quantitativamente) ed estetiche (valutabile solo soggettivamente). Si potrebbe pensare che la riflettività aumenti se

le superfici divengono più lisce, ma non è sempre così. Quando la rugosità è importante per ottenere una prestazione, dovrebbe essere specificato invece di riferirsi all'aspetto. La **Figura 31** riassume gli intervalli per la rugosità superficiale tipica di superfici lucidate e di acciaieria.

Tabella 27: Descrizione della finitura superficiale di lamiere e nastri lucidati. (20)

Stato e finitura	Descrizione e note
N. 3	Superficie lucidata intermedia, ottenuta mediante abrasivi 100 grit. Usata in genere qualora sia richiesta una superficie semi-finita, lucidata. Una superficie N. 3 subisce in genere una lucidatura addizionale durante la lavorazione.
N. 4	Superficie lucidata, ottenuta mediante finitura con abrasivi 120–150 grit. È una finitura per impieghi generali, brillante con grani visibili che evitano la riflessione a specchio.
N. 6	Finitura opaca, satinata, con minore riflettività rispetto alla N. 4. È prodotta da spazzole. Tampico N. 4 in un mezzo composto da olio ed abrasivi. È impiegata per applicazioni architettoniche ed ornamentali, in cui non è desiderata una lucentezza eccessiva quanto il contrasto rispetto alle finiture più brillanti.
N. 7	Finitura altamente riflettente, ottenuta mediante lucidatura con superfici finemente levigate, senza però rimuovere completamente le rigature presenti. È impiegata soprattutto per applicazioni architettoniche ed ornamentali.
N. 8	È la superficie lucidata più riflettente, ottenuta per lucidatura con abrasivi sempre più fini e lucidatura spinta con dischi sino a che tutte le rigature relative alle operazioni di molatura precedenti siano rimosse. È impiegata per applicazioni come specchi e riflettori.

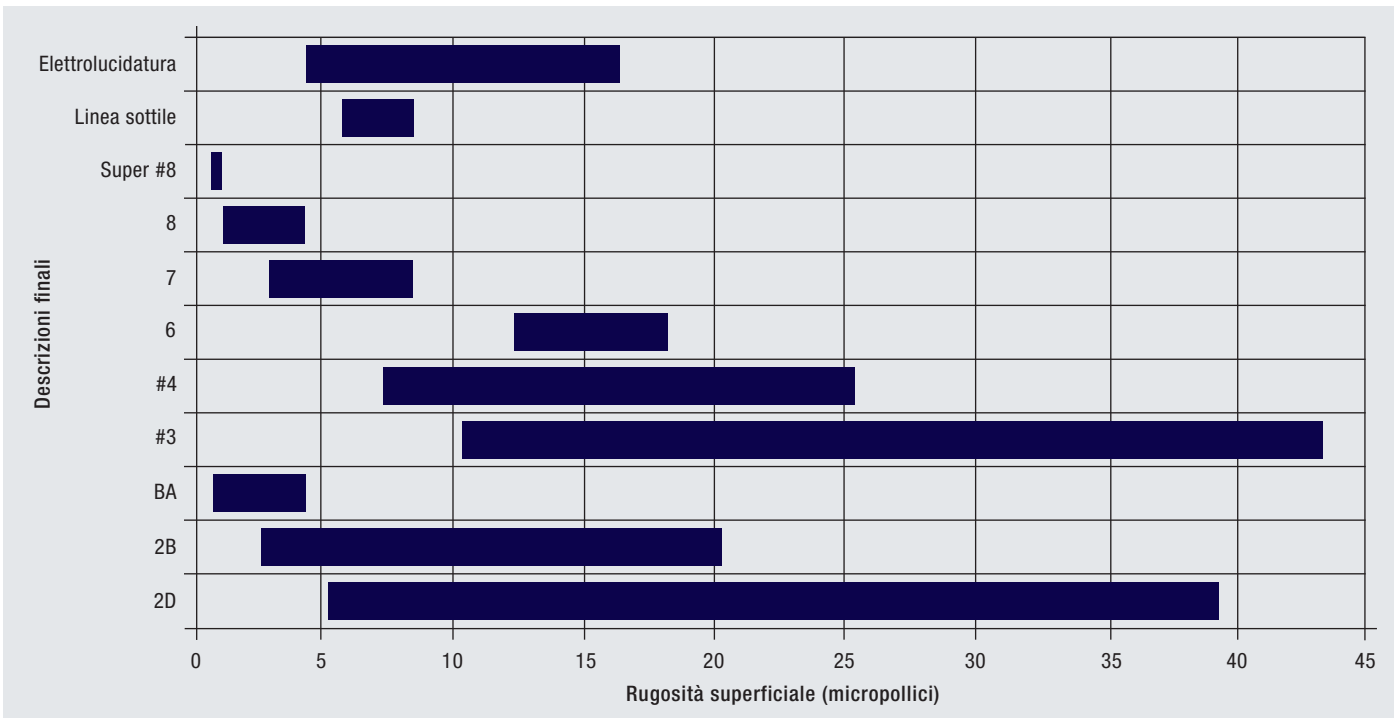


Figura 31: Intervalli tipici della rugosità superficiale per lamiere sottili di acciaio inossidabile e nastri di fornitori Nordamericani (21).

Se si desidera una superficie uniforme e la produzione delle parti prevede fasi che alterano la finitura superficiale come la saldatura o la piegatura, allora è meglio specificare una finitura iniziale lucida. Le aree saldate possono essere confuse con il materiale base, al punto di diventare quasi invisibili. Le lamiere di piccolo spessore possono essere fabbricate con la maggior parte delle finiture superficiali, protette da un foglio adesivo. Le aree alterate durante la lavorazione possono essere riportate alla finitura iniziale mediante una successiva molatura o lucidatura durante l'installazione.

15.4 Finitura superficiale mediante abrasivi

Gli acciai inossidabili presentano numerose finiture con proprietà estetiche e funzionali. È spesso pratico ottenere queste finiture mediante lucidatura con abrasivi o dischi durante le operazioni di lavorazione o produzione finali. La lucidatura con abrasivi può ridurre la rugosità iniziale e rimuovere difetti e macchie. La lucidatura con dischi non rimuove metalli ed imperfezioni; essa modifica solo l'aspetto superficiale. Il progettista dovrebbe considerare le opzioni disponibili per la finitura e lo stato iniziale della superficie del materiale. Ciò richiede conoscenza degli abrasivi e della loro interazione con la superficie del materiale.

La lucidatura inizia con abrasivi più grossolani per rimuovere le graffiature e le imperfezioni più grosse, quindi prosegue con abrasivi sempre più fini per creare una superficie liscia. Il tipo di abrasivo impiegato influenza l'efficienza del taglio ed i costi. È molto importante lavorare con la velocità giusta per ogni grit e tipo di abrasivo. Una velocità eccessiva può causare surriscaldamento, che a sua volta può provocare deformazioni ed ingiallimento delle superfici finite a causa

dell'ossidazione. I fabbricanti di abrasivi pubblicano tabelle e diagrammi che aiutano gli utilizzatori a scegliere l'abrasivo adatto e le velocità per una specifica lavorazione. I paragrafi successivi forniscono una panoramica dei tipi di abrasivo disponibili.

15.4.1 Abrasivi su supporto flessibile

Gli abrasivi su supporto flessibile impiegano particelle abrasive fissate in un foglio di carta, tessuto o altro materiale. Abrasivi comuni sono ossidi di alluminio (allumina) o zirconio (zirconia). L'allumina è marrone, mentre la zirconia è blu o verde.

Gli abrasivi su supporto flessibile sono disponibili in varie dimensioni, forme e numero di grit. Il termine "grit" esprime la rugosità dell'abrasivo ed è relativo alla dimensione delle particelle dell'abrasivo impiegate nel foglio. Particelle più grandi asportano materiale in modo più aggressivo rispetto a particelle più piccole. I numeri di grit variano da 36 sino a 400, con una dimensione delle particelle che diminuisce, all'aumentare del numero di grit. Durante la lucidatura di una superficie sempre più fine, non occorre passare progressivamente ad ogni numero di grit. La regola generale è passare ad un numero di grit non superiore al doppio del precedente. Ad esempio, lavorando con grit 40, non si dovrebbe passare ad un grit superiore ad 80 per la passata successiva.

È una buona pratica alternare la direzione di lucidatura quando cambia il numero di grit, in modo che ogni passata risulti perpendicolare alla precedente. In questo modo, l'abrasivo non lavora sempre più in profondità ma le differenze tra i picchi e le valli tendono a diminuire. Questa tecnica consente anche all'operatore di capire quando sono stati rimossi



Dischi, nastri e ruote sono disponibili per la finitura con abrasivi degli acciai inossidabili. © Magic Disc

tutti i segni della lavorazione precedente. Se questo non avviene, i segni possono restare a valle della lucidatura e causare problemi di tipo estetico.

15.4.2 Prodotti non tessuti

I prodotti non tessuti sono fatti con fibre di nylon imbevute con un abrasivo, il cui grit determina la rugosità del prodotto. A differenza degli abrasivi su supporto flessibile, i prodotti non tessuti non rimuovono molto materiale dal pezzo. Essi lisciano solamente i picchi e le valli dalla superficie. Di conseguenza, la loro nomenclatura non è quella degli abrasivi su supporto flessibile, in cui si usano i numeri di grit. Al contrario, la finezza è espressa come 'grossolana', 'media', 'fine', 'molto fine', 'super fine'. Questi prodotti sono conosciuti sotto il nome commerciale Scotch Brite™.



La lucidatura con dischi conferisce lucentezza alla superficie dell'acciaio inossidabile. © Magic Disc

15.4.3 Paste lucidanti

La lucidatura con dischi non rimuove significative quantità di materiale dalla superficie, ma liscia solo la superficie stessa e la rende lucida e riflettente. Essa viene effettuata dopo il trattamento della superficie con molatura o lucidatura o la finitura effettuata in acciaieria. Essa impiega prodotti in pasta o liquidi contenenti particelle abrasive di dimensioni inferiori al micron, applicati normalmente a ruote o dischi di cotone. Il processo produce la finitura cosiddetta a specchio.

15.5 Ripristino e protezione della finitura dopo lavorazione

La maggior parte delle operazioni di lavorazione, anche la sola movimentazione possono graffiare e danneggiare la finitura

superficiale dell'acciaio inossidabile. Il trattamento di una saldatura o di un altro difetto superficiale è analogo a quello impiegato per ottenere una superficie lucidata. Prima di tutto, vengono rimossi il sovrametallo di saldatura e le alonature. Ciò può essere fatto con un disco mola, un disco flessibile o con un nastro abrasivo, in funzione della geometria del pezzo. Successivamente, la superficie molata, relativamente rugosa, è trattata con grit sempre più fini sino a divenire liscia ed apparire come la superficie circostante.

Gli acciai inossidabili possono essere ordinati con una pellicola adesiva protettiva, che può essere lasciata sulla superficie durante la maggior parte delle operazioni di lavorazione. Se è previsto un riscaldamento localizzato, la pellicola

può essere rimossa dall'area riscaldata. Solo quando il pezzo è pronto per l'installazione o dopo che sia stato installato dovrebbe essere rimossa l'intera pellicola. In questo modo la maggior parte della superficie è protetta ed il pezzo richiede operazioni di finitura più blande.

Lettere addizionali consigliate

Trattamenti superficiali

Specifying Stainless Steel Surface Treatments, Nickel Institute Publication No. 10068

Metallurgia

High Performance Stainless Steels, Nickel Institute Publication No 11021, Nickel Institute, Toronto, Canada

Corrosione

Outokumpu Corrosion Handbook, Tenth Edition, Outokumpu Oyi, Espoo, Finland, 2009

Experience Survey – Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Water, MTI Publication No. 27, Materials Technology Institute of the Chemical Industry

Lavorazione

Fabrication of Chromium-Nickel Stainless Steels (300 series), Nickel Institute Publication No. 428, Nickel Institute, Toronto, Canada

Fabrication and Post-Fabrication Cleanup of Stainless Steels, Nickel Institute Publication No. 10004, Nickel Institute, Toronto, Canada

Practical guide to Using 6Mo Austenitic Stainless Steel, Nickel Institute Publication No. 10032, Nickel Institute, Toronto, Canada

Fabrication Options for Nickel Containing Alloys in FGD Service: Guidelines for Users, Nickel Institute Publication No 14029, Nickel Institute, Toronto, Canada

Linee Guida pratiche per la lavorazione di acciai inossidabili austeno – ferritici (duplex), Prima edizione, International Molybdenum Association (IMOA), Londra, GB, 2011

Pickling and Passivating Stainless Steel (Materials and Applications Series, Volume 4), Euro Inox, Brussels, Belgium, 2004

L'acciaio inox a contatto con altri materiali metallici (Serie materiali e applicazioni, Volume 10), Euro Inox, Bruxelles, Belgio, 2010

L'elettrolucidatura dell'acciaio inossidabile (Serie materiali e applicazioni, Volume 11), Euro Inox, Bruxelles, Belgio, 2011

Saldatura

Welding of Stainless Steels, (Materials and Applications Series, Volume 3), Euro Inox, Bruxelles, Belgio, 2001

Handbook for the Welding of Stainless Steels, Information 9815, Avesta Welding, Avesta, Sweden

How to Weld 904L, Information 9724:2, Avesta Welding, Avesta, Sweden

How to Weld 254 SMO Stainless Steel, ASI-2 9/99, Outokumpu Stainless Inc., Schaumburg, Illinois, USA

Weld Fabrication of a 6% Molybdenum Alloy to Avoid Corrosion in Bleach Plant Service, Nickel Institute Publication No. 14020, Nickel Institute, Toronto, Canada

Welding Recommendations for Welding Metallic Materials, Part 3, Arc Welding of Stainless Steel, (EN 1011-3)

Guidelines for Welding Dissimilar Metals, Nickel Institute Reprint Series No 14018, Nickel Institute, Toronto, Canada.

Linee guida per la lavorazione mediante saldatura degli acciai inossidabili (Serie materiali ed applicazioni, Volume 9), Euro Inox (B) e SLV Duisburg (D), 2007

Riferimenti

- 1 Welding of stainless Steels and Other Joining Methods, American Iron and Steel Institute, Washington DC and Nickel Institute, Toronto, 1979. Available as Nickel Institute Publication 9002.
http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.
- 2 M. G. Fontana and N. D. Greene, Corrosion Engineering, 2nd Edition, McGraw-Hill, Boston, p 59, 1978.
- 3 Guidelines for the Welded Fabrication of Nickel-Containing Stainless Steels for Corrosion Resistance Service, Nickel Institute Toronto, 1992. Available as Nickel Institute publication 11007.
http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.
- 4 High Performance Stainless Steels, Nickel Institute, Toronto, 2000. Available as Nickel Institute publication 11021.
http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.
- 5 M. O. Speidel and P. J. Uggowitzer, "High Manganese, High Nitrogen Austenitic Stainless Steels: Their Strength and Toughness," in Proceedings of Two Conferences on High Manganese Austenitic Steels: the First Conference Held in Conjunction with ASM International's Materials Week '87, Cincinnati, Ohio, 10-15 October 1987; the Second Conference Held in Conjunction with ASM International's Materials Week '92, Chicago, Illinois, 2-4 November 1992, R. A. Lula, ed., American Society for Metals, Metals Park, 1992.
- 6 High Performance Austenitic Stainless Steel, Technical Brochure 1044EN-GB:5, Outokumpu Stainless AB, Avesta, 2009.
- 7 "Duplex, Austenitic-Ferritic stainless steel," Outokumpu Oyj, http://www.outokumpu.com/pages/SubAreaPage____45048.aspx.
- 8 Curtis W. Kovach, "Sulfide Inclusions and the Machinability of Steel," in Sulfide inclusions in steel: Proceedings of an International Symposium, 7-8 November 1974, J. J. deBarbadillo and Edwin Snape, Eds., American Society for Metals, Metals Park, 1975.
- 9 Compiled from Avesta Sheffield Machining Guidelines, now out of print.
- 10 "Heat Treating of Stainless Steels," ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, p. 774, ASM International, Materials Park, 1991.
- 11 The Avesta Welding Manual, Practice and products for stainless steel welding, Avesta Welding AB, Avesta Sweden (2004). English version available at http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/Prirucka_Avesta_AJ.pdf.
- 12 Richard E. Avery, "Pay Attention to Dissimilar Metal Welds: Guidelines for Welding Dissimilar Metals," Chemical Engineering Progress, May 1991, American Institute of Chemical Engineers, Danbury. Available as Nickel Institute publication 14018.
http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.
- 13 Stainless Steel Fabrication, p. 123, Allegheny Ludlum Steel, Brackenridge, 1959.
- 14 Design Manual for Structural Stainless Steel, Nickel Development Institute, Toronto, and European Stainless Steel Development & Information Group, Zurich, 1994. Available as Nickel Institute publication 12011.
http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.
- 15 W. L. Silence, P. Cook, J. R. Dillman, and F. G. Hodge, "The Effect of Surface Iron Contamination on the Corrosion Resistance of Alloys in Simulated FGD Environments," Paper 482, Corrosion 98, National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 1998.
- 16 J. F. Grubb, "Pickling and Surface Chromium-Depletion of Corrosion Resistant Alloys," Stainless Steels '91, Proceedings of the International Conference on Stainless Steels, 1991, Chiba, pp 944-951 ISIJ, 1991.

- 17 L. Ödegard and S. A. Fager "The Root Side Pitting Resistance of Stainless Steel Welds," in Super Duplex Steels '91, 28-30 October 1991, Beaune Bourgogne, France, Vol. I, J. Charles and S. Bernhardsson, Eds., Editions de Physique, Les Ulis, 1991.
- 18 A. Tuthill and R. E. Avery, "Specifying Stainless Steel Surface Treatments," Advanced Materials and Processes, December 1992. Available as Nickel Institute publication 10068.
http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.
- 19 "Cold Rolled Sheet and Coil, Cold rolled stainless steel finishes," Outokumpu Oyj,
http://www.outokumpu.com/pages/Page____5882.aspx.
- 20 Stainless Steel Information Center, Specialty Steel Industry of North America, Washington.
<http://www.ssina.com/finishes/whichproducts.html>.
- 21 Stainless Steels in Architecture, Building and Construction – Guidelines for Corrosion Prevention, Nickel Institute, Toronto, 2001. Available as Nickel Institute publication 11024. http://www.nickelinstitute.org/index.cfm/ci_id/15786/la_id/1.htm.

Marchi di fabbrica e nomi commerciali di produttori registrati

- 20Cb-3® Stainless, 20Mo-6® Stainless: CRS Holdings Inc., a subsidiary of Carpenter Technology Corporation
- INCOLOY® alloy 825, INCOLOY® alloy 25-6MO, INCOLOY® alloy 27-7MO: Special Metals Corporation
- NAS 155N, NAS 254N, NAS 354N: Nippon Yakin Kogyo Co.
- Sandvik® Sanicro® 28: Sandvik AB
- NIROSTA® 4565 S: ThyssenKrupp Nirosta
- Cronifer® 1925 hMo, Nicrofer® 3127 hMo: ThyssenKrupp VDM
- URANUS® 66 (UR 66): ArcelorMittal Industeel
- 254 SMO®, 654 SMO®: Outokumpu Stainless
- AL-6XN® Alloy: ATI Properties, Inc.

Appendice: elenco delle specifiche ASTM ed EN per prodotti in acciaio inossidabile

Specifiche ASTM

Prodotti piani di acciaio inossidabile laminati	
A 480/A 480M*	General requirements for flat-rolled stainless and heat-resisting steel plate, sheet, and strip
A 240/A 240M*	Chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications
A 167	Stainless and heat-resisting chromium-nickel steel plate, sheet, and strip
A 666	Annealed or cold-worked austenitic stainless steel sheet, strip, plate, and flat bar
Prodotti lunghi di acciaio inossidabile laminati o forgiati	
A 484/A 484M*	General requirements for stainless steel bars, billets, and forgings
A 555/A 555M	General requirements for stainless steel wire and wire rods
A 276	Stainless steel bars and shapes
A 479/A 479M*	Stainless steel bars and shapes for use in boilers and other pressure vessels
A 564/A 564M	Hot-rolled and cold-finished age-hardening stainless steel bars and shapes
A314	Stainless steel billets and bars for forging
A473	Stainless steel forgings
A 313/A 313M	Stainless steel spring wire
A 368	Stainless and heat-resisting steel wire strand
A 492	Stainless steel wire rope
A 580/A 580M	Stainless and heat-resisting steel wire
Prodotti in acciaio inossidabile tubolari	
A 999/A 999M*	General requirements for alloy and stainless steel pipe
A 1016/A 1016M*	General requirements for ferritic alloy steel, austenitic alloy steel, and stainless steel tubes
A 312/A 312M*	Seamless and welded austenitic stainless steel pipe
A 358/A 358M*	Electric-fusion-welded austenitic chromium-nickel alloy steel pipe for high-temperature service
A 409/A 409M	Welded large diameter austenitic steel pipe for corrosive or high-temperature service
A 778	Welded, unannealed austenitic stainless steel tubular products
A 813/A 813M	Single- or double-welded austenitic stainless steel pipe
A 814/A 814M	Cold-worked welded austenitic stainless steel pipe
A 249/A 249M*	Welded austenitic steel boiler, superheater, heat-exchanger, and condenser tubes
A 269	Seamless and welded austenitic stainless steel for general service
A 270	Seamless and welded austenitic stainless steel sanitary tubing
A 688/A 688M	Welded austenitic stainless steel feedwater heater tubes
A 851	High-frequency induction welded, unannealed austenitic steel condenser tubes

Specifiche ASTM (continuazione)

Raccordi, bulloneria e forgiati	
A 960	Common requirements for wrought steel pipe fittings
A 962	Common requirements for steel fasteners or fastener materials, or both, intended for use at any temperature from cryogenic to the creep range
A 182/A 182M	Forged or rolled alloy-steel pipe flanges, forged fittings, and valves and parts for high-temperature service
A 193/A 193M	Alloy-steel and stainless steel bolting materials for high-temperature service
A 194/A 194M	Carbon, and alloy steel nuts for bolts for high pressure and high-temperature service
A 403/A 403M	Wrought austenitic stainless steel fittings
A 744/A 744M	As-welded wrought austenitic stainless steel fittings for general corrosive service at low and moderate temperatures

Nota: Per ogni categoria di prodotto in acciaio inossidabile, le specifiche generali sono indicate in primo luogo nella Tabella, seguite dalle specifiche per prodotti particolari. I requisiti generali sono definiti per ognuna delle singole specifiche di prodotto, in modo che non sia necessario specificare altro che non la specifica di prodotto stessa. Ad esempio, ordinando un lamierino grado A 240 saranno applicati automaticamente tutti i requisiti di cui in A 480.

* Specifica avente una corrispondente specificazione "SA-" con lo stesso numero nella sezione II dell'ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Specifiche EN

EN 1600:1997	Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of stainless and heat resisting steels.
EN 10028-7:2000	Specification for flat products made of steels for pressure purposes. Stainless steels
EN 10088-1:2005	List of stainless steels
EN 10088-2:2005	Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes. Stainless steels.
EN 10088-3:2005	Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes. Stainless steels.
EN 10151:2002	Stainless steel strip for springs. Technical delivery conditions
EN 10213:2007/AC:2008	Steel castings for pressure purposes.
EN 10222-5:1999/AC:2000	Steel forgings for pressure purposes. Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels
EN 10250-4:1999	Open steel die forgings for general engineering purposes. Stainless steels
EN ISO 9445-1:2010	Cold-rolled stainless steel narrow strip and cut lengths. Tolerances on dimensions and shape
EN ISO 9445-2:2010	Cold-rolled stainless and heat resisting steel wide strip and plate/sheet. Tolerances on dimensions and shape
EN 10269:1999/A1:2006/AC:2008	Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties
EN 10270-3:2001	Steel wire for mechanical springs. Stainless spring steel wire
EN 10272:2007	Stainless steel bars for pressure purposes
EN 10283:2010	Corrosion resistant steel castings
EN 10312:2002/A1:2005	Welded stainless steel tubes for the conveyance of aqueous liquids including water for human consumption. Technical delivery conditions
EN ISO 14343:2009	Welding consumables. Wire electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heatresisting steels. Classification
EN 10217-7:2005	Welded steel tubes for pressure purposes. Technical delivery conditions. Stainless steel tubes



Copubblicato con:



ISBN 978-1-907470-11-0