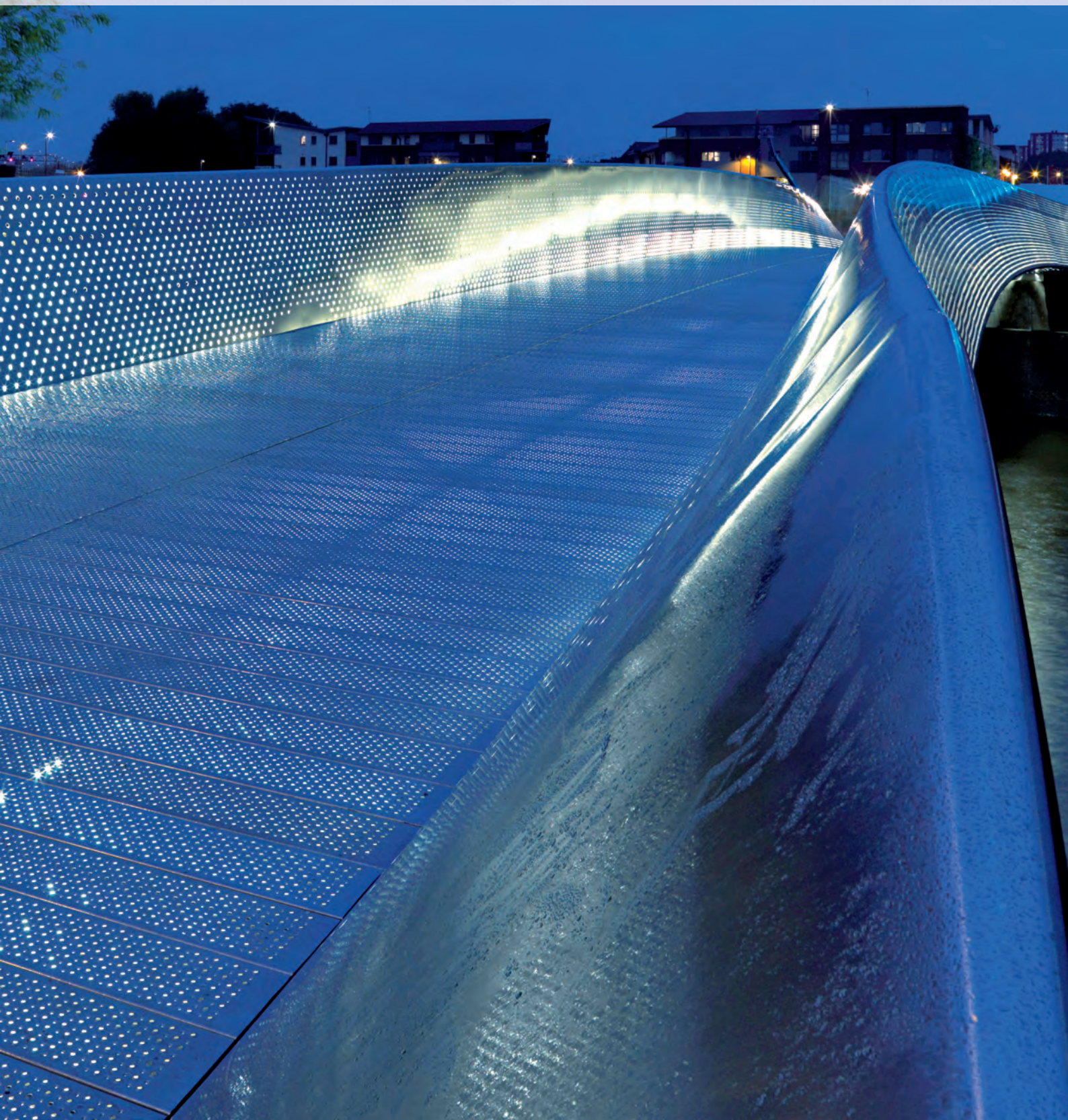


# **Linee Guida pratiche per la lavorazione di acciai inossidabili austeno – ferritici (duplex)**



**Linee Guida pratiche per la lavorazione di acciai  
inossidabili austeno – ferritici (duplex)**

Prima edizione 2011

© IMOA 1999-2011

ISBN 978-1-907470-03-5

Pubblicato dalla International Molybdenum Association  
(IMOA), Londra, GB

[www.imoa.info](http://www.imoa.info)

[info@imoa.info](mailto:info@imoa.info)

Preparato da TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA

Traduzione a cura di Michele Murgia, Genoa, IT

Grafica a cura di circa drei, Monaco, D

**Ringraziamenti:**

IMOA è grata ad International Stainless Steel Forum e ad Euro Inox per il supporto ricevuto e la revisione di questo manuale. Un ulteriore ringraziamento anche alle società seguenti per i contributi e la ricca documentazione: Acerinox, Allegheny Ludlum, Aquatech, Aperam, Baosteel, Columbus Stainless, JSL Limited, Nippon Yakin Kogyo, North American Stainless, Outokumpu Stainless, Sandvik, Swagelok, e Yieh United Steel Corporation.

La International Molybdenum Association (IMOA) ha fatto ogni sforzo per assicurare che le informazioni contenute siano tecnicamente corrette. Tuttavia, IMOA non risponde o garantisce circa l'accuratezza dei contenuti di questo manuale o della sua applicabilità per usi di carattere generale o specifico. Il lettore è quindi avvisato che il materiale qui contenuto è solo per scopi informativi; esso non va inteso in forma sostitutiva di procedure redatte individualmente e non deve essere usato o applicato per applicazioni specifiche o generali senza aver ottenuto preliminarmente una opportuna consulenza. IMOA, i suoi membri, lo staff ed i consulenti declinano ogni e qualsiasi responsabilità di alcun tipo per perdite, danni o lesioni derivanti dall'uso delle informazioni contenute nella presente pubblicazione. In questa pubblicazione sono state usate soprattutto specifiche relative a norme EN ed ASTM; tuttavia, la specifiche relative ai materiali possono variare da nazione a nazione.

**Foto di copertina: Meads Reach, Temple Quai, Bristol, GB  
(Fonte: [www.m-tec.uk.com](http://www.m-tec.uk.com) (costruttore), [www.photogenics.com](http://www.photogenics.com) (foto))**

# Indice

|           |                                                                                  |           |           |                                                                                                       |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Introduzione</b>                                                              | <b>4</b>  | <b>11</b> | <b>Lavorazione per asportazione di materiale degli acciai duplex</b>                                  | <b>32</b> |
| <b>2</b>  | <b>Storia degli acciai inossidabili duplex</b>                                   | <b>5</b>  | 11.1      | Criteri generali per la lavorazione per asportazione di materiale degli acciai duplex                 | 32        |
| <b>3</b>  | <b>Composizione chimica e funzione degli elementi di lega</b>                    | <b>8</b>  | 11.2      | Tornitura e sfacciatura                                                                               | 33        |
| 3.1       | Composizione chimica degli acciai inossidabili duplex                            | 8         | 11.3      | Fresatura frontale con carburo di tungsteno-cobalto sinterizzato                                      | 34        |
| 3.2       | Funzione degli elementi di lega negli acciai inossidabili duplex                 | 8         | 11.4      | Foratura con punte elicoidali in acciaio super rapido                                                 | 35        |
| <b>4</b>  | <b>Metallurgia degli acciai inossidabili duplex</b>                              | <b>10</b> | <b>12</b> | <b>Saldatura degli acciai duplex</b>                                                                  | <b>36</b> |
| <b>5</b>  | <b>Resistenza alla corrosione</b>                                                | <b>13</b> | 12.1      | Criteri generali di saldatura                                                                         | 36        |
| 5.1       | Resistenza agli acidi                                                            | 13        | 12.1.1    | Differenze tra gli acciai inossidabili duplex e gli acciai austenitici                                | 36        |
| 5.2       | Resistenza in ambienti caustici                                                  | 14        | 12.1.2    | Selezione del materiale base                                                                          | 36        |
| 5.3       | Resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale                      | 14        | 12.1.3    | Pulitura prima della saldatura                                                                        | 36        |
| 5.4       | Resistenza alla tensocorrosione da cloruri                                       | 16        | 12.1.4    | Progettazione dei giunti saldati                                                                      | 36        |
| <b>6</b>  | <b>Specifiche per gli utilizzatori finali e controllo della qualità</b>          | <b>18</b> | 12.1.5    | Preriscaldamento                                                                                      | 38        |
| 6.1       | Requisiti di prova standard                                                      | 18        | 12.1.6    | Apporto termico e temperature di interpass                                                            | 38        |
| 6.1.1     | Composizione chimica                                                             | 18        | 12.1.7    | Trattamento termico dopo saldatura                                                                    | 38        |
| 6.1.2     | Solubilizzazione e tempra                                                        | 18        | 12.1.8    | Bilanciamento ottimale delle fasi                                                                     | 38        |
| 6.2       | Requisiti di prova speciali                                                      | 19        | 12.1.9    | Giunti eterogenei                                                                                     | 39        |
| 6.2.1     | Prove di resistenza meccanica e durezza                                          | 19        | 12.2      | Qualificazione della procedura di saldatura                                                           | 40        |
| 6.2.2     | Prove di piega                                                                   | 19        | 12.3      | Processi di saldatura                                                                                 | 40        |
| 6.2.3     | Prove di tenacità alla frattura ed esami metallografici per fasi intermetalliche | 20        | 12.3.1    | Saldatura con elettrodo non consumabile (GTAW/TIG)                                                    | 40        |
| 6.2.4     | Verifica del bilanciamento delle fasi con esami metallografici o magnetici       | 20        | 12.3.2    | Saldatura con elettrodo consumabile a filo continuo (GMAW/MIG)                                        | 42        |
| 6.2.5     | Prove di resistenza alla corrosione                                              | 21        | 12.3.3    | Saldatura con filo animato (FCAW)                                                                     | 44        |
| 6.2.6     | Procedure di saldatura e di ispezione                                            | 22        | 12.3.4    | Saldatura con elettrodi rivestiti (SMAW)                                                              | 44        |
| <b>7</b>  | <b>Proprietà meccaniche</b>                                                      | <b>23</b> | 12.3.5    | Saldatura ad arco sommerso (SAW)                                                                      | 46        |
| <b>8</b>  | <b>Proprietà fisiche</b>                                                         | <b>26</b> | 12.3.6    | Saldatura con fascio elettronico e laser                                                              | 46        |
| <b>9</b>  | <b>Taglio</b>                                                                    | <b>28</b> | 12.3.7    | Saldatura a resistenza                                                                                | 46        |
| 9.1       | Taglio con sega                                                                  | 28        | <b>13</b> | <b>Altre tecnologie di giunzione</b>                                                                  | <b>47</b> |
| 9.2       | Cesoatura                                                                        | 28        | 13.1      | Preparazione del giunto                                                                               | 47        |
| 9.3       | Taglio con "slitter"                                                             | 28        | 13.2      | Adesivi                                                                                               | 47        |
| 9.4       | Tranciatura                                                                      | 28        | 13.3      | Brasatura dolce                                                                                       | 47        |
| 9.5       | Taglio plasma e laser                                                            | 28        | 13.4      | Brasatura forte                                                                                       | 48        |
| <b>10</b> | <b>Formatura</b>                                                                 | <b>29</b> | <b>14</b> | <b>Pulitura al termine della fabbricazione</b>                                                        | <b>49</b> |
| 10.1      | Formatura a caldo                                                                | 29        | 14.1      | Tracce di matita, vernice, sporcizia, oli                                                             | 49        |
| 10.1.1    | Solubilizzazione                                                                 | 29        | 14.2      | Contaminazione ferrosa                                                                                | 49        |
| 10.2      | Formatura ad alta temperatura                                                    | 30        | 14.3      | Spruzzi di saldatura, decolorazione dei giunti saldati, inclusioni di flusso, scoria, inneschi d'arco | 50        |
| 10.3      | Formatura a freddo                                                               | 30        | <b>15</b> | <b>Le applicazioni degli acciai duplex</b>                                                            | <b>51</b> |
| 10.4      | Stampaggio                                                                       | 31        |           | <b>Lecture consigliate</b>                                                                            | <b>54</b> |
| 10.5      | Tornitura in lastra ("spinforming")                                              | 31        |           | <b>Riferimenti</b>                                                                                    | <b>57</b> |
|           |                                                                                  |           |           | <b>Appendice 1:</b>                                                                                   |           |
|           |                                                                                  |           |           | <b>Designazioni degli acciai duplex e loro denominazioni commerciali</b>                              | <b>58</b> |
|           |                                                                                  |           |           | <b>Appendice 2:</b>                                                                                   |           |
|           |                                                                                  |           |           | <b>Indice delle specifiche tecniche</b>                                                               | <b>60</b> |

# 1 Introduzione

Gli acciai austeno-ferritici (di seguito: duplex) sono una famiglia di tipologie che unisce alla buona resistenza alla corrosione l'elevata resistenza meccanica e la semplicità nella lavorazione. Le loro proprietà fisiche sono intermedie rispetto agli acciai inossidabili austenitici e quelli ferritici ma tendono ad essere più simili a quelle dei ferritici e degli acciai al carbonio. La resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale da cloruri degli acciai duplex dipende dal tenore di cromo, molibdeno, tungsteno ed azoto. Può essere confrontabile con quella del grado EN 1.4401 (AISI 316) o immediatamente inferiore a quella degli acciai inossidabili per uso acqua mare, come ad

esempio gli acciai austenitici al 6 % di molibdeno. Tutti gli acciai duplex hanno una resistenza alla cricabilità da tensocorrosione significativamente superiore agli acciai inossidabili austenitici della serie 300. Essi presentano inoltre una resistenza meccanica significativamente superiore rispetto ai gradi austenitici, mantenendo allo stesso tempo una buona duttilità e tenacità.

Vi sono numerose analogie nella fabbricazione degli acciai inossidabili austenitici e quelli duplex ma anche differenze notevoli. L'elevato tenore di elementi di lega e l'elevata resistenza meccanica dei gradi duplex richiedono alcune variazioni nelle procedure di lavorazione. Questo manuale è rivolto a costruttori ed utilizzatori con responsabilità nella lavorazione. Esso consente di avere un unico riferimento pratico per la lavorazione con acciai duplex. Questa pubblicazione presuppone che il lettore possieda già un'esperienza pregressa nella trasformazione con acciai inossidabili; di conseguenza, essa fornisce dati comparativi circa le proprietà e le procedure operative tipiche degli acciai duplex rispetto a quelle degli austenitici della serie 300 e degli acciai al carbonio.

La lavorazione con acciai inossidabili duplex è differente ma non complessa.



Ponte in acciaio inossidabile duplex, Stoccolma, Svezia (Fonte: Outokumpu)

## 2 Storia degli acciai inossidabili duplex

Gli acciai inossidabili duplex, intesi come quelli aventi una microstruttura bifasica, composta da austenite e ferrite in eguali proporzioni, esistono da circa 80 anni. I primi gradi erano legati con cromo, nichel e molibdeno. Il primo acciaio duplex grezzo fu prodotto in Svezia nel 1930 e fu utilizzato nell'industria della carta, con processi al solfito. Questi gradi furono sviluppati per ridurre i problemi di corrosione intergranulare dei primi acciai inossidabili austenitici ad alto carbonio. Colate in acciaio duplex furono prodotte in Finlandia nel 1930 ed un brevetto fu registrato in Francia nel 1936 per il precursore di quello che sarebbe stato conosciuto come Uranus 50. Il grado AISI 329 (EN 1.4460) si diffuse dopo la Seconda Guerra Mondiale e fu utilizzato con frequenza per il fascio tubiero di scambiatori di calore per servizio in acido nitrico. Uno dei primi gradi sviluppati appositamente per migliorare la resistenza alla tensocorrosione (SCC) da cloruri fu il 3RE60. Negli anni successivi, tanto acciai grezzi quanto semilavorati fusi furono utilizzati per svariate applicazioni nell'industria di processo, tra cui recipienti, scambiatori di calore e pompe.

Questa prima generazione di acciai duplex presentava caratteristiche interessanti ma limitazioni, in condizioni "saldate". In zona termicamente alterata (ZTA) si manifestavano bassi valori di tenacità a causa degli eccessivi tenori di ferrite ed una resistenza alla corrosione significativamente inferiore a quella del materiale base. Queste limitazioni contenevano l'impiego della prima generazione di acciai duplex, soprattutto allo stato non saldato, a poche, specifiche applicazioni. Nel 1968 l'invenzione del processo di affinamento dell'acciaio inossidabile (decarburazione argon – ossigeno, AOD) aumentò lo spettro dei nuovi acciai inossidabili. Tra le possibilità offerte dalla tecnologia AOD vi era l'aggiunta deliberata di azoto come elemento di lega. L'alligazione con azoto di acciai inossidabili duplex consente di ottenere in ZTA tenacità e resistenza alla corrosione paragonabili a quelle del materiale base allo stato non saldato. Con una maggiore stabilità dell'austenite, l'azoto diminuisce inoltre la velocità di formazione di pericolose fasi intermetalliche.

La seconda generazione di acciai inossidabili duplex fu resa possibile proprio dall'uso di azoto come elemento di lega. Questo nuovo sviluppo commerciale, iniziato alla fine degli anni '70, coincise con lo sviluppo delle strutture offshore per estrazione di petrolio e gas nel Mare del Nord e della domanda di acciai inossidabili aventi un'eccellente resistenza alla corrosione da cloruri, buone caratteristiche di fabbricazione ed elevata resistenza. Il grado EN 1.4462 (2205) divenne lo standard della seconda generazione di acciai duplex e fu impiegato diffusamente per



Forno continuo in EN 1.4462 (2205) per la separazione di cellulosa con solfati e torre di impregnazione, Sodra Cell Mönsterås, Svezia (Fonte: Kvaerner Pulping)

pipeline ed applicazioni di processo in piattaforme offshore. L'elevata resistenza di questi acciai consentì la riduzione degli spessori di parete e quindi del peso delle piattaforme, dando un forte impulso alla loro diffusione.

Come gli acciai inossidabili austenitici, i duplex sono una famiglia di gradi, la cui resistenza alla corrosione dipende dal tenore di elementi di lega. Lo sviluppo degli acciai inossidabili duplex è proseguito e gli stessi possono oggi essere suddivisi in cinque gruppi:

- acciai denominati lean duplex, come il EN 1.4362 (2304), che non presenta aggiunte di molibdeno;
- acciai duplex standard come il EN 1.4462 (2205), il grado che copre da solo più dell'80 % dell'uso di acciai duplex;
- acciai duplex al 25 % Cr, come il grado 255 con PREN\* inferiore a 40;
- superduplex (PREN 40–45), con 25–26 % Cr e maggiori tenori di Mo ed N a confronto dei gradi 25 % Cr, come il 2507;
- hyper duplex, definiti come acciai inossidabili duplex alto legati con PREN maggiore di 45.

\*PREN = Pitting Resistance Equivalent Number  
$$= \% \text{Cr} + 3,3 (\% \text{Mo} + 0,5 \% \text{W}) + 16 \% \text{N}$$

Prospetto 1 contiene le composizioni chimiche degli acciai inossidabili duplex grezzi di seconda generazione e di fusioni in acciaio inossidabile duplex. I gradi di prima generazione ed i più comuni acciai inossidabili duplex sono inclusi per confronto.

Nota: Ogni acciaio inossidabile citato nel testo per nome o classificazione industriale è riportato nel Prospetto 1 o nell'Appendice 1.

**Prospetto 1: Composizione chimica (massa %) di acciai inossidabili duplex grezzi e fusi\* (i gradi austenitici sono indicati a titolo di paragone)**

| Grado                           | UNS No. | EN No. | C     | Cr        | Ni       | Mo       | N         | Mn        | Cu        | W         |
|---------------------------------|---------|--------|-------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Acciai duplex grezzi            |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
| Gradi della prima generazione   |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
| 329                             | S32900  | 1.4460 | 0,08  | 23,0–28,0 | 2,5–5,0  | 1,0–2,0  | –         | 1,00      | –         | –         |
| **                              | S31500  | 1.4424 | 0,03  | 18,0–19,0 | 4,3–5,2  | 2,5–3,0  | 0,05–0,1  | –         | –         | –         |
|                                 | S32404  |        | 0,04  | 20,5–22,5 | 5,5–8,5  | 2,0–3,0  | 0,20      | 2,00      | 1,0–2,0   | –         |
| Gradi della seconda generazione |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
| Lean                            |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
|                                 | S32001  | 1.4482 | 0,03  | 19,5–21,5 | 1,0–3,0  | 0,6      | 0,05–0,17 | 4,0–6,0   | 1,0       | –         |
|                                 | S32101  | 1.4162 | 0,04  | 21,0–22,0 | 1,35–1,7 | 0,1–0,8  | 0,20–0,25 | 4,0–6,0   | 0,1–0,8   | –         |
|                                 | S32202  | 1.4062 | 0,03  | 21,5–24,0 | 1,0–2,8  | 0,45     | 0,18–0,26 | 2,00      | –         | –         |
|                                 | S82011  |        | 0,03  | 20,5–23,5 | 1,0–2,0  | 0,1–1,0  | 0,15–0,27 | 2,0–3,0   | 0,5       | –         |
| 2304                            | S32304  | 1.4362 | 0,03  | 21,5–24,5 | 3,0–5,5  | 0,05–0,6 | 0,05–0,20 | 2,50      | 0,05–0,60 | –         |
|                                 |         | 1.4655 | 0,03  | 22,0–24,0 | 3,5–5,5  | 0,1–0,6  | 0,05–0,20 | 2,00      | 1,0–3,0   | –         |
| Standard                        |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
|                                 | S32003  |        | 0,03  | 19,5–22,5 | 3,0–4,0  | 1,5–2,0  | 0,14–0,20 | 2,00      | –         | –         |
| 2205                            | S31803  | 1.4462 | 0,03  | 21,0–23,0 | 4,5–6,5  | 2,5–3,5  | 0,08–0,20 | 2,00      | –         | –         |
| 2205                            | S32205  | 1.4462 | 0,03  | 22,0–23,0 | 4,5–6,5  | 3,0–3,5  | 0,14–0,20 | 2,00      | –         | –         |
| 25 % Cr                         |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
|                                 | S31200  |        | 0,03  | 24,0–26,0 | 5,5–6,5  | 1,2–2,0  | 0,14–0,20 | 2,00      | –         | –         |
|                                 | S31260  |        | 0,03  | 24,0–26,0 | 5,5–7,5  | 2,5–3,5  | 0,10–0,30 | 1,00      | 0,2–0,8   | 0,1–0,5   |
|                                 | S32506  |        | 0,03  | 24,0–26,0 | 5,5–7,2  | 3,0–3,5  | 0,08–0,20 | 1,00      | –         | 0,05–0,30 |
|                                 | S32520  | 1.4507 | 0,03  | 24,0–26,0 | 5,5–8,0  | 3,0–4,0  | 0,20–0,35 | 1,50      | 0,5–2,0   | –         |
| 255                             | S32550  | 1.4507 | 0,04  | 24,0–27,0 | 4,5–6,5  | 2,9–3,9  | 0,10–0,25 | 1,50      | 1,5–2,5   | –         |
| Super duplex                    |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
| 2507                            | S32750  | 1.4410 | 0,03  | 24,0–26,0 | 6,0–8,0  | 3,0–5,0  | 0,24–0,32 | 1,20      | 0,5       | –         |
|                                 | S32760  | 1.4501 | 0,03  | 24,0–26,0 | 6,0–8,0  | 3,0–4,0  | 0,20–0,30 | 1,00      | 0,5–1,0   | 0,5–1,0   |
|                                 | S32808  |        | 0,03  | 27,0–27,9 | 7,0–8,2  | 0,8–1,2  | 0,30–0,40 | 1,10      | –         | 2,1–2,5   |
|                                 | S32906  |        | 0,03  | 28,0–30,0 | 5,8–7,5  | 1,5–2,6  | 0,30–0,40 | 0,80–1,5  | 0,8       | –         |
|                                 | S32950  |        | 0,03  | 26,0–29,0 | 3,5–5,2  | 1,0–2,5  | 0,15–0,35 | 2,00      | –         | –         |
|                                 | S39274  |        | 0,03  | 24,0–26,0 | 6,8–8,0  | 2,5–3,5  | 0,24–0,32 | 1,0       | 0,2–0,8   | 1,5–2,5   |
|                                 | S39277  |        | 0,025 | 24,0–26,0 | 6,5–8,0  | 3,0–4,0  | 0,23–0,33 | 0,80      | 1,2–2,0   | 0,8–1,2   |
|                                 |         | 1.4477 | 0,03  | 28,0–30,0 | 5,8–7,5  | 1,5–2,6  | 0,30–0,40 | 0,80–1,50 | ≤0,8      | –         |
| Hyper duplex                    |         |        |       |           |          |          |           |           |           |           |
|                                 | S32707  |        | 0,03  | 26,0–29,0 | 5,5–9,5  | 4,0–5,0  | 0,30–0,50 | 1,50      | 1,0       | –         |
|                                 | S33207  |        | 0,03  | 29,0–33,0 | 6,0–9,0  | 3,0–5,0  | 0,40–0,60 | 1,50      | 1,0       | –         |

| Grado                                               | UNS No. | EN No. | C    | Cr        | Ni        | Mo        | N         | Mn   | Cu        | W       |
|-----------------------------------------------------|---------|--------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|-----------|---------|
| <b>Acciai inossidabili austenitici semilavorati</b> |         |        |      |           |           |           |           |      |           |         |
| 304L                                                | S30403  | 1.4307 | 0,03 | 17,5–19,5 | 8,0–12,0  | –         | 0,10      | 2,00 | –         | –       |
| 316L                                                | S31603  | 1.4404 | 0,03 | 16,0–18,0 | 10,0–14,0 | 2,0–3,0   | 0,10      | 2,00 | –         | –       |
| 317L                                                | S31703  | 1.4438 | 0,03 | 18,0–20,0 | 11,0–15,0 | 3,0–4,0   | 0,10      | 2,00 | –         | –       |
| 317LMN                                              | S31726  | 1.4439 | 0,03 | 17,0–20,0 | 13,5–17,5 | 4,0–5,0   | 0,10–0,20 | 2,00 | –         | –       |
| 904L                                                | N08904  | 1.4539 | 0,02 | 19,0–23,0 | 23,0–28,0 | 4,0–5,0   | 0,10      | 2,00 | 1,0–2,0   | –       |
| <b>Fusioni in acciaio inossidabile duplex</b>       |         |        |      |           |           |           |           |      |           |         |
| CD4MCu<br>Grade 1A                                  | J93370  |        | 0,04 | 24,5–26,5 | 4,75–6,0  | 1,75–2,25 | –         | 1,00 | 2,75–3,25 | –       |
| CD4MCuN<br>Grade 1B                                 | J93372  |        | 0,04 | 24,5–26,5 | 4,7–6,0   | 1,7–2,3   | 0,10–0,25 | 1,00 | 2,7–3,3   | –       |
| CD3MCuN<br>Grade 1C                                 | J93373  |        | 0,03 | 24,0–26,7 | 5,6–6,7   | 2,9–3,8   | 0,22–0,33 | 1,20 | 1,4–1,9   | –       |
| CE8MN<br>Grade 2A                                   | J93345  |        | 0,08 | 22,5–25,5 | 8,0–11,0  | 3,0–4,5   | 0,10–0,30 | 1,00 | –         | –       |
| CD6MN<br>Grade 3A                                   | J93371  |        | 0,06 | 24,0–27,0 | 4,0–6,0   | 1,75–2,5  | 0,15–0,25 | 1,00 | –         | –       |
| CD3MN<br>Cast 2205<br>Grade 4A                      | J92205  |        | 0,03 | 21,0–23,5 | 4,5–6,5   | 2,5–3,5   | 0,10–0,30 | 1,50 | –         | –       |
| CE3MN<br>Cast 2507<br>Grade 5A                      | J93404  | 1.4463 | 0,03 | 24,0–26,0 | 6,0–8,0   | 4,0–5,0   | 0,10–0,30 | 1,50 | –         | –       |
| CD3MWCuN<br>Grade 6A                                | J93380  |        | 0,03 | 24,0–26,0 | 6,5–8,5   | 3,0–4,0   | 0,20–0,30 | 1,00 | 0,5–1,0   | 0,5–1,0 |
| <b>Fusioni in acciai inossidabile austenitico</b>   |         |        |      |           |           |           |           |      |           |         |
| CF3<br>(cast 304L)                                  | J92500  | 1.4306 | 0,03 | 17,0–21,0 | 8,0–12,0  | –         | –         | 1,50 | –         | –       |
| CF3M<br>(cast 316L)                                 | J92800  | 1.4404 | 0,03 | 17,0–21,0 | 9,0–13,0  | 2,0–3,0   | –         | 1,50 | –         | –       |

\* Massimo, a meno che non sia riportato un intervallo o un valore minimo.

– Non definito nelle specifiche.

\*\* Questo grado fu prodotto originariamente con uno specifico tenore di azoto; senza tale addizione, sarebbe stato da considerare un duplex della prima generazione.

## 3 Composizione chimica e funzione degli elementi di lega

### 3.1 Composizione chimica degli acciai inossidabili duplex

E' opinione diffusa che per gli acciai inox duplex si raggiungano proprietà ottimali quando il bilanciamento delle fasi tra ferrite ed austenite è compreso tra il 30 % ed il 70 %. Tuttavia, si ritiene comunemente che gli acciai inossidabili duplex abbiano indicativamente le stesse quantità di ferrite ed austenite, con una leggera prevalenza di quest'ultima nei gradi commerciali per favorire la tenacità e la lavorabilità. Le interazioni tra i principali elementi di lega, principalmente cromo, molibdeno, azoto e nichel sono piuttosto complesse. Per ottenere una microstruttura bifasica stabile che risponda correttamente alle procedure di fabbricazione è necessario porre attenzione ad ottenere il corretto tenore di questi elementi.

Oltre al bilanciamento delle fasi, un secondo punto essenziale riguarda gli acciai inossidabili duplex e la loro analisi chimica: la formazione ad elevata temperatura di dannose fasi intermetalliche. Le fasi sigma e chi si formano in acciai con elevati tenori di cromo e molibdeno e precipitano preferenzialmente nella matrice ferritica. L'aggiunta di azoto ritarda significativamente la formazione di queste fasi. Di conseguenza, è essenziale che sia presente in soluzione solida una sufficiente quantità di azoto. L'importanza di intervalli ridotti per i valori della composizione chimica è stata evidente con il crescente impiego degli inossidabili duplex. Gli intervalli per la composizione chimica definiti inizialmente per il grado 2205 (UNS S31803, Prospetto 1) si rivelarono troppo ampi. L'esperienza dimostra che per ottenere una resistenza alla corrosione ottimale e per evitare la precipitazione di fasi intermetalliche i tenori di cromo, molibdeno ed azoto devono essere tenuti per il grado UNS S31803 nella metà superiore dei rispettivi intervalli. Di conseguenza, fu introdotto un grado 2205 modificato con la classificazione UNS S32205 (Prospetto 1). La composizione del UNS S32205 è tipica dell'attuale produzione commerciale del grado 2205. Salvo diversamente specificato nella presente pubblicazione, il 2205 fa riferimento alla composizione del grado UNS S32205.

### 3.2 Funzione degli elementi di lega negli acciai inossidabili duplex

Quella che segue è una breve rassegna dell'effetto dei principali elementi di lega nei confronti delle proprietà meccaniche, fisiche e della resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili duplex.

**Cromo:** un tenore di cromo pari ad almeno il 10,5 % è necessario per formare uno strato di passivazione superficiale stabile, sufficiente a preservare l'acciaio dalla corrosione atmosferica. La resistenza alla corrosione di un acciaio inossidabile aumenta all'aumentare del tenore di cromo. Il cromo è un elemento ferritizzante, ossia favorisce la formazione di microstrutture cubiche a corpo centrato nel ferro. In presenza di elevati tenori di cromo è necessario più nichel per ottenere una microstruttura austenitica o austeno-ferritica (duplex). Maggiori tenori di cromo favoriscono inoltre la formazione di fasi intermetalliche. Di norma, è presente almeno il 16 % di cromo negli acciai inossidabili austenitici ed il 20 % in quelli duplex. Il cromo incrementa inoltre la resistenza all'ossidazione ad alta temperatura. Quest'ultimo effetto è importante in relazione alla formazione ed alla rimozione di ossidi grossolani durante i trattamenti termici o la saldatura. Gli acciai duplex sono più difficili da decapare e la rimozione dei cosiddetti colori di ossidazione è più difficile rispetto agli acciai inossidabili austenitici.

**Molibdeno:** il molibdeno coadiuva l'effetto del cromo nella resistenza a vaiolatura degli acciai inossidabili. Se il tenore di cromo è almeno il 18 %, aggiunte di molibdeno risultano più efficaci di quelle di cromo di oltre tre volte in relazione alla resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale in ambienti clorurati. Il molibdeno è ferritizzante ed aumenta inoltre la tendenza dell'acciaio inossidabile a formare dannose fasi intermetalliche. Di conseguenza, il suo tenore è di norma limitato al 7,5 % negli acciai inossidabili austenitici e al 4 % in quelli duplex.

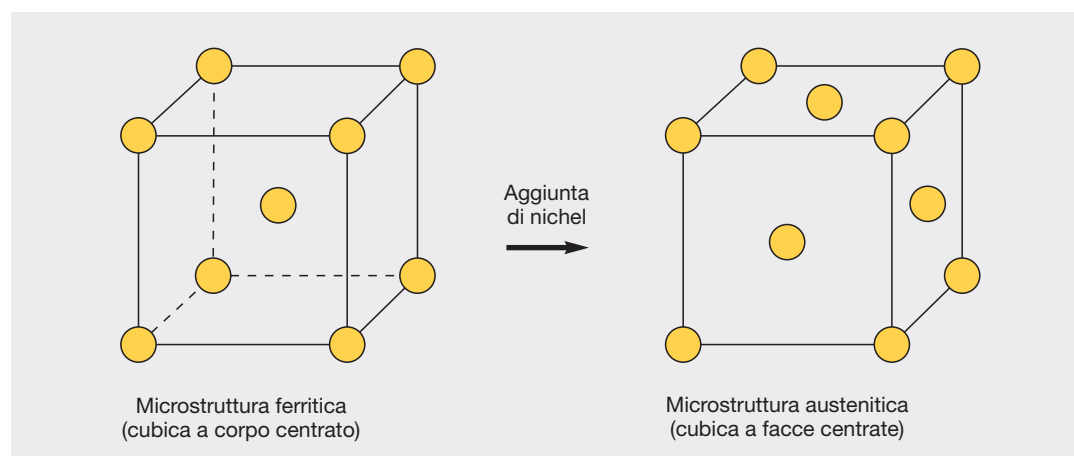
**Azoto:** l'azoto aumenta la resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale degli acciai inossidabili austenitici e duplex. Esso aumenta inoltre significativamente la loro resistenza e, di fatto, rappresenta l'elemento di lega sostituzionale più efficace ed economico. La maggiore tenacità degli acciai duplex contenenti azoto è dovuta al loro maggiore tenore di austenite ed al ridotto tenore di fasi intermetalliche. L'azoto non previene la precipitazione di fasi intermetalliche ma ne ritarda la formazione a sufficienza per consentire le attività di fabbricazione con acciai duplex. L'azoto è aggiunto negli acciai inossidabili austenitici e duplex ad elevata resistenza alla corrosione contenenti elevati tenori di cromo e molibdeno per contrastarne la tendenza alla formazione di fase sigma.

L'azoto è un forte austenitizzante e può sostituire in qualche misura il nichel negli acciai inossidabili austenitici. L'azoto riduce inoltre l'energia di impilamento dei difetti reticolari ed incrementa la velocità di incrudimento dell'austenite.

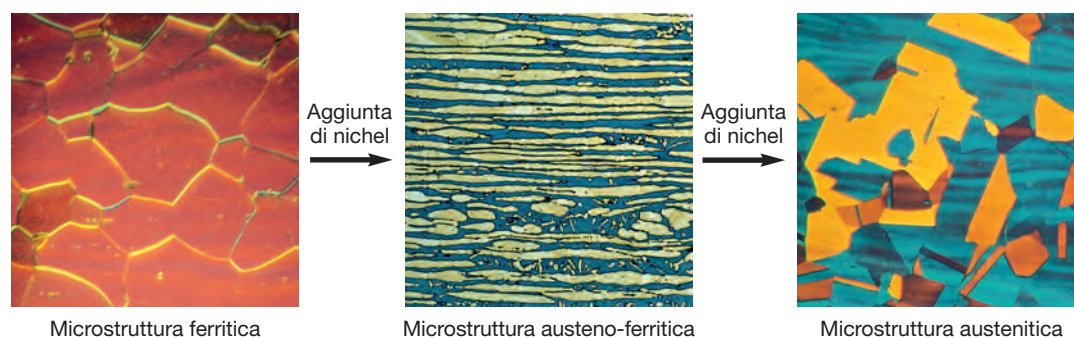
Esso aumenta pure la resistenza dell'austenite per soluzione solida nella matrice. Negli acciai duplex, l'azoto è di norma presente ed il tenore di nichel viene regolato di conseguenza per ottenere il voluto bilanciamento delle fasi. I ferritizzanti, cromo e molibdeno, sono bilanciati rispetto agli austenitizzanti, nichel ed azoto, per ottenere la struttura bifasica.

**Nichel:** il nichel è un austenitizzante che favorisce la trasformazione della microstruttura cubica a corpo centrato (ferritica) degli acciai in cubica a facce centrate (austenitica). Gli acciai inossidabili ferritici contengono ridotti o nulli tenori di nichel, gli acciai duplex contengono tenori di nichel ridotti o medi tra 1,5 % e 7 %, mentre gli acciai inossidabili austenitici

della serie 300 contengono almeno il 6 % di nichel (vedere figure 1 e 2). L'aggiunta di nichel ritarda la formazione di dannose fasi intermetalliche negli acciai inossidabili austenitici ma è di gran lunga meno efficace nel differire la loro precipitazione negli acciai duplex. La microstruttura cubica a facce centrate è responsabile dell'eccellente tenacità degli acciai inossidabili austenitici. La sua presenza nella metà circa della microstruttura degli acciai duplex aumenta fortemente la loro tenacità in paragone agli acciai inossidabili ferritici.



**Figura 1:** Aggiungendo nichel, la microstruttura cristallina si trasforma da cubica a corpo centrato (con poco o zero nichel) a cubica a facce centrate (con almeno il 6 % di nichel – serie 300). Gli acciai duplex, con i loro tenori di nichel intermedi, hanno una microstruttura in cui alcuni grani sono ferritici ed altri austenitici, idealmente in eguali proporzioni (Figura 2).



**Figura 2:** Aumentando il tenore di nichel, la microstruttura cristallina di un acciaio inossidabile si trasforma da ferritica (a sinistra) ad austeno-ferritica (al centro) ad austenitica (a destra) (Queste figure, per gentile concessione di Outokumpu, sono riferite a campioni lucidati ed attaccati, ingranditi con un microscopio ottico. Nella microstruttura austeno-ferritica, la ferrite è stata colorata, quindi appare come la fase più scura.)

## 4 Metallurgia degli acciai inossidabili duplex

Il diagramma di stato ternario ferro-nichel-cromo è uno strumento utile per comprendere la metallurgia degli acciai inossidabili duplex. Una sezione ottenuta al 68 % di ferro (Figura 3) indica che queste leghe solidificano in fase ferritica ( $\alpha$ ), parte della quale si trasforma quindi in austenite ( $\gamma$ ) non appena la temperatura scende intorno a 1000 °C (1832 °F), in funzione della composizione chimica. Vi è un ulteriore piccolo cambiamento nell'equilibrio tra ferrite ed austenite a temperature inferiori. L'effetto dell'aumento dell'azoto è indicato in Figura 3 (Rif. 1). Termodinamicamente, dato che l'austenite si separa dalla ferrite, risulta impossibile per la lega superare le condizioni di equilibrio dell'austenite. Tuttavia, mano a mano che il raffreddamento continua a temperature minori, carburi, nitruri, fase sigma ed altre fasi intermetalliche possono divenire possibili componenti microstrutturali.

Le proporzioni relative tra ferrite ed austenite presenti in un semilavorato o durante la fabbricazione dipendono dalla composizione chimica e dalla storia termica dell'acciaio. Piccoli cambiamenti nella composizione possono avere un effetto importante nella proporzione relativa di queste fasi, come dimostra il diagramma di stato. La tendenza di singoli elementi di lega a stabilizzare la fase austenitica o quella ferritica si esplica in modo ragionevolmente chiaro negli acciai duplex. Il bilanciamento tra microstruttura ferritica ed austenitica può essere stimato quantitativamente con le seguenti relazioni lineari:

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + 1,73 \% \text{Si} + 0,88 \% \text{Mo}$$

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 24,55 \% \text{C} + 21,75 \% \text{N} + 0,4 \% \text{Cu}$$

$$\% \text{ Ferrite} = -20,93 + 4,01 \text{Cr}_{\text{eq}} - 5,6 \text{Ni}_{\text{eq}} + 0,016 T$$

In cui T (in gradi Celsius) è la temperatura di ricottura nell'intervallo 1050–1150 °C e le composizioni chimiche sono espresse in massa % (Rif. 2). L'obiettivo di mantenere il desiderato bilanciamento delle fasi è ottenuto in primo luogo regolando i tenori di cromo, molibdeno, nichel ed azoto, quindi dal controllo della storia termica. Tuttavia, dato che la velocità di raffreddamento determina la quantità di ferrite che può trasformarsi in austenite, le velocità di raffreddamento dopo il mantenimento ad alta temperatura influenzano il bilanciamento delle fasi. Dato che raffreddamenti severi favoriscono la presenza di ferrite, appare possibile ottenere quantità di ferrite maggiori rispetto a quelle all'equilibrio. Ad esempio, un ridotto apporto termico di saldatura e spessori di parete elevati possono comportare eccessivi valori di ferrite nella zona termicamente alterata (ZTA).

Un altro effetto positivo dell'azoto, mostrato in Figura 3, è l'aumento della temperatura alla quale l'austenite inizia a formarsi dalla ferrite. Ciò aumenta la quantità complessiva di austenite trasformata dalla ferrite. Di conseguenza, anche con velocità di raffreddamento relativamente elevate, le condizioni di equilibrio per la trasformazione austenitica possono essere raggiunte. Nella seconda generazione di acciai inossidabili duplex, questo effetto riduce il problema dell'eccesso di ferrite in ZTA.

Dato che la fase sigma precipita a temperature inferiori a quella di trasformazione della ferrite, durante il raffreddamento (Figura 4), l'obiettivo di evitare tale precipitazione nei semilavorati è raggiunto controllando la temperatura di ricottura ed assicurando che l'acciaio sia raffreddato il più rapidamente possibile dalla temperatura di ricottura per prevenire la formazione di fase sigma durante il raffreddamento. La velocità di raffreddamento necessaria è molto elevata, tanto da richiedere il raffreddamento in acqua. Solo in caso di saldatura tra parti aventi spessori molto diversi oppure di elevati spessori di parete con apporti termici molto ridotti si possono avere velocità di raffreddamento troppo elevate in fase di fabbricazione.

Anche la fase  $\alpha'$  è stabile negli acciai inossidabili duplex, dato che si forma nella matrice ferritica intorno a 525 °C (950 °F) circa nella stessa maniera con cui si forma nelle leghe a matrice completamente ferritica. La fase alfa primo ( $\alpha'$ ) è la causa della diminuzione della tenacità a temperatura ambiente negli acciai inossidabili ferritici a circa 475 °C (885 °F); questo fenomeno è conosciuto come infragilimento a 475 °C/885 °F.

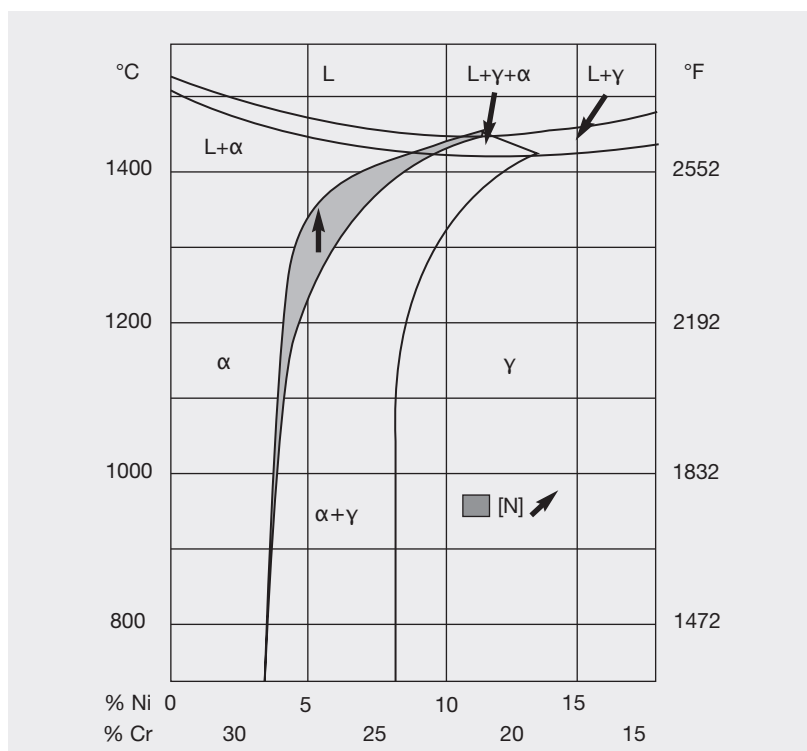
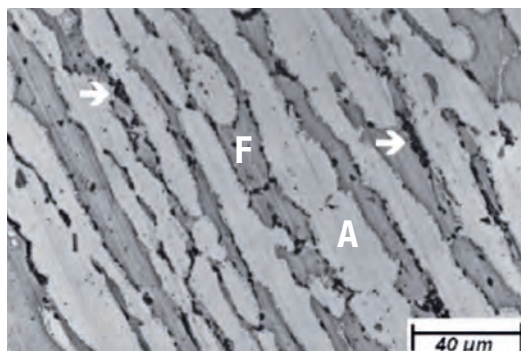


Figura 3: Sezione del diagramma ternario Fe-Cr-Ni al 68 % di ferro (piccole variazioni del tenore di nichel e di cromo hanno una forte influenza nei confronti della quantità di austenite e ferrite degli acciai inossidabili duplex)

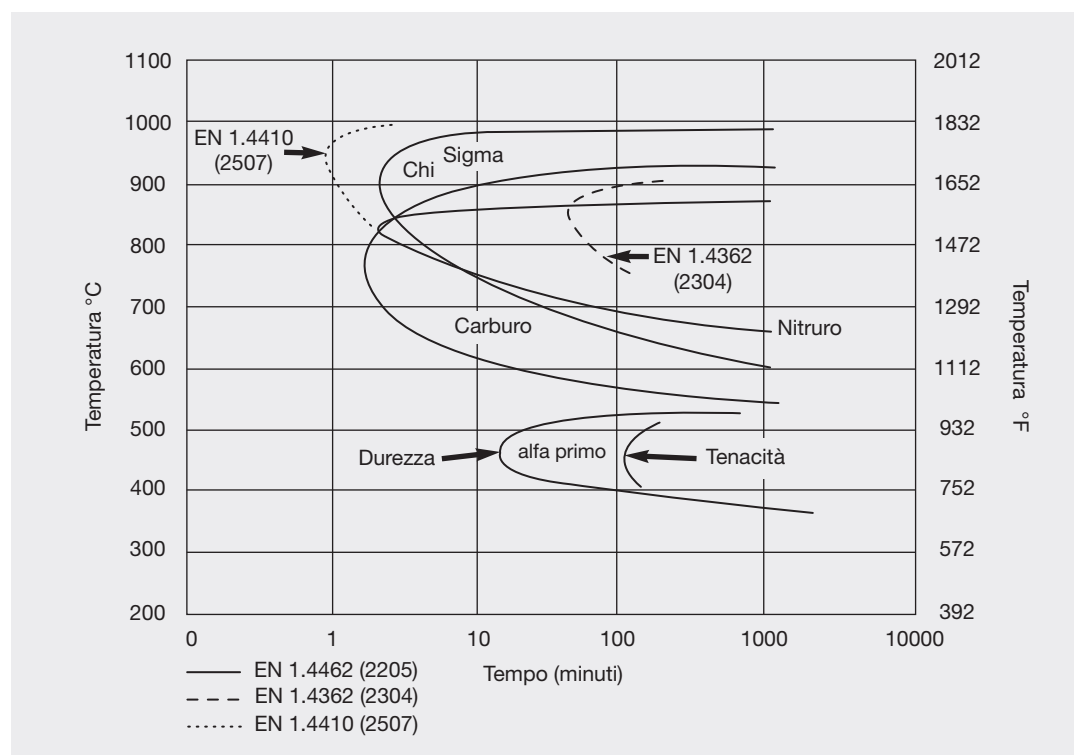
L'uso di azoto come elemento di lega in questi acciai inossidabili comporta la possibilità di avere nitruri di cromo in prossimità del bordo grano ferritico e all'interfaccia tra grani ferritici ed austenitici nelle zone termicamente alterate dei giunti saldati. Se formati in elevate quantità ed in condizioni in cui le aree impoverite di cromo non hanno tempo per omogeneizzarsi durante la ricottura, questi nitruri di cromo possono peggiorare la resistenza alla corrosione. Tuttavia, dato che maggiori tenori di azoto favoriscono la stabilità dell'austenite, nella quale l'azoto ha una forte solubilità, gli acciai inossidabili duplex di seconda generazione contengono solo in alcuni casi significativi tenori di nitruri di cromo. D'altra parte, gli acciai inossidabili duplex di seconda generazione sono fatti con tenori di carbonio molto contenuti in modo da evitare la dannosa precipitazione di carburi. La dannosa fase sigma, alfa primo ( $\alpha'$ ), carburi e nitruri possono precipitare nel volgere di pochi minuti a determinate temperature. Di conseguenza, i trattamenti termici richiesti per la produzione e le attività di fabbricazione, come anche i cicli termici in esercizio, devono tenere debitamente in considerazione la cinetica delle trasformazioni di fase per garantire l'ottenimento delle desiderate resistenza alla corrosione e proprietà meccaniche. Questi gradi duplex sono stati sviluppati per ottimizzare la resistenza alla corrosione e ritardare le reazioni di precipitazione a sufficienza per consentire l'esecuzione corretta delle previste sequenze di fabbricazione.

Un diagramma di precipitazione di tipo isoterma per gli acciai inossidabili duplex tipo EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205) e EN 1.4410 (2507) è mostrato in



**Figura 4:** Microstruttura di un campione di EN 1.4462 (2205) trattato ad 850 °C (1560 °F) per 40 minuti con precipitazione di fase sigma (frecce) in corrispondenza dei bordi grano tra ferrite ed austenite. La fase ferritica (F) appare più scura rispetto a quella austenitica (A) nella micrografia (Rif. 3).

**Figura 5** (Rif. 4, 5, 6, 7). L'inizio della precipitazione di nitruri di cromo si verifica nel tempo relativamente breve di 1–2 minuti alle temperature indicate. Il fenomeno si verifica più lentamente rispetto agli acciai ferritici oppure agli acciai alto legati austenitici ed è dovuto, almeno in parte, all'elevata solubilità di carbonio ed azoto nella fase austenitica a ridotto tenore di nichel e verosimilmente all'effetto di ritardo svolto dall'azoto nei confronti della precipitazione di carburi. Come risultato, i gradi duplex sono relativamente resistenti alla sensibilizzazione in fase di raffreddamento. Le cinetiche di precipitazione di carburi e nitruri sono influenzate marginalmente in questi gradi da cromo, molibdeno e nichel, così tutti



**Figura 5:** Diagramma di precipitazione isoterma per acciai inossidabili tipo EN 1.4462 (2205), ricottura a 1050 °C (1920 °F). (Gli acciai duplex tipo EN 1.4362 (2304) e EN 1.4410 (2507) sono indicati a titolo di paragone.)



**Raccordi di acciaio inossidabile duplex EN 1.4462 (2205)**  
(Fonte: Swagelok)

gli acciai inossidabili duplex legati con azoto hanno cinetiche analoghe al tipo EN 1.4462 (2205) nei confronti di questi precipitati. La precipitazione di fase sigma e chi si verifica a temperature leggermente superiori ma in tempi simili alla precipitazione di carburi e nitruri.

I gradi duplex maggiormente legati con cromo, molibdeno e nichel tendono ad avere cinetiche di precipitazione di fase sigma e chi più rapide rispetto al tipo EN 1.4462 (2205), mentre gradi con tenori inferiori di questi elementi hanno il comportamento opposto. Questo effetto è illustrato dal diagramma indicato in Figura 5 con linea tratteggiata, in cui si nota una formazione di fase sigma e chi più rapida nel tipo EN 1.4410 (2507), maggiormente legato, e più lenta nel tipo EN 1.4362 (2304), meno legato.

La fase alfa primo precipita nella matrice ferritica ed i suoi effetti comportano un indurimento ed un infragilimento della ferrite. Per fortuna, dato che gli acciai duplex contengono circa il 50 % di austenite, tali effetti di indurimento e di infragilimento non sono così gravi come nel caso degli acciai ferritici. La diminuzione di tenacità (infragilimento) dovuta alla precipitazione di fase alfa primo avviene più lentamente rispetto alla velocità di indurimento (Figura 5). L'infragilimento dovuto alla fase alfa primo è solo raramente un problema in fase di fabbricazione, a causa delle lunghe tempistiche che la caratterizzano. Tuttavia, il limite superiore alle temperature di esercizio è vincolato appunto dalla formazione di fase alfa primo.

Poiché l'esposizione ad alta temperatura, per tempi prolungati, può comportare una diminuzione della tenacità a temperatura ambiente, i codici di progettazione di apparecchi in pressione stabiliscono limiti alle massime di progetto ammissibili in funzione delle temperature. Il codice del TÜV tedesco distingue tra particolari saldati e non saldati e risulta più conservativo rispetto al codice ASME Boiler and Pressure Vessel Code per le limitazioni alle massime temperature. I limiti alle massime temperature previsti dai codici di progettazione per apparecchi in pressione per vari acciai duplex sono riportati nel Prospetto 2.

Il **Prospetto 3** riassume una serie di importanti fenomeni di precipitazione ed i limiti di temperatura per acciai inossidabili duplex.

**Prospetto 2: Limiti superiori di temperatura per acciai inossidabili duplex per i valori delle massime tensioni ammissibili dei codici di progettazione di apparecchiature in pressione.**

| Grado            | Stato di fornitura                      | ASME |     | TÜV |     |
|------------------|-----------------------------------------|------|-----|-----|-----|
|                  |                                         | °C   | °F  | °C  | °F  |
| EN 1.4362 (2304) | Non saldato                             | 315  | 600 | 300 | 570 |
| EN 1.4362 (2304) | Saldato con materiale d'apporto omologo | 315  | 600 | 300 | 570 |
| EN 1.4362 (2304) | Saldato con 2205/2209                   | 315  | 600 | 250 | 480 |
| EN 1.4462 (2205) | Non saldato                             | 315  | 600 | 280 | 535 |
| EN 1.4462 (2205) | Saldato                                 | 315  | 600 | 250 | 480 |
| EN 1.4410 (2507) | Tubi senza saldatura                    | 315  | 600 | 250 | 480 |
| Lega 255         | Saldato o non saldato                   | 315  | 600 |     |     |

**Prospetto 3: Temperature caratteristiche per la precipitazione ed altri fenomeni tipici degli acciai inossidabili duplex**

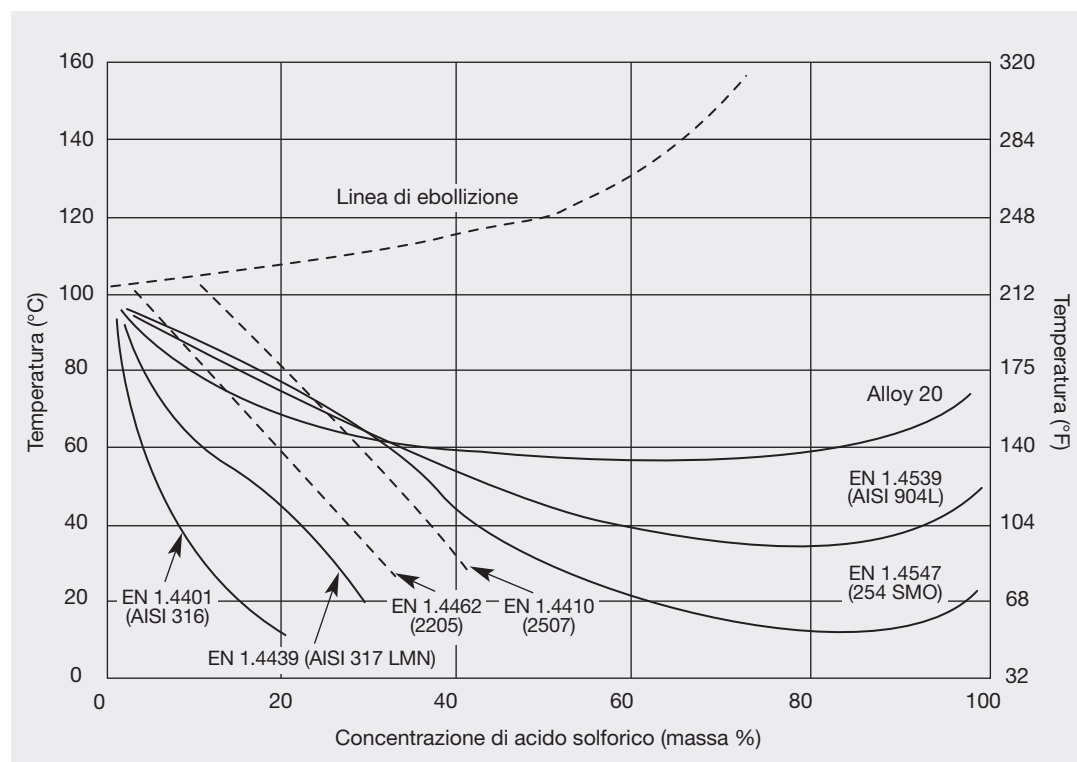
|                                    | EN 1.4462 (2205) |                | EN 1.4410 (2507) |                |
|------------------------------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
|                                    | °C               | °F             | °C               | °F             |
| Intervallo di solidificazione      | Da 1470 a 1380   | Da 2680 a 2515 | Da 1450 a 1350   | Da 2640 a 2460 |
| Temperatura di ossidazione in aria | 1000             | 1830           | 1000             | 1830           |
| Formazione di fase sigma           | Da 700 a 950     | Da 1300 a 1740 | Da 700 a 1000    | Da 1300 a 1830 |
| Precipitazione di carburi          | Da 450 a 800     | Da 840 a 1470  | Da 450 a 800     | Da 840 a 1470  |
| Infragilimento a 475 °C/885 °F     | Da 300 a 525     | Da 575 a 980   | Da 300 a 525     | Da 575 a 980   |

## 5 Resistenza alla corrosione

Gli acciai inossidabili duplex vantano un'elevata resistenza alla corrosione nella maggior parte di condizioni in cui sono utilizzati i gradi austenitici. Tuttavia, vi sono alcune significative eccezioni, in cui essi risultano nettamente superiori. Ciò è dovuto al loro elevato tenore di cromo, che produce effetti positivi in presenza di acidi ossidanti, così come adeguati tenori di molibdeno e di nichel garantiscono resistenza in ambienti acidi mediamente riducenti. I tenori di cromo, molibdeno ed azoto relativamente alti conferiscono loro anche resistenza nei confronti della vaiolatura da cloruri e della corrosione interstiziale. La loro struttura bifasica è un vantaggio in ambienti in grado di promuovere criccabilità da tensocorrosione. Se la microstruttura contiene almeno dal 25 al 35 % di ferrite, gli acciai duplex sono molto più resistenti alla criccabilità da tensocorrosione da cloruri rispetto agli austenitici tipo EN 1.4301 (AISI 304) o EN 1.4401 (AISI 316). La ferrite, tuttavia, è sensibile all'infragilimento da idrogeno. Ne deriva che gli acciai inossidabili duplex non hanno una particolare resistenza in ambienti o applicazioni in cui l'idrogeno può diffondere nella matrice, causandone l'infragilimento.

### 5.1 Resistenza agli acidi

Per illustrare la resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili duplex in ambienti fortemente acidi, la **Figura 6** presenta dati relativi alla loro corrosione in soluzioni di acido solforico. Questo ambiente varia tra condizioni mediamente riducenti, con basse concentrazioni di acido, ad ossidanti per alte concentrazioni, con un intervallo intermedio avente comportamento fortemente riducente, in soluzioni ad elevata ed elevatissima temperatura. Tanto il tipo EN 1.4462 (2205) che il tipo EN 1.4410 (2507) superano le prestazioni di molti acciai inossidabili austenitici ad alto nichel in soluzioni contenenti circa il 15 % di acido. Essi sono migliori dei tipi EN 1.4401 (AISI 316) o AISI 317 in presenza di almeno il 40 % di acido. I gradi duplex possono inoltre essere utili in acidi di questo tipo, contenenti cloruri. Gli acciai duplex non hanno abbastanza nichel per resistere alle condizioni fortemente riducenti delle soluzioni di acido solforico a media concentrazione o cloridrico. In ambienti riducenti, in corrispondenza della linea di bagnasciuga, dove vi sono elevate concentrazioni di acido, si può avere corrosione, specialmente della ferrite, e la sua rapida propagazione. La loro resistenza ad ambienti ossidanti rende i duplex buoni candidati in presenza di servizio con acido nitrico ed acidi organici forti.



**Figura 6:** Corrosione in acido solforico non areato, 0,1 mm/anno (0,004 pollici/anno) diagramma isocorrosione (prove di laboratorio con acido solforico). (Fonte: dati del produttore, 254 SMO è un marchio registrato da Outokumpu)

Ciò è illustrato in **Figura 7** per soluzioni contenenti il 50 % di acido acetico e variando la quantità di acido formico e le loro temperature di ebollizione. Benché i tipi EN 1.4301 (AISI 304) e EN 1.4401 (AISI 316) possano affrontare questi acidi organici a temperatura ambiente o a modesta temperatura, il tipo EN 1.4462 (2205) ed altri duplex sono superiori in molti processi che coinvolgono acidi organici ad alta temperatura. Gli acciai inossidabili duplex sono anche utilizzati in processi che prevedono idrocarburi alogenati per via della loro resistenza alla vaiolatura e alla tensocorrosione.

## 5.2 Resistenza in ambienti caustici

L'elevato tenore di cromo e la presenza di ferrite spiega le buone proprietà degli acciai duplex in ambienti caustici. A medie temperature, i ratei di corrosione sono inferiori rispetto ai gradi austenitici standard.

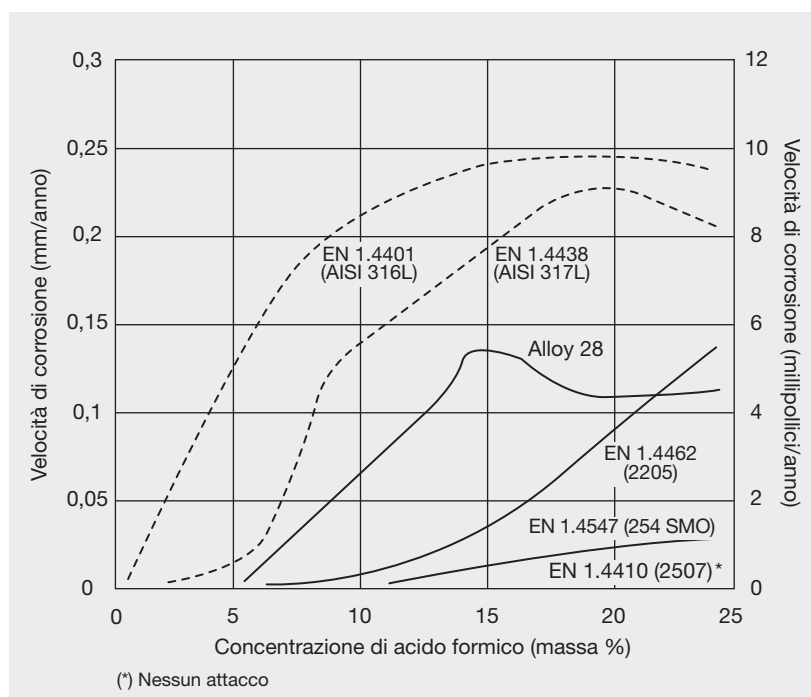
## 5.3 Resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale

Per analizzare la resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale degli acciai duplex è utile introdurre il concetto della temperatura critica di vaiolatura. Per un dato ambiente clorurato, ogni acciaio inossidabile può essere caratterizzato con una temperatura al di sopra della quale la corrosione per

vaiolatura si manifesta e si propaga in modo visibile nell'arco di 24 ore. Al di sotto di tale temperatura, la vaiolatura non si manifesta, anche in tempi indefinitamente lunghi. Questa temperatura è definita come temperatura critica di vaiolatura (CPT). Essa è una caratteristica di uno specifico grado di acciaio inossidabile e di un determinato ambiente. Dato che l'innescarsi della vaiolatura è un processo statisticamente casuale e considerata la sensibilità della CPT nei confronti di piccole variazioni dell'analisi chimica dell'acciaio o del prodotto, la CPT è di norma espressa per i vari gradi da un intervallo di temperature. Tuttavia, attraverso la procedura sperimentale descritta da ASTM G 150<sup>1</sup>, è possibile determinare con precisione ed affidabilità la CPT mediante misure elettrochimiche.

Esiste una temperatura simile per la corrosione interstiziale, chiamata temperatura critica di corrosione interstiziale (CCT). CCT è una funzione della specifica tipologia di acciaio inossidabile, dell'ambiente clorurato e della natura (lunghezza, profondità etc.) dell'interstizio. Data la dipendenza dalla geometria degli interstizi e la difficoltà di realizzare in pratica interstizi riproducibili, esiste una maggiore variabilità nella misura di CCT rispetto al caso della CPT. Tipicamente, la temperatura CCT varia da 15 °C a 20 °C (da 27 a 36 °F) al di sotto della temperatura CPT per lo stesso tipo di acciaio e lo stesso ambiente corrosivo.

Gli elevati tenori di cromo, molibdeno ed azoto degli acciai duplex ne favoriscono l'ottima resistenza alla corrosione da cloruri localizzata in ambienti acquosi. In funzione del tenore di elementi di lega, alcuni gradi di acciaio duplex sono tra i migliori acciai inossidabili per prestazioni. Per il loro relativamente alto tenore di cromo, gli acciai inossidabili duplex consentono un'elevata resistenza alla corrosione con costi contenuti. Un confronto della resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale per un certo numero di acciai inossidabili allo stato solubilizzato secondo ASTM G 48<sup>2</sup> (al 6 % di cloruro ferrico) è dato dalla **Figura 8**. Le temperature critiche per materiali allo stato saldato dovrebbero risultare in qualche modo inferiori. Maggiori temperature critiche di vaiolatura o di corrosione interstiziale indicano una maggiore resistenza allo sviluppo di queste forme di corrosione. La CPT e la CCT del tipo EN 1.4462 (2205) sono molto maggiori rispetto a quelle del tipo EN 1.4401 (AISI 316). Ciò rende il tipo EN 1.4462 (2205) un acciaio versatile in applicazioni in cui i cloruri sono concentrati dall'evaporazione, come nel caso delle zone occupate da vapore di scambiatori di calore o al di sotto dell'isolamento. La CPT del tipo EN 1.4462 (2205) indica che è in grado di affrontare acque salmastre ed acque saturate di sali. Esso è stato impiegato con successo in applicazioni acqua mare deareata in cui la superficie è stata mantenuta libera da depositi con alte portate o altri sistemi.



**Figura 7: Corrosione di acciai inossidabili duplex ed austenitici in soluzioni in ebollizione al 50 % di acido acetico e vari titoli di acido formico (Fonte: Sandvik)**

- 1 ASTM G 150 standard test method for electrochemical critical pitting temperature testing of stainless steels
- 2 ASTM G 48 standard test method for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by ferric chloride solution

Il tipo EN 1.4462 (2205) non possiede sufficiente resistenza alla corrosione interstiziale per operare con acqua mare in condizioni critiche, come ad esempio fasci tubieri di scambiatori di calore con piccoli spessori di parete o dove vi siano depositi o interstizi. Tuttavia, acciai inossidabili duplex più legati e con maggiore CCT rispetto al EN 1.4462 (2205), ad esempio i superduplex, sono stati impiegati in molte applicazioni critiche per servizio acqua mare, in cui sono richieste resistenza ai cloruri e resistenza meccanica, al tempo stesso.

Dato che la temperatura CPT dipende dal tipo di materiale e dallo specifico ambiente, è possibile studiare l'effetto di singoli elementi. Considerando la CPT come previsto da ASTM G 48 Practice A, è stata eseguita un'analisi di regressione alle composizioni degli acciai (considerando ogni elemento come variabile indipendente) e la relativa CPT (la variabile dipendente). Il risultato è stato che solo il cromo, il molibdeno, il tungsteno e l'azoto sembrarono avere un significativo e misurabile effetto nei confronti di CPT in accordo alla relazione:

$$\text{CPT} = \text{costante} + \% \text{ Cr} + 3,3 (\% \text{ Mo} + 0,5 \% \text{ W}) + 16 \% \text{ N}$$

In questa relazione, la somma delle variabili relative ai quattro elementi moltiplicata per i loro coefficienti di regressione è comunemente chiamata Pitting Resistance Equivalent Number (PREN). Il coefficiente per l'azoto varia a seconda dei ricercatori ed i valori più utilizzati sono 16, 22 e 30 (Rif. 8). Il PREN è utile per classificare i gradi nell'ambito di una specifica

famiglia di acciai. Tuttavia, occorre fare attenzione ad evitare sopravvalutazioni inappropriate con questa relazione. Le "variabili indipendenti" non erano in realtà totalmente indipendenti, dato che gli acciai provati avevano composizioni chimiche bilanciate. Le relazioni non sono lineari e le correlazioni, come ad esempio gli effetti sinergici di cromo e molibdeno, furono volutamente trascurati. La relazione è valida per un materiale processato secondo procedure ideali, ma non considera l'effetto di fasi intermetalliche, non metalliche o di errati trattamenti termici che possono influenzare negativamente la resistenza alla corrosione.

## 5.4 Resistenza alla tensocorrosione da cloruri

Alcuni dei primi impieghi degli acciai inossidabili duplex furono basati sulla loro resistenza alla cricabilità da tensocorrosione da cloruri (SCC). Se confrontati con acciai inossidabili austenitici con analoga resistenza alla vaiolatura ed alla corrosione interstiziale, gli acciai duplex possiedono una resistenza alla SCC notevolmente superiore. Molti degli impieghi degli acciai duplex nell'industria chimica di processo riguardano la sostituzione di gradi austenitici in applicazioni caratterizzate da un significativo rischio di SCC. Tuttavia, così come numerosi altri materiali, gli acciai inossidabili duplex possono essere soggetti a cricabilità da tensocorrosione in presenza di determinate condizioni. Ciò può avvenire in ambienti contenenti cloruri, ad elevata temperatura, oppure quando le condizioni favoriscono cricabilità indotta da idrogeno.

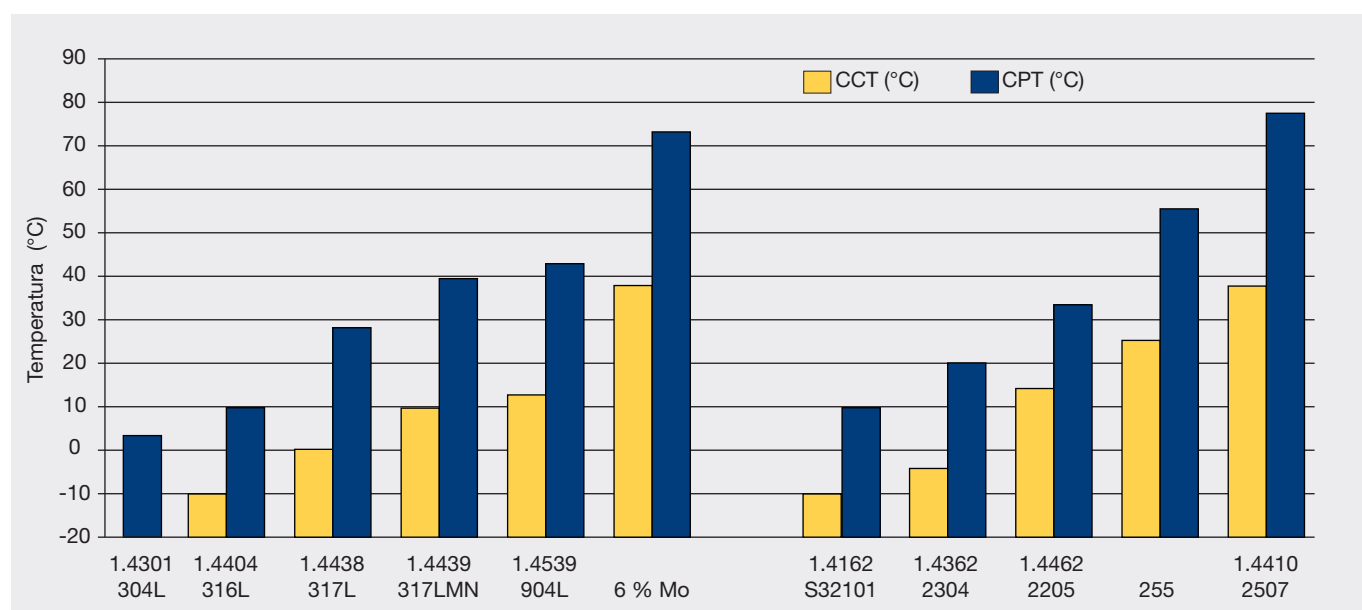


Figura 8: Temperature critiche di vaiolatura e di corrosione interstiziale per acciai inossidabili austenitici allo stato non saldato (a sinistra) ed acciai inossidabili duplex (a destra) allo stato solubilizzato (valutata al 6 % di cloruro ferrico secondo ASTM G 48)

Esempi di ambienti in cui è lecito attendersi SCC per gli acciai duplex comprendono la prova di evaporazione goccia a goccia con cloruro di magnesio in ebollizione al 42 %, ad alta temperatura del metallo, e l'esposizione di sistemi in pressione con soluzioni in acqua di cloruri a temperatura maggiore di quanto possibile in condizioni di pressione atmosferica.

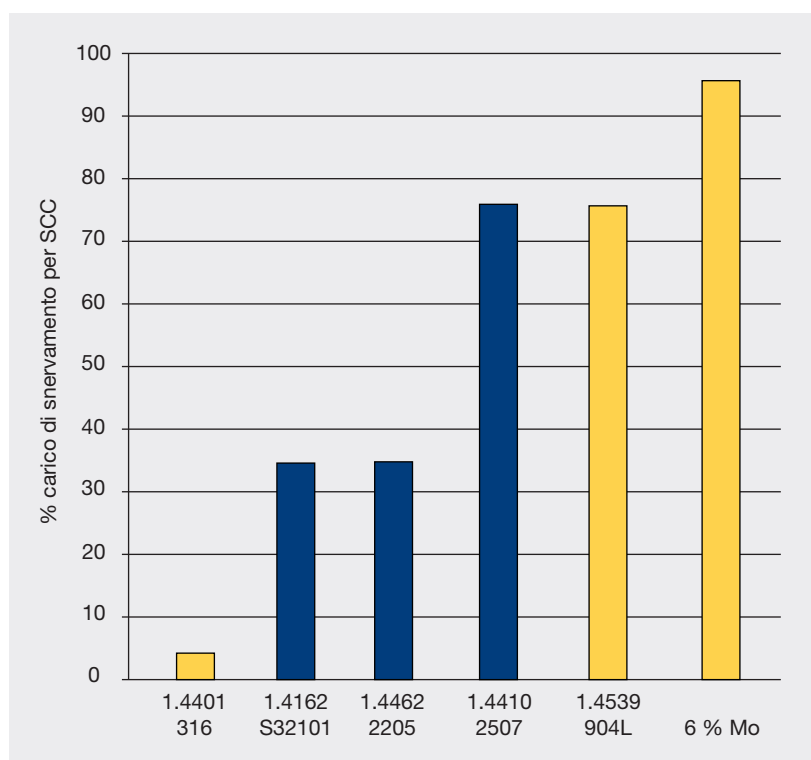
Una rappresentazione della resistenza alla criccabilità da tensocorrosione da cloruri per un certo numero di acciai inossidabili austenitici e duplex allo stato ricotto è presente in **Figura 9** (Rif. 9). La prova di evaporazione goccia a goccia (drop evaporation test) impiegata per ottenere questi dati è molto aggressiva, essendo condotta alla temperatura di 120 °C (248 °F) e la soluzione di cloruri risulta concentrata per evaporazione. I due acciai duplex considerati, i tipi EN 1.4462 (2205) e EN 1.4410 (2507), possono criccare ad una certa percentuale della propria resistenza allo snervamento durante la prova, ma tale percentuale risulta molto maggiore rispetto al grado EN 1.4401 (AISI 316). Per la loro resistenza alla SCC in ambienti in pressione contenenti cloruri in soluzione acquosa, ad esempio nel caso di corrosione sotto coibente, gli acciai duplex possono essere considerati per impieghi con rischio di criccabilità da cloruri in cui i gradi EN 1.4301 (AISI 304) e EN 1.4401 (AISI 316) risultano notoriamente criccabili. Il Prospetto 4 riassume il comportamento alla criccabilità da tensocorrosione da cloruri in diversi tipi di ambiente, a vari livelli di aggressività. Gli ambienti nella



**Tubi in acciaio inossidabile duplex (Fonte: Butting)**

parte di sinistra del prospetto sono severi per via dei sali acidi mentre quelli nella parte di destra sono severi per l'elevata temperatura. Gli ambienti nella parte centrale sono meno severi. Gli acciai inossidabili austenitici standard, con meno del 4 % di Mo, sono in condizioni di criccabilità da tensocorrosione da cloruri in tutte le tipologie di ambiente, mentre gli acciai inossidabili duplex resistono negli ambienti intermedi, con condizioni di prova moderatamente severe.

La resistenza alla corrosione indotta da idrogeno è una proprietà complessa, funzione non solo della percentuale di ferrite, ma anche della resistenza, della temperatura, delle condizioni di carico e della tensione applicata. Nonostante la loro sensibilità alla criccabilità da idrogeno, i vantaggi legati alla resistenza degli acciai duplex sono sfruttati in ambienti contenenti idrogeno, a patto che le condizioni operative siano scrupolosamente valutate e controllate. Le applicazioni più significative riguardano tubazioni ad elevata resistenza esercite con miscele di gas debolmente acidi ed acque saturate. Una illustrazione che evidenzia le condizioni di immunità e di sensibilità del tipo EN 1.4462 (2205) in ambienti H<sub>2</sub>S contenenti cloruro di sodio è riportata in **Figura 10** (Rif. 10).

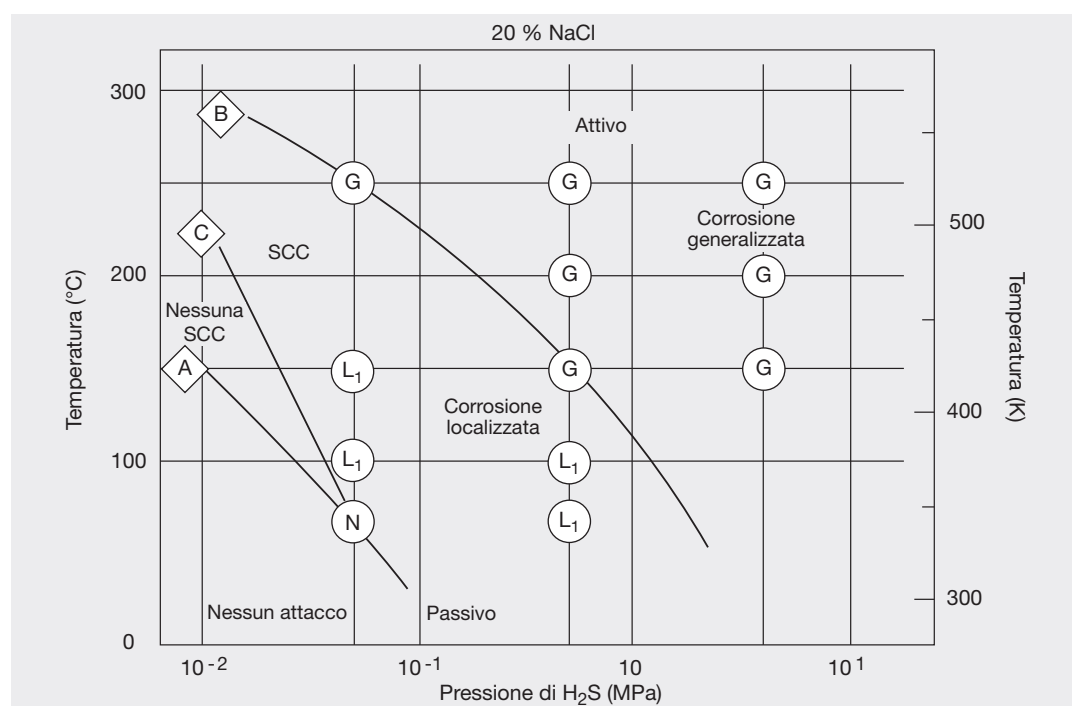


**Figura 9: Resistenza alla criccabilità da tensocorrosione di acciai inossidabili austenitici e duplex allo stato ricotto mediante prova di evaporazione goccia a goccia (drop evaporation test) con soluzioni di cloruro di sodio a 120 °C (248 °F) (la tensione che ha determinato la criccabilità è espressa in percentuale rispetto al carico di snervamento) (Fonte: Outokumpu).**

**Prospetto 4: Resistenza alla criccabilità da tensocorrosione comparata tra acciai inossidabili duplex non saldati ed austenitici mediante test di laboratorio accelerati (Fonte: letteratura varia)**

| Grado                                                                         | EN 1.4307<br>(AISI 304L)<br>EN 1.4404<br>(AISI 316L) | 3RE60 | EN 1.4162<br>(S32101)<br>EN 1.4062<br>(S32202) | EN 1.4462<br>(2205) | Duplex 25 % Cr | Superduplex |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------|---------------------|----------------|-------------|
| Piega ad U, 154 °C, soluzione al 42 % di MgCl <sub>2</sub> in ebollizione     |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 125 °C, soluzione al 35 % di MgCl <sub>2</sub> in ebollizione     |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Evaporazione goccia a goccia NaCl 0,1 M a 120 °C, 0,9 x Rs                    |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Wick test 1500 ppm Cl (NaCl) a 100 °C                                         |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 120 °C in soluzione al 33 % di LiCl <sub>2</sub> in ebollizione   |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Soluzione al 40 % di CaCl <sub>2</sub> a 100 °C, 0,9 x Rs                     |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 106 °C, soluzione al 25-28 % di NaCl in ebollizione               |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 155 °C, soluzione al 26 % di NaCl in autoclave                    |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 200 °C, soluzione al 26 % di NaCl in autoclave                    |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 300 °C, 600 ppm di Cl (NaCl) in autoclave                         |                                                      |       |                                                |                     |                |             |
| Piega ad U, 230 °C, 100 ppm di Cl (acqua mare + O <sub>2</sub> ) in autoclave |                                                      |       |                                                |                     |                |             |

Criccabilità anticipata
  Possibile criccabilità
  Criccabilità non anticipata
  Dati insufficienti



**Figura 10: Corrosione di un acciaio inossidabile duplex EN 1.4462 (2205) in ambiente al 20 % di cloruro di sodio-idrogeno solforato basato su una previsione di tipo elettrochimico e risultati sperimentali**

## 6 Specifiche per gli utilizzatori finali e controllo della qualità

Un aspetto critico, di tipo pratico, relativo alle specifiche ed al controllo della qualità degli acciai inossidabili duplex è il mantenimento delle proprietà dopo saldatura. Per gli acciai inossidabili duplex iniziali è essenziale avere una composizione e pratiche operative in grado di produrre buone proprietà dopo saldatura con procedure qualificate.

### 6.1 Requisiti di prova standard

#### 6.1.1 Composizione chimica

Le norme ASTM o EN sono il corretto punto di partenza per scegliere un acciaio inossidabile della seconda generazione. L'azoto è benefico, sia per prevenire eccessive quantità di ferrite nella Zona Termicamente Alterata (ZTA) che per conferire una maggiore stabilità metallurgica. Il limite superiore dell'azoto in un acciaio inossidabile duplex è dato dalla sua solubilità allo stato liquido e ciò trova conferma nei valori massimi degli intervalli definiti dalle specifiche tecniche standard. Tuttavia, il minimo azoto tabulato può riflettere o meno il livello necessario per conferire la migliore saldabilità. Un esempio di ciò è il grado UNS S31803, la specifica originale per il tipo 2205 (Rif. 11).

In corrispondenza dei valori inferiori dell'intervallo 0,08–0,20 % N previsto per il grado UNS S31803, il 2205 ha una risposta quasi nulla ai trattamenti termici ed alla saldatura. L'esperienza pratica ha portato a concludere che “almeno lo 0,14 % di azoto” è necessario per la fabbricazione mediante saldatura con il 2205. Dato che questa specifica era spesso richiesta, la qualità UNS S32205 del tipo 2205 fu introdotta nelle specifiche a vantaggio degli utilizzatori finali interessati alla saldabilità. Gli inossidabili superduplex hanno inoltre intervalli per i valori di azoto superiori, che rispecchiano la scoperta dell'importanza del tenore di azoto.

Vi sono state specifiche tecniche per gli acciai inossidabili duplex, da parte degli utilizzatori finali, basate sulla formula del “PREN”. Se il valore del PREN può essere efficace per classificare la resistenza alla corrosione dei vari gradi di una stessa famiglia con composizioni chimiche correttamente bilanciate, una composizione modificata per fornire un certo PREN non porta necessariamente ad un corretto equilibrio sul piano metallurgico. Il PREN può essere utile per scegliere uno tra gli acciai tabulati, ma se è applicato a varianti di un dato grado, indica che il cromo ed il molibdeno possono essere rimpiazzati dall'azoto. Metallurgicamente, tuttavia, il cromo ed il molibdeno sono

elementi ferritizzanti e favoriscono la formazione di fasi intermetalliche, mentre l'azoto è austenitizzante ed inibisce la formazione di fasi intermetalliche.

Di conseguenza, la scelta della composizione per i gradi duplex è basata in modo ottimale sui gradi standard previsti dalle specifiche, possibilmente con limitazione ai valori superiori degli intervalli per ogni elemento. Qualunque composizione sia specificata, deve essere lo stesso materiale utilizzato per la qualificazione delle procedure di saldatura, in modo che le qualificazioni siano significative in termini di risultati che possono essere previsti in produzione.

#### 6.1.2 Solubilizzazione e tempra

Oltre all'analisi chimica, lo stato di fornitura ricotto dei prodotti semilavorati è pure importante per una adeguata saldabilità. In un acciaio inossidabile austenitico, lo scopo della ricottura è la ricristallizzazione della microstruttura e la soluzione del carbonio nella matrice. Con i “gradi L”, a basso carbonio, l'acciaio inossidabile può essere raffreddato in acqua o raffreddato in aria con velocità relativamente basse perché i tempi di precipitazione dei carburi sono piuttosto lunghi. Tuttavia, con gli acciai inossidabili duplex, benché con i tenori di azoto ideali, una permanenza anche di pochi minuti nell'intervallo critico di temperatura può risultare dannoso per la sua resistenza alla corrosione e tenacità (Rif. 12). Quando un semilavorato è raffreddato lentamente, il tempo necessario al materiale per superare l'intervallo 700–980 °C (1300–1800 °F) non risulta più disponibile per successive esposizioni a sorgenti termiche, come ad esempio la saldatura. Il saldatore quindi avrà meno tempo a disposizione per realizzare un giunto privo di fasi intermetalliche in Zona Termicamente Alterata (ZTA).

Mentre specifiche come ASTM permettono ad alcuni gradi duplex “di essere raffreddati in acqua o raffreddati rapidamente con altri mezzi”, il migliore stato metallurgico per la saldatura è dato dal raffreddamento più rapido dalla temperatura di ricottura. Tuttavia, ciò non tiene conto delle deformazioni ed aumenta le tensioni residue indotte dal raffreddamento in acqua. Nel caso di prodotti piani di piccolo spessore, il raffreddamento in aria è estremamente efficace nelle moderne linee di produzione di coil; per lamiere, invece, il raffreddamento in acqua è quello che garantisce il miglior stato metallurgico ai fini della saldatura. Consentire il raffreddamento di una lamiera o di un pezzo speciale nell'intervallo 700–980 °C (1300–1800 °F) prima del raffreddamento può portare alla formazione di fasi intermetalliche.

Un altro approccio per assicurare la migliore condizione di partenza è richiedere che i prodotti semilavorati siano testati per verificare l'assenza di dannose fasi intermetalliche. ASTM A 923<sup>3</sup> prevede l'esame metallografico, la prova di resilienza o la prova di corrosione per dimostrare l'assenza di pericolose quantità di fasi intermetalliche. Questa prova permette di valutare solo se precipitazioni pericolose si siano già verificate. Non vi sono procedure di prova analoghe nella normativa EN. Con questo tipo di prova si verifica la procedura di fabbricazione del semilavorato per assicurare che non si siano formate pericolose fasi intermetalliche. Questo test è analogo alle verifiche della sensibilizzazione secondo ASTM A 262<sup>4</sup> o EN ISO 3651-2<sup>5</sup> degli inossidabili austenitici dovuta a precipitazione di carburi di cromo. ASTM A 923 riguarda solo 2205 (S31803 e S32205), 2507, 255 ed S32520, ma altri gradi duplex potranno aggiungersi nel futuro. Molti costruttori hanno adottato questi test ed altri analoghi o altri criteri di accettabilità come parte della propria qualificazione delle procedure di saldatura.

## 6.2 Requisiti di prova speciali

### 6.2.1 Prove di resistenza meccanica e durezza

Gli acciai inossidabili duplex hanno un'alta resistenza a confronto con gli acciai inossidabili austenitici. Tuttavia, vi sono state specifiche da parte degli utilizzatori finali che hanno imposto un massimo alla resistenza o alla durezza. Imporre dei massimi a resistenza o durezza è probabilmente un retaggio che deriva dall'esperienza degli acciai inossidabili martensitici, in cui l'elevata resistenza o durezza sono dovute a martensite non rinvenuta. Tuttavia, gli acciai inossidabili duplex non formano martensite durante il raffreddamento. Elevata resistenza e durezza, negli acciai duplex, sono dovuti ad elevati tenori di azoto, alla struttura stessa e ad incrudimento che può prodursi durante operazioni di raddrizzatura.

La prova di durezza può essere un modo efficace per dimostrare che non vi è un eccessivo incrudimento durante la fabbricazione; è però importante che, quando sia impiegata la prova di durezza per questo scopo, la misura sia eseguita in un punto intermedio tra la superficie ed il centro della sezione e non in prossimità della superficie, che può essere localmente o superficialmente indurita.

### 6.2.2 Prove di piega

Le prove di piega possono dimostrare che i semilavorati sono privi di cricche da laminazione, ma possono risultare difficoltose per forti spessori, pezzi piccoli o alcune geometrie. Le prove di piega non forniscono un'indicazione conservativa della qualità negli acciai duplex perché il punto testato può non coincidere con la giacitura della zona non accettabile. Alcune situazioni, come fasi intermetalliche a centro spessore, sono difficili da rilevare a causa della direzionalità del piegamento.

Le prove di piega sono usate di norma nell'ambito della qualificazione delle procedure di saldatura degli acciai inossidabili austenitici poiché vi è il rischio di criccabilità a caldo del giunto, in particolare per strutture fortemente vincolate, ad alto tenore di austenite.



Interno di un serbatoio in EN 1.4462 (2205) di una nave cisterna (Fonte: ThyssenKrupp Nirosta)

- 3 ASTM A 923 Standard test methods for detecting detrimental intermetallic phases in duplex austenitic/ferritic stainless steels
- 4 ASTM A 262 Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels
- 5 EN ISO 3651-2 Determination of resistance to intergranular corrosion of stainless steels – Part 2: Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (duplex) stainless steels – corrosion test in media containing sulfuric acid

L'utilità della prova di piega per rilevare problemi di integrità dei giunti saldati è molto ridotta a causa della solidificazione in fase ferritica degli inossidabili duplex, come anche dalla maggiore conduttività termica e dalla minore dilatazione termica. La prova di piega può rilevare grossolani eccessi di ferrite se la posizione delle provette coincide esattamente con l'area interessata, ma tali prove non consentono di rilevare la presenza di fasi intermetalliche alle modeste percentuali in cui è noto che possono nuocere alla resistenza alla corrosione ed alla tenacità durante la fabbricazione.

### 6.2.3 Prove di tenacità alla frattura ed esami metallografici per fasi intermetalliche

Ci sono due modi in cui una prova di tenacità può essere impiegata per le specifiche di un materiale o per qualificare una procedura:

- prova a condizioni note per rilevare materiali non accettabili, ad esempio tenori eccessivi di ferrite o la presenza di fasi intermetalliche;
- dimostrare che una costruzione presenta proprietà adeguate per il servizio previsto.

Per il primo impiego, la ASTM A 923 fornisce una prova per il 2205. La perdita di tenacità descritta nella ASTM A 923, Metodo B, in una prova di resilienza standard Charpy a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$  a meno di 54 J (40 ft-lb) è indicativa di uno stato inaccettabile di un semilavorato. Per assicurare che il trattamento termico e la tempra sono adeguati, la ASTM A 923 Metodo B (o Metodo C, la prova di corrosione) dovrebbe essere richiesta per ogni colata o semilavorato come misura di controllo della produzione. Tuttavia, la ASTM A 923 consente l'uso dell'esame metallografico (Metodo A) come prova per l'accettazione ma non per la non accettazione. A causa dell'elevato grado di specializzazione richiesto per effettuare il Metodo A, può essere prudente richiedere il test di corrosione con il Metodo C al posto dell'esame metallografico. Un modo per ottenere ciò è richiedere che venga riportato il livello di corrosione.

Un vantaggio del Metodo A della norma ASTM A 923 è l'identificazione delle fasi intermetalliche a centro spessore, come indicato nella Figura 7 della stessa ASTM A 923. Le fasi intermetalliche a centro spessore possono squalificare un materiale con riferimento ad una valutazione con Metodo A, ma possono non necessariamente produrre un esito negativo con riferimento al Metodo B della ASTM A 923, la prova di resilienza. Dato che le fasi intermetalliche a centro spessore possono causare una delaminazione della lamiera durante la formatura, il taglio termico o la saldatura, l'utilizzatore dovrebbe richiedere che in aggiunta al Metodo B o C sia effettuato il Metodo A, e che ogni materiale che presenti fasi intermetalliche a centro spessore sia scartato. Benché la ASTM A 923 affermi che il Metodo A non possa essere impiegato

come criterio di accettabilità, un utilizzatore finale è libero di prescrivere requisiti più severi. Materiali che presentino fasi intermetalliche a centro spessore come indicato dalla ASTM A 923, Figura 7, devono essere scartati.

Il secondo impiego della prova di resilienza, per la valutazione del materiale base, della zona fusa e della ZTA in condizioni più severe di quelle previste per l'esercizio, può essere economicamente conveniente e conservativo. Per la valutazione di giunti saldati, la temperatura di prova ed il criterio di accettabilità devono essere specifici per la tipologia di giunto e rappresentativi delle condizioni di esercizio. La resilienza non sarà alta come quella di un materiale base allo stato solubilizzato. Una diminuzione della resilienza in zona fusa non indica necessariamente la presenza di fasi intermetalliche ma è più spesso dovuta ad un incremento del tenore di ossigeno, in particolare nel caso di procedimenti sotto scoria.

L'ASME ha stabilito nuovi requisiti applicabili agli acciai duplex con spessori maggiori di 9,5 mm (0,375") (Rif. 13). Questi requisiti prevedono la prova di resilienza alla minima temperatura di progetto (MDMT) o inferiore, con un criterio di accettabilità espresso in termini di strizione laterale della provetta, per dimostrare che il materiale base ed i giunti di produzione sono abbastanza tenaci per le condizioni di servizio previste. Le prove ASME differiscono dalla ASTM A 923 in quanto l'ASME richiede tre provette (secondo lo schema più diffuso per misurare la tenacità per valutare l'idoneità al servizio) e la registrazione del valore minimo e medio. L'ASME richiede la prova sul materiale base, in zona fusa ed in ZTA per ogni colata e per ogni lotto di consumabili.

Per ragioni economiche, con la certezza di risultati conservativi, è possibile usare la minore delle due temperature di prova ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$  per ASTM A 923 o MDMT per il codice ASME) e misurare la resilienza sia in termini di strizione laterale che di energia per la terna di provette.

### 6.2.4 Verifica del bilanciamento delle fasi con esami metallografici o magnetici

Il bilanciamento tra fase ferritica ed austenitica di un acciaio duplex presenta scostamenti molto ridotti da colata a colata o da lotto a lotto, a causa delle limitate tolleranze dell'analisi chimica con cui sono prodotti ed alle consolidate procedure di ricottura. In genere, il EN 1.4462 (2205) contiene dal 40 al 50 % di ferrite. Per questo motivo, la determinazione del bilanciamento delle fasi in prodotti ricotti ha un valore relativo.

Tuttavia, una determinazione della ferrite può essere opportuna per la qualificazione di procedure di saldatura per prevenire eccessivi tenori di ferrite in

Zona Termicamente Alterata (ZTA). Un'accurata determinazione del bilanciamento delle fasi per un acciaio duplex richiede in genere un esame metallografico mediante point counting, ad esempio in accordo alle ASTM E 562 (manuale) o E 1245 (automatico). Dato che gli acciai duplex sono ferromagnetici, l'uso di metodi di tipo magnetico ha un'affidabilità limitata se non si fa riferimento a standard con bilanciamento delle fasi misurato metallograficamente. La AWS A4.2-91 e la EN ISO 8249<sup>6</sup> descrivono procedure per tarare gli strumenti magnetici per la misura della ferrite negli acciai duplex e registrare i risultati in termini di Ferrite Number FN. L'intervallo del bilanciamento delle fasi accettabile per un giunto saldato è di fatto più ampio rispetto al materiale base. Se la tenacità e la resistenza alla corrosione del giunto e della ZTA sono accettabili, come dimostrato da prove come quella secondo ASTM A 923, allora un intervallo compreso tra 25 e 75 % di ferrite può consentire le proprietà desiderate per un acciaio duplex. Misure di tipo magnetico nell'intervallo tra 30 e 90 FN sono considerate accettabili.

Richiedere la determinazione del bilanciamento delle fasi per un materiale che sia già in esercizio o a magazzino, presso il fornitore, è più costoso che imporre lo stesso requisito in fase di produzione del semilavorato. Ottenere il campione e condurre un test separato possono inoltre ridurre le tempistiche.

Dato che le fasi intermetalliche sono amagnetiche, i test di tipo magnetico non possono essere impiegati per rilevare le fasi sigma e chi.

### 6.2.5 Prove di resistenza alla corrosione

La prova di resistenza alla corrosione di semilavorati, secondo ASTM A 923, Metodo C, è uno dei metodi più economici per rilevare condizioni dannose. La precipitazione di fasi intermetalliche ed eventualmente la presenza di nitruri di cromo in un bilanciamento delle fasi con un eccesso di ferrite sono evidenziati da una diminuzione della resistenza a vaiolatura. Queste fasi causano diminuzioni di circa 15 °C o più rispetto alla temperatura critica di vaiolatura (CPT) caratteristica del materiale allo stato ricotto. La misura della temperatura critica di vaiolatura attuale di un campione è relativamente costosa poiché prevede varie prove in accordo ad ASTM G 48 o ASTM G 150 per uno stesso campione. Tuttavia, effettuare una sola prova di corrosione (ASTM A 923 Metodo C) da 10 °C a 15 °C al di sotto della CPT per un acciaio duplex può rivelare la presenza di fasi dannose. Quando si esegue una prova di corrosione per rilevare la presenza di fasi dannose, occorre considerare motivo di non accettazione anche la vaiolatura superficiale o dei bordi. Per quanto i bordi non siano esposti nelle reali



**Messa in opera di un tondo di rinforzo in acciaio inossidabile duplex nel deck di un ponte di grandi dimensioni (Fonte: Hardesty & Hanover, LLP)**

condizioni di servizio, questa prova è mirata a rilevare fasi intermetalliche e queste sono presenti con maggiore probabilità in corrispondenza del centro dello spessore, che è sottoposto a prova, quando nell'attacco sono inclusi anche i bordi.

Prima dell'introduzione della norma ASTM A 923, la prova di corrosione era in genere denominata "test ASTM G 48 modificato". Tuttavia, G 48 è una descrizione di una procedura di laboratorio sperimentale, piuttosto che un test per l'accettazione di un materiale. Un requisito basato sulla prova G 48 non è esaustivo senza che siano specificate le modalità con cui la G 48 deve essere attuata, con l'ulteriore dettaglio delle altre variabili di prova, tra cui:

- la preparazione superficiale,
- la temperatura di prova,
- la durata della prova,
- l'inclusione o meno della corrosione ai bordi,
- la definizione di un criterio di accettabilità.

La ASTM A 923 è un test mirato ad evidenziare l'assenza di fasi intermetalliche dannose in prodotti semilavorati in modo economico e relativamente veloce. La ASTM A 923, Metodo C, esprime il criterio di accettabilità in termini di rateo di corrosione.

<sup>6</sup> EN ISO 8249 Saldatura - Determinazione del tenore di ferrite (FN) nel metallo fuso di acciai inossidabili austenitici e di acciai duplex ferritico-austenitici al Cr-Ni



Ponte in Cala Galdana, Menorca, realizzato con acciaio duplex EN 1.4462 (2205); (Fonte: PEDELTA)

Ciò può apparire sorprendente, dato che lo scopo è la determinazione della resistenza alla vaiolatura; tuttavia, questo approccio è stato utilizzato per due motivi:

1. basando l'accettabilità sulla perdita di massa, si elimina il gravoso e potenzialmente soggettivo problema di stabilire cosa sia una vaiolatura superficiale. La perdita in massa prevista per il mancato superamento della prova è sufficientemente grande da essere facilmente misurata, ma piccola a sufficienza per individuare facilmente il tipo di vaiolatura associata alla presenza di fasi intermetalliche in un test della durata di 24 ore.
2. Utilizzando una velocità di corrosione, può essere testata praticamente qualsiasi dimensione o forma di provetta, a condizione che l'area della superficie possa essere determinata.

La prova di corrosione è conservativa e non funzione della geometria e della posizione di prelievo delle provette, a differenza della prova Charpy, che è funzione della giacitura e dell'orientamento dell'intaglio. La prova di corrosione è adeguata nell'ambito della qualificazione delle procedure di saldatura, con costi contenuti, e come prova di controllo applicata a campioni di giunti saldati in produzione, quando possono essere ricavati. Tuttavia, è necessario tenere conto

della differenza tra la resistenza alla corrosione dei prodotti semilavorati (materiali base) e di un giunto saldato. Anche un giunto correttamente eseguito ha una CPT sino a 15 °C inferiore rispetto al materiale base, in funzione della procedura di saldatura, del gas di protezione e del grado di acciaio inossidabile duplex saldato.

### 6.2.6 Procedure di saldatura e di ispezione

I problemi che si possono incontrare con gli acciai duplex non sono facilmente percepibili dal saldatore, né necessariamente rilevabili con prove non distruttive. Il saldatore deve comprendere che la qualità complessiva dei giunti saldati, così come misurata attraverso la loro tenacità e resistenza alla corrosione in esercizio, dipendono strettamente dalla procedura di saldatura. Deviazioni rispetto alla procedura di saldatura qualificata possono non essere necessariamente rilevabili in officina, ma ogni deviazione rappresenta un rischio per l'esercizio del manufatto in condizioni di sicurezza e dal punto di vista economico.

## 7 Proprietà meccaniche

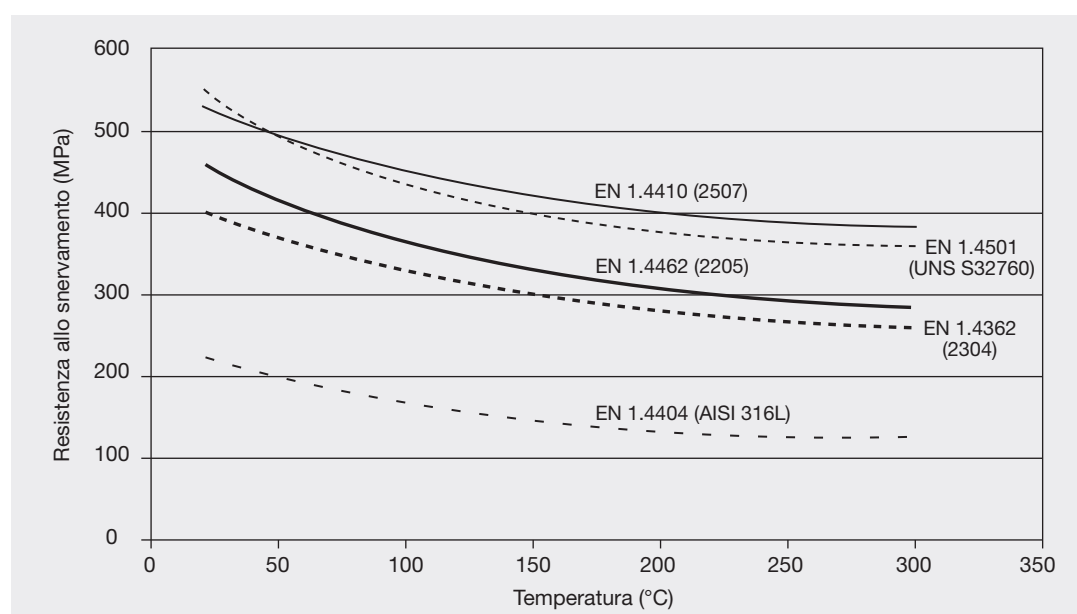
Gli acciai inossidabili duplex hanno eccezionali proprietà meccaniche. Esse sono tabulate per i gradi standard nel **Prospetto 5**. Il loro carico di snervamento, a temperatura ambiente, allo stato solubilizzato è più che doppio rispetto ad un acciaio inossidabile austenitico non legato con azoto. Ciò può consentire al progettista di ridurre gli spessori di parete in alcune applicazioni. I valori del carico di snervamento tipici di vari acciai inossidabili duplex sono confrontati con quelli dell'acciaio austenitico tipo EN 1.4404 (AISI 316L) a temperature comprese tra quella ambiente e 300 °C (570 °F) in **Figura 11**. A causa del rischio di fragilità a 475 °C (885 °F) dovuto alla fase ferritica, gli acciai inossidabili duplex non dovrebbero essere impiegati in esercizio a temperature superiori a quelle previste dai codici di calcolo delle apparecchiature in pressione per periodi prolungati (vedere Prospetto 2).

Le proprietà meccaniche di semilavorati in acciaio inossidabile duplex sono fortemente anisotrope, il

che significa che possono variare notevolmente in funzione della direzione. Questa anisotropia è dovuta alla presenza di grani allungati ed alla microstruttura cristallina derivante dalla laminazione a caldo o a freddo (vedere Figura 2). Mentre la struttura di solidificazione di un acciaio duplex è tipicamente isotropa, esso viene laminato o forgiato e quindi successivamente ricotto in presenza di entrambe le fasi. L'aspetto delle due fasi nel prodotto finale indica la direzionalità del processo eseguito. La resistenza risulta maggiore perpendicolarmente alla direzione di laminazione rispetto a quella a questa parallela. La resilienza è maggiore nel caso di intaglio posizionato perpendicolarmente alla direzione di laminazione piuttosto che nella direzione di laminazione. La tenacità misurata è di norma maggiore per una provetta "longitudinale" (L-T) che nelle altre direzioni di prova. L'energia di rottura di una provetta trasversale di una lamiera di acciaio duplex varia tipicamente da 1/2 ad 1/3 rispetto a quella di una provetta ricavata in direzione longitudinale.

**Prospetto 5: Valori minimi di riferimento delle proprietà meccaniche di lamiere in acciaio inossidabile duplex secondo ASTM ed EN**

| Grado | ASTM    |                                          |                                   |                                  | EN     |                                                       |                                               |                                            |
|-------|---------|------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|
|       | UNS No. | Carico di snervamento<br>0,2 % MPa (ksi) | Resistenza a rottura<br>MPa (ksi) | Allungamento a rottura<br>% (2") | EN No. | Scostamento dalla proporzionalità<br>Rp 0,2 MPa (ksi) | Carico di rottura<br>R <sub>m</sub> MPa (ksi) | Allungamento a rottura<br>A <sub>5</sub> % |
| 2304  | S32304  | 400 (58)                                 | 600 (87)                          | 25                               | 1.4362 | 400 (58)                                              | 630 (91)                                      | 25                                         |
| 2205  | S32205  | 450 (65)                                 | 655 (95)                          | 25                               | 1.4462 | 460 (67)                                              | 640 (93)                                      | 25                                         |
| 2507  | S32750  | 550 (80)                                 | 795 (116)                         | 15                               | 1.4410 | 530 (77)                                              | 730 (106)                                     | 20                                         |



**Figura 11: Confronto tra la resistenza allo snervamento tipica degli acciai inossidabili duplex ed il tipo EN 1.4404 (AISI 316L) tra temperatura ambiente a 300 °C (572 °F) (Fonte: dati del produttore)**

**Prospetto 6: Confronto della duttilità di acciai inossidabili duplex ed austenitici secondo i requisiti di ASTM A 240 ed EN 10088-2**

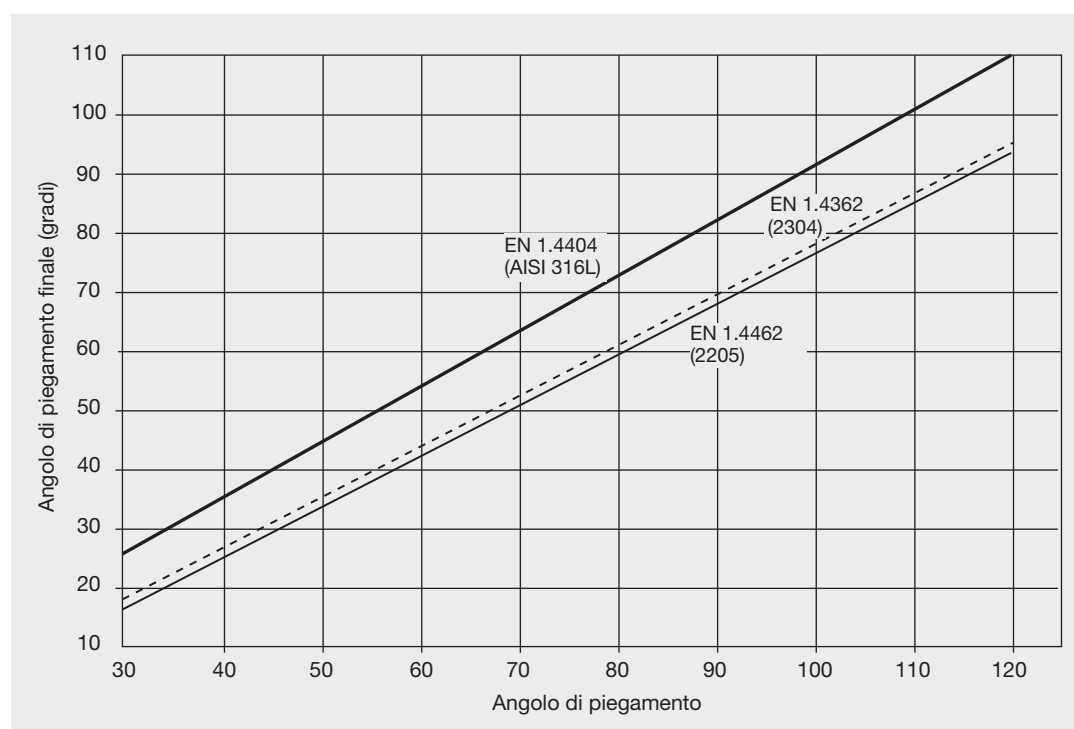
| ASTM A 240 |       |                        | EN 10088-2 |                         |    |    |
|------------|-------|------------------------|------------|-------------------------|----|----|
| UNS No.    | Grado | Allungamento, min. (%) | EN No.     | Allungamento, min. (%)* |    |    |
|            |       |                        |            | P                       | H  | C  |
| S32003     |       | 25                     |            |                         |    |    |
| S32101     |       | 30                     | 1.4162     | 30                      | 30 | 30 |
| S32202     |       | 30                     | 1.4062     |                         |    |    |
| S32304     | 2304  | 25                     | 1.4362     | 25                      | 20 | 20 |
| S32205     | 2205  | 25                     | 1.4462     | 25                      | 25 | 20 |
| S32750     | 2507  | 15                     | 1.4410     | 20                      | 15 | 15 |
| S30403     | 304L  | 40                     | 1.4307     | 45                      | 45 | 45 |
| S31603     | 316L  | 40                     | 1.4404     | 45                      | 40 | 40 |

P = lamiera laminata a caldo H = coil laminato a caldo C = coil e lamiera laminati a freddo

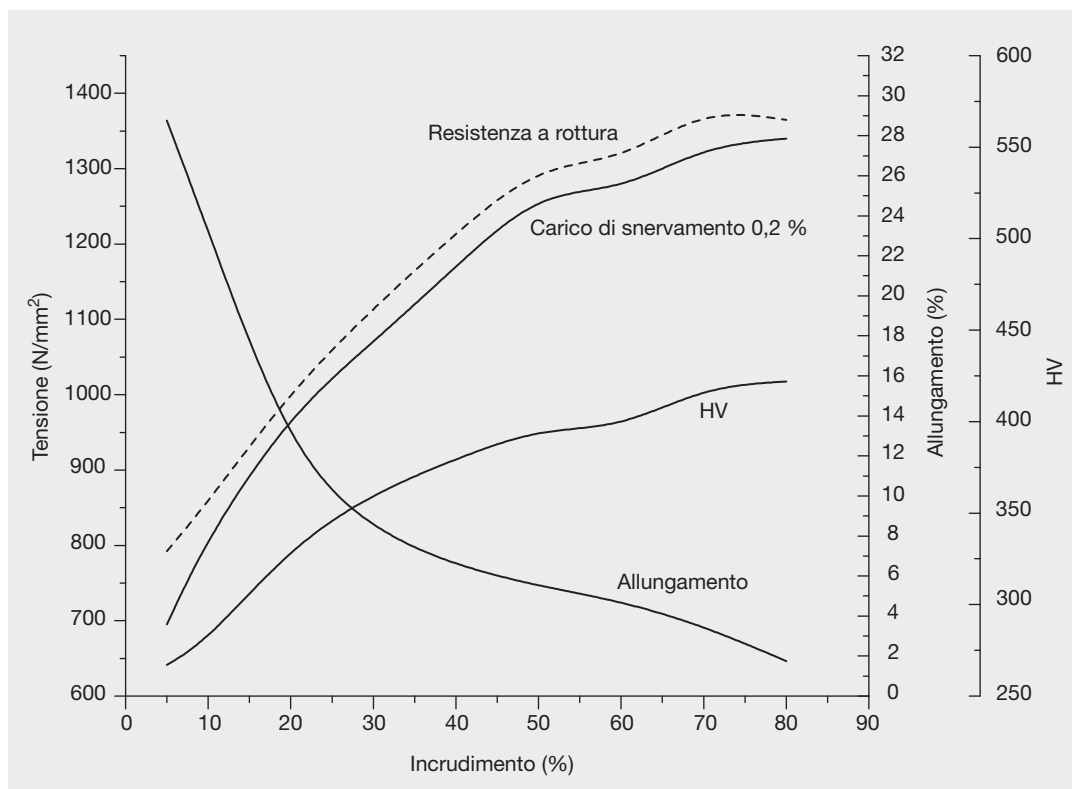
\* direzione trasversale

Nonostante l'elevata resistenza, gli acciai duplex presentano buona duttilità e tenacità. Confrontati con gli acciai al carbonio o con gli inossidabili ferritici, presentano una transizione duttile – fragile più graduale. Gli acciai duplex conservano una buona tenacità anche a temperature inferiori a quella ambiente, ad esempio -40 °C/°F; tuttavia, la duttilità e la tenacità degli acciai duplex sono in generale inferiori rispetto

agli acciai inossidabili austenitici. Gli acciai inossidabili austenitici, tipicamente, non presentano la transizione duttile – fragile e mantengono un'eccellente tenacità sino a temperature criogeniche. Un confronto tra acciai inossidabili austenitici standard e duplex in termini di allungamento a rottura minimo (prova di trazione monoassiale) è riportato nel Prospetto 6.



**Figura 12: Confronto del ritorno elastico di acciaio inossidabili duplex ed il tipo EN 1.4404 (AISI 316L) per lamiera da 2 mm (0,08") (Fonte: Outokumpu)**



**Figura 13: Effetto delle lavorazioni a freddo sulle proprietà meccaniche dell'acciaio inossidabile duplex EN 1.4462 (2205); (Fonte: Baosteel)**

Se da una parte l'elevato carico di snervamento degli acciai duplex può favorire misurazioni sottostimate, a causa dell'instabilità e delle limitazioni del Modulo di Young, vi possono essere anche difficoltà in fase di fabbricazione. A causa della loro elevata resistenza, la deformazione plastica richiede forza elevata. Il ritorno elastico durante le operazioni di piegatura è maggiore rispetto agli inossidabili austenitici a causa della maggiori forze di piegamento richieste dagli acciai duplex. Un confronto del ritorno elastico per due acciai duplex ed il tipo EN 1.4404 (AISI 316L) è riportato nella Figura 12. Gli acciai duplex hanno una duttilità inferiore agli austenitici e possono essere richiesti raggi di piega maggiori per evitarne la cricatura.

A causa dell'elevata durezza e coefficiente di incrudimento, gli acciai duplex comportano un'usura maggiore degli utensili durante le lavorazioni di macchina e richiedono tempi di lavorazione superiori rispetto agli acciai inossidabili austenitici standard. Trattamenti di ricottura possono essere richiesti tra le operazioni di formatura e di piega, poiché la duttilità degli acciai duplex è all'incirca la metà rispetto agli inossidabili austenitici. L'effetto delle lavorazioni a freddo sulle proprietà meccaniche per il EN 1.4462 (2205) è riportato in Figura 13.



**Messa in opera di un tubo coibentato da 24" in EN 1.4462 (2205) su supporti verticali nella Prudhoe Bay (Fonte: Arco Exploration e Production Technology)**

## 8 Proprietà fisiche

Le proprietà fisiche, a temperatura ambiente, utili per la scelta degli acciai inossidabili duplex sono riportate nel **Prospetto 7**, mentre alcuni valori ad elevata temperatura sono riportati nel **Prospetto 8**. I dati relativi all'acciaio al carbonio ed agli inossidabili austenitici sono riportati a titolo di confronto.

In ogni caso, le differenze delle proprietà fisiche tra i diversi gradi sono molto ridotte e probabilmente rispecchiano le differenze delle rispettive procedure di prova impiegate.

Le proprietà fisiche degli acciai duplex sono comprese per tutti i gradi tra quelle degli acciai al carbonio e gli acciai inossidabili austenitici, ma tendono ad essere più vicine a quelli degli inossidabili austenitici.

**Prospetto 7: Proprietà fisiche a temperatura ambiente degli acciai inossidabili duplex a confronto con quelle degli acciai al carbonio ed inossidabili austenitici (Fonte: dati dei produttori)**

| Grado                | UNS No. | Densità           |                     | Calore specifico |            | Resistività elettrica |             | Modulo di Young |                      |
|----------------------|---------|-------------------|---------------------|------------------|------------|-----------------------|-------------|-----------------|----------------------|
|                      |         | g/cm <sup>3</sup> | lb./in <sup>3</sup> | J/kg K           | Btu/lb./°F | micro Ω m             | micro Ω in. | GPa             | x10 <sup>6</sup> psi |
| Acciaio al carbonio  | G10200  | 7,64              | 0,278               | 447              | 0,107      | 0,10                  | 3,9         | 207             | 30,0                 |
| EN 1.4301 (AISI 304) | S30400  | 7,98              | 0,290               | 502              | 0,120      | 0,73                  | 28,7        | 193             | 28,0                 |
| EN 1.4401 (AISI 316) | S31600  | 7,98              | 0,290               | 502              | 0,120      | 0,75                  | 29,5        | 193             | 28,0                 |
| EN 1.4460 (AISI 329) | S32900  | 7,70              | 0,280               | 460              | 0,110      | 0,80                  | 31,5        | 200             | 29,0                 |
|                      | S31500  | 7,75              | 0,280               | 482              | 0,115      |                       |             | 200             | 29,0                 |
|                      | S32101  | 7,80              | 0,281               | 500              | 0,119      | 0,80                  | 31,5        | 200             | 29,0                 |
| EN 4362 (2304)       | S32304  | 7,75              | 0,280               | 482              | 0,115      | 0,80                  | 31,5        | 200             | 29,0                 |
|                      | S31803  | 7,80              | 0,281               | 500              | 0,119      | 0,80                  | 31,5        | 200             | 29,0                 |
| EN 1.4462 (2205)     | S32205  | 7,80              | 0,281               | 500              | 0,119      | 0,80                  | 31,5        | 200             | 29,0                 |
|                      | S31260  | 7,80              | 0,281               | 502              | 0,120      |                       |             | 200             | 29,0                 |
|                      | S32750  | 7,85              | 0,285               | 480              | 0,114      | 0,80                  | 31,5        | 205             | 29,7                 |
| 255                  | S32550  | 7,81              | 0,282               | 488              | 0,116      | 0,84                  | 33,1        | 210             | 30,5                 |
|                      | S39274  | 7,80              | 0,281               | 502              | 0,120      |                       |             | 200             | 29,0                 |
|                      | S32760  | 7,84              | 0,281               |                  |            | 0,85                  | 33,5        | 190             | 27,6                 |
|                      | S32520  | 7,85              | 0,280               | 450              | 0,108      | 0,85                  | 33,5        | 205             | 29,7                 |
| EN 1.4410 (2507)     | S32750  | 7,79              | 0,280               | 485              | 0,115      | 0,80                  | 31,5        | 200             | 29,0                 |

**Prospetto 8: Proprietà fisiche ad alta temperatura degli acciai inossidabili duplex a confronto con quelle degli acciai al carbonio ed inossidabili austenitici (Fonte: dati dei produttori)**

| Grado                                                                                                                | 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) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Modulo elastico in funzione della temperatura in GPa (ksi × 1000)</b>                                             |         |               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Acciaio al carbonio                                                                                                  | G10200  | 207 (30,0)    |                 |                 |                 |                 |                 |
| EN 1.4301 (AISI 304)                                                                                                 | S30400  | 193 (28,0)    | 192 (27,9)      | 183 (26,6)      | 177 (25,7)      | 168 (24,4)      | 159 (23,0)      |
| EN 1.4460 (AISI 329)                                                                                                 | S32900  | 200 (29,0)    | 195 (28,0)      | 185 (27,0)      |                 |                 |                 |
|                                                                                                                      | S31500  | 200 (29,0)    | 190 (27,6)      | 180 (26,1)      | 170 (24,7)      | 160 (23,2)      | 150 (21,8)      |
|                                                                                                                      | S32101  | 200 (29,0)    | 194 (28,0)      | 186 (27,0)      | 180 (26,1)      |                 |                 |
| EN 1.4362 (2304)                                                                                                     | S32304  | 200 (29,0)    | 190 (27,6)      | 180 (26,1)      | 170 (24,7)      | 160 (23,2)      | 150 (21,8)      |
|                                                                                                                      | S31803  | 200 (29,0)    | 190 (27,6)      | 180 (26,1)      | 170 (24,7)      | 160 (23,2)      | 150 (21,8)      |
| EN 1.4462 (2205)                                                                                                     | S32205  | 200 (29,0)    | 190 (27,6)      | 180 (26,1)      | 170 (24,7)      | 160 (23,2)      | 150 (21,8)      |
| 255                                                                                                                  | S32550  | 210 (30,5)    | 200 (29,9)      | 198 (28,7)      | 192 (27,8)      | 182 (26,4)      | 170 (24,7)      |
|                                                                                                                      | S32520  | 205 (29,7)    | 185 (26,8)      | 185 (26,8)      | 170 (24,7)      |                 |                 |
| EN 1.4410 (2507)                                                                                                     | S32750  | 200 (29,0)    | 190 (27,6)      | 180 (26,1)      | 170 (24,7)      | 160 (23,2)      | 150 (21,8)      |
| <b>Coefficiente di dilatazione termica – da 20 °C (68 °F) a T espresso in 10<sup>-6</sup>/K (10<sup>-6</sup>/°F)</b> |         |               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Acciaio al carbonio                                                                                                  | G10200  | NA            | 12,1 (6,70)     | 13,0 (7,22)     |                 | 14 (7,78)       |                 |
| EN 1.4301 (AISI 304)                                                                                                 | S30400  | NA            | 16,4 (9,10)     | 16,9 (9,40)     | 17,3 (9,60)     | 17,6 (9,80)     | 18,0 (10,0)     |
| EN 1.4460 (AISI 329)                                                                                                 | S32900  | NA            | 10,9 (6,10)     | 11,0 (6,30)     | 11,6 (6,40)     | 12,1 (6,70)     | 12,3 (6,80)     |
|                                                                                                                      | S31500  | NA            | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     | 14,0 (7,78)     | 14,5 (8,06)     | 15,0 (8,33)     |
|                                                                                                                      | S32101  | NA            | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     | 14,0 (7,78)     |                 |                 |
| EN 1.4362 (2304)                                                                                                     | S32304  | NA            | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     | 14,0 (7,78)     | 14,5 (8,06)     | 15,0 (8,33)     |
|                                                                                                                      | S31803  | NA            | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     | 14,0 (7,78)     | 14,5 (8,06)     | 15,0 (8,33)     |
| EN 1.4462 (2205)                                                                                                     | S32205  | NA            | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     | 14,0 (7,78)     | 14,5 (8,06)     | 15,0 (8,33)     |
| 255                                                                                                                  | S32550  | NA            | 12,1 (6,72)     | 12,6 (7,00)     | 13,0 (7,22)     | 13,3 (7,39)     | 13,6 (7,56)     |
|                                                                                                                      | S32520  | NA            | 12,5 (6,94)     | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     |                 |                 |
| EN 1.4410 (2507)                                                                                                     | S32750  | NA            | 13,0 (7,22)     | 13,5 (7,50)     | 14,0 (7,78)     | 14,5 (8,06)     | 15,0 (8,33)     |
| <b>Conduttività termica in funzione della temperatura espressa in W/m K (Btu in/hr ft<sup>2</sup> °F)</b>            |         |               |                 |                 |                 |                 |                 |
| Acciaio al carbonio                                                                                                  | G10200  | 52 (360)      | 51 (354)        | 49 (340)        |                 | 43 (298)        |                 |
| EN 1.4301 (AISI 304)                                                                                                 | S30400  | 14,5 (100)    | 16,2 (112)      | 17,8 (123)      | 19,6 (135)      | 20,3 (140)      | 22,5 (155)      |
| EN 1.4460 (AISI 329)                                                                                                 | S32900  |               |                 |                 |                 |                 |                 |
|                                                                                                                      | S31500  | 16,0 (110)    | 17,0 (118)      | 19,0 (132)      | 20,0 (138)      | 21,0 (147)      | 22,0 (153)      |
|                                                                                                                      | S32101  | 15,0 (105)    | 16,0 (110)      | 17,0 (118)      | 18,0 (124)      |                 |                 |
| EN 1.4362 (2304)                                                                                                     | S32304  | 16,0 (110)    | 17,0 (118)      | 19,0 (132)      | 20,0 (138)      | 21,0 (147)      | 22,0 (153)      |
|                                                                                                                      | S31803  | 16,0 (110)    | 17,0 (118)      | 19,0 (132)      | 20,0 (138)      | 21,0 (147)      | 22,0 (153)      |
| EN 1.4462 (2205)                                                                                                     | S32205  | 16,0 (110)    | 17,0 (118)      | 19,0 (132)      | 20,0 (138)      | 21,0 (147)      | 22,0 (153)      |
| 255                                                                                                                  | S32550  | 13,5 (94)     | 15,1 (105)      | 17,2 (119)      | 19,1 (133)      | 20,9 (145)      | 22,5 (156)      |
|                                                                                                                      | S32520  | 17,0 (118)    | 18,0 (124)      | 19,0 (132)      | 20,0 (138)      |                 |                 |
| EN 1.4410 (2507)                                                                                                     | S32750  | 16,0 (110)    | 17,0 (118)      | 19,0 (132)      | 20,0 (138)      | 21,0 (147)      | 22,0 (153)      |

## 9 Taglio

Gli stessi processi normalmente utilizzati per il taglio degli acciai inossidabili austenitici e per gli acciai al carbonio possono essere impiegati anche per i duplex, per quanto possano risultare necessari piccoli aggiustamenti nei parametri per compensare le differenze tra alcune proprietà meccaniche e le caratteristiche termiche.

### 9.1 Taglio con sega

A causa della loro elevata resistenza, dell'alto coefficiente di incrudimento e dell'assenza virtuale di inclusioni che favoriscano la rottura dei trucioli, gli acciai duplex sono più difficili da tagliare con la sega rispetto agli acciai al carbonio. I migliori risultati si ottengono con macchine ad elevata potenza, sistemi di allineamento della lama molto robusti, denti delle lame sovradimensionati, velocità di taglio medio – basse, avanzamenti generosi ed abbondanti quantità di liquido di raffreddamento, idealmente un'emulsione sintetica che svolge funzioni di lubrificazione e di raffreddamento, alimentata in modo che la lama porti il liquido all'interno del pezzo. Le velocità di taglio e di avanzamento dovrebbero essere simili a quelle impiegate per l'acciaio inossidabile austenitico EN 1.4404 (AISI 316L).

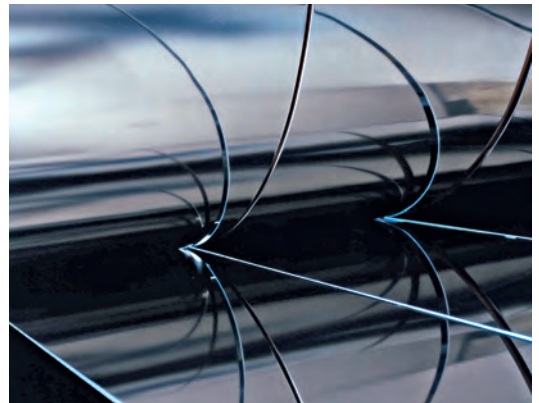
### 9.2 Cesoatura

Gli acciai duplex sono cesoati con le stesse attrezzature usate per i tipi EN 1.4301 (AISI 304) e EN 1.4401 (AISI 316), di norma senza particolari adattamenti. Tuttavia, a causa della maggiore resistenza a taglio degli acciai duplex, la potenza deve essere aumentata oppure ridotto lo spessore.

La resistenza a taglio degli acciai inossidabili è circa il 58 % della resistenza a rottura sia per lamiere laminate a caldo che per semilavorati laminati a freddo. Gli acciai duplex si comportano come ci si aspetterebbe da uno spessore maggiore del tipo EN 1.4401 (AISI 316) in modo proporzionale al rapporto della loro resistenza a taglio. Di conseguenza, il massimo spessore di acciaio duplex tipo EN 1.4362 (2304) o EN 1.4462 (2205) che può essere tagliato è circa l'85 % rispetto al tipo EN 1.4301 (AISI 304) o EN 1.4401 (AISI 316). Il massimo spessore di acciaio inossidabile super duplex che può essere tagliato è invece circa il 65 % rispetto ad un comune acciaio austenitico.

### 9.3 Taglio con “slitter”

Per tagliare acciai inossidabili duplex da coil sono utilizzati impianti di taglio (slitter) per coil di tipo convenzionale. L'acciaio inossidabile viene alimentato da coil posizionati su bobine attraverso una gabbia di taglio dotata di una coppia di cilindri provvisti di lame circolari, quindi una seconda bobina raccoglie i nastri appena tagliati. La posizione delle lame di taglio può



Taglio alla slitter di un acciaio inossidabile duplex (Fonte: ThyssenKrupp Nirosta)

essere regolata in funzione dei valori che si desidera ottenere per il nastro. A causa della maggiore resistenza degli acciai duplex rispetto agli acciai inossidabili austenitici, sono più difficili da controllare l'usura dell'utensile di taglio e la geometria del bordo di taglio. Mantenere una buona qualità del bordo di taglio per coil di acciai inossidabili duplex richiede l'uso di acciai da utensili o utensili in carburo.

### 9.4 Tranciatura

La tranciatura può essere vista come una tipologia più complessa di taglio. L'elevata resistenza, il rapido incrudimento e la resistenza a taglio rendono gli inossidabili duplex relativamente difficili da tranciare ed abrasivi nei confronti degli utensili. L'esperienza in questa lavorazione è limitata, ma il criterio per cui gli acciai inossidabili duplex si comportano come un acciaio inossidabile austenitico di spessore doppio rappresenta un buon punto di partenza per questa lavorazione. Gli acciai duplex legati con i maggiori tenori di azoto sono più difficoltosi, ma in modo non proporzionale.

### 9.5 Taglio plasma e laser

Gli acciai duplex sono comunemente tagliati con le stesse apparecchiature plasma e laser utilizzate anche per gli acciai inossidabili austenitici. La conduttività termica leggermente superiore ed il tenore di zolfo tipicamente basso degli acciai duplex possono richiedere leggere variazioni ai parametri ottimali, ma si possono raggiungere risultati accettabili anche senza aggiustamenti particolari. La Zona Termicamente Alterata (ZTA) del processo di taglio plasma è di norma stretta, intorno a 0,25 mm (0,010") dato che il taglio avviene rapidamente, con una passata e raffreddamento rapido verso il materiale base. Le normali lavorazioni di macchina per la preparazione di un giunto saldato e la fusione del materiale base durante la saldatura sono sufficienti ad eliminare la ZTA dovuta al processo di taglio plasma.

# 10 Formatura

## 10.1 Formatura a caldo

Gli acciai duplex hanno un'eccellente formabilità anche con carichi relativamente bassi sino a circa 1230 °C (2250 °F). Tuttavia, se la formatura è eseguita a temperatura troppo bassa, la deformazione si concentra progressivamente nella fase ferritica, meno resistente ma anche meno duttile, cosa che può comportare criccabilità della ferrite stessa nella zona soggetta a deformazione. Inoltre, può precipitare un'elevata quantità di fase sigma se la temperatura cui si effettua la lavorazione scende troppo in basso.

Numerose procedure raccomandano una temperatura massima per la formatura a caldo tra 1100 °C (2000 °F) e 1150 °C (2100 °F). Tale temperatura massima è suggerita in considerazione dell'effetto delle alte temperature sulla stabilità dimensionale dei pezzi e della maggiore tendenza alla formazione di ossidazione con temperature crescenti. Ad elevata temperatura, gli acciai duplex divengono meno resistenti e parti come i fondi di apparecchi in pressione o tubazioni industriali possono deformarsi o inflettersi in forno, se non adeguatamente supportati. A queste temperature gli acciai possono anche diventare troppo teneri per alcune operazioni di formatura a caldo. Il **Prospetto 9** riassume gli intervalli di temperatura suggeriti per la formatura a caldo e le temperature minime di mantenimento. Non è necessario o sempre consigliabile iniziare la lavorazione a caldo alla temperatura superiore dell'intervallo. Tuttavia, l'acciaio dovrebbe raggiungere la minima temperatura di mantenimento prima della lavorazione a caldo. Il forno dovrebbe essere caricato quando già caldo, per evitare un riscaldamento troppo lento attraverso l'intervallo di precipitazione della fase sigma.

L'uniformità della temperatura è importante per una formatura a caldo ben eseguita di un acciaio duplex.

Se la forma del pezzo non è compatta, i bordi possono essere molto più freddi del resto, quindi vi può essere rischio di rottura di queste parti più fredde. Per evitare queste rotture, è necessario riscaldare di nuovo il pezzo se queste zone rischiano di raffreddarsi al di sotto della minima temperatura di formatura a caldo. Il limite inferiore dell'intervallo di temperatura di formatura suggerito può essere esteso, in qualche misura, ma solo se è garantita l'uniformità della temperatura nel pezzo, specialmente nei bordi o nelle sezioni più sottili.

Nel caso di sezioni spesse, è opportuno considerare se il raffreddamento in acqua sia sufficientemente veloce per prevenire la precipitazione di fasi intermetalliche. In caso di sezioni di lamiera, questo limite di spessore varia tra 150 e 200 mm circa (da 6" ad 8") per lamiere grezze tipo EN 1.4462 (2205) e tra 75 e 125 mm (da 3" a 5") per lamiere grezze di superduplex, i limiti precisi variano con la composizione dell'acciaio duplex e con l'efficienza dell'attrezzatura impiegata per il raffreddamento. Per una semplice geometria cilindrica, il diametro è intorno a 375 mm (15"). Se il pezzo finito presenta una cavità passante rispetto al diametro, il raffreddamento del pezzo dopo la ricottura finale risulta molto più efficiente quando questa apertura è realizzata con fori contrapposti per punzonatura o lavorata di macchina prima del trattamento termico finale.

### 10.1.1 Solubilizzazione

Dopo la formatura a caldo, è necessario effettuare una completa solubilizzazione seguita da un raffreddamento rapido per ripristinare le proprietà meccaniche e la resistenza alla corrosione. Il pezzo dovrebbe essere portato al di sopra della temperatura minima di solubilizzazione e mantenuto a sufficienza per portare in soluzione ogni precipitato intermetallico. Un criterio conservativo è quello per cui il mantenimento

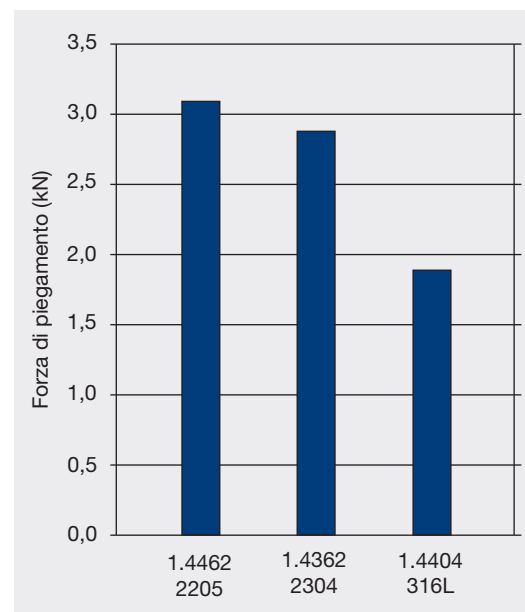
**Prospetto 9: Intervallo di temperatura per la formatura a caldo e minima temperatura di mantenimento per acciai inossidabili duplex (i comuni gradi inossidabili austenitici sono indicati per confronto) (Fonte: dati del produttore)**

| Grado | UNS No. | EN No. | Intervallo di temperatura per la formatura a caldo |                | Minima temperatura di mantenimento |      |
|-------|---------|--------|----------------------------------------------------|----------------|------------------------------------|------|
|       |         |        | °C                                                 | °F             | °C                                 | °F   |
|       | S32101  | 1.4162 | Da 1100 a 900                                      | Da 2000 a 1650 | 950                                | 1750 |
| 2304  | S32304  | 1.4362 | Da 1150 a 950                                      | Da 2100 a 1740 | 980                                | 1800 |
| 2205  | S32205  | 1.4462 | Da 1230 a 950                                      | Da 2250 a 1740 | 1040                               | 1900 |
| 2507  | S32750  | 1.4410 | Da 1230 a 1025                                     | Da 2250 a 1875 | 1050                               | 1920 |
|       | S32520  | 1.4507 | Da 1230 a 1000                                     | Da 2250 a 1830 | 1080                               | 1975 |
|       | S32760  | 1.4501 | Da 1230 a 1000                                     | Da 2250 a 1830 | 1100                               | 2010 |
| 304   | S30400  | 1.4301 | Da 1205 a 925                                      | Da 2200 a 1700 | 1040                               | 1900 |
| 316   | S31600  | 1.4401 | Da 1205 a 925                                      | Da 2200 a 1700 | 1040                               | 1900 |

in temperatura dovrebbe essere confrontabile con il tempo totale in cui il pezzo è stato mantenuto nell'intervallo tra 650 °C e 980 °C (1200–1800 °F) successivo alla precedente ricottura. Il pezzo dovrebbe essere raffreddato in acqua dalla temperatura di solubilizzazione. Non dovrebbe essere consentito permanere troppo tempo nell'intervallo 700–1000 °C (1300–1830 °F) sino al trasferimento al raffreddamento, dopo questa ricottura finale. Le temperature minime di solubilizzazione per gli acciai duplex sono riassunte nel **Prospetto 10**.

Alle temperature di solubilizzazione, gli acciai duplex sono molto teneri, per cui distorsioni e deformazioni sono molto facili, se il pezzo non è adeguatamente supportato. Questo può essere un problema significativo per prodotti tubolari, in particolare per quelli con elevati diametri e ridotti spessori. La ri-formatura o la raddrizzatura di prodotti duplex deformati è più difficile rispetto a quella degli inossidabili austenitici a causa della maggiore resistenza a temperatura ambiente dei duplex. Accorgimenti per minimizzare la distorsione con ridotti tempi di ricottura, riscaldamento lento sino all'intervallo di ricottura o l'impiego di temperature inferiori a quelle raccomandate possono non portare in soluzione le fasi intermetalliche o causare la formazione di ulteriori fasi intermetalliche. Questo comporterebbe minore tenacità e resistenza alla corrosione.

L'uso di trattamenti di distensione per ridurre gli effetti della formatura o della raddrizzatura non è consigliabile. Gli acciai duplex hanno di per sé un'ottima resistenza alla criccabilità da tensocorrosione da cloruri e ciò può essere solo marginalmente migliorato riducendone l'incrudimento residuo. Non esiste una



**Figura 14:** Forza minima richiesta per iniziare la deformazione plastica durante il piegamento di provette di EN 1.4362 (2304), EN 1.4462 (2205), e EN 1.4404 (AISI 316L) di larghezza 50 mm (2") e 2 mm (0,08") di spessore (Fonte: Outokumpu)

temperatura adeguata al di sotto di quella di solubilizzazione cui poter distendere senza il pericolo di formazione di fasi intermetalliche che potrebbero diminuire tenacità e resistenza alla corrosione.

## 10.2 Formatura ad alta temperatura

Talvolta può essere utile riscaldare moderatamente un pezzo di acciaio duplex per favorire le operazioni di formatura. Tuttavia, il riscaldamento prolungato degli acciai duplex al di sopra di 315 °C (600 °F) può comportare perdita di tenacità a temperatura ambiente o di resistenza alla corrosione dovuta (Figura 5) a fragilità a 475 °C (885 °F). A temperature maggiori vi è il rischio di precipitazione più rapida e dannosa di fasi intermetalliche. Poiché tali fasi non interferiscono con la formatura, è possibile riscaldare gli acciai duplex ad alta temperatura per agevolare la formatura. Tuttavia, quando la temperatura di lavoro supera 300 °C (570 °F) circa, tale operazione dovrebbe essere seguita da una solubilizzazione completa ed un raffreddamento rapido (vedere Prospetto 10).

## 10.3 Formatura a freddo

Gli acciai duplex hanno evidenziato una buona formabilità in un'ampia varietà di costruzioni. La maggior parte delle applicazioni dei duplex richiede una formatura semplice, come ad esempio la laminazione di sezioni cilindriche, la formatura alla pressa, la formatura di fondi per apparecchi e serbatoi alla pressa o per laminazione. Nella maggior parte di queste applicazioni, un punto fondamentale è l'alta

**Prospetto 10:** Temperature minime di solubilizzazione per gli acciai inossidabili duplex (Fonte: dati dei produttori e ASTM A 480)

| Grado            | UNS No. | Temperatura minima di solubilizzazione |                |
|------------------|---------|----------------------------------------|----------------|
|                  |         | °C                                     | °F             |
| EN 1.4362 (2304) | S32304  | 980                                    | 1800           |
|                  | S32003  | 1010                                   | 1850           |
|                  | S32001  | 1040                                   | 1900           |
|                  | S32101  | 1020                                   | 1870           |
|                  | S32202  | 980                                    | 1800           |
|                  | S82011  | 1010                                   | 1850           |
| EN 1.4462 (2205) | S32205  | 1040                                   | 1900           |
|                  | S32506  | Da 1020 a 1120                         | Da 1870 a 2050 |
|                  | S32520  | Da 1080 a 1120                         | Da 1975 a 2050 |
| 255              | S32550  | 1040                                   | 1900           |
| EN 1.4410 (2507) | S32750  | Da 1025 a 1125                         | Da 1880 a 2060 |
|                  | S32760  | 1100                                   | 2010           |

resistenza degli acciai duplex e la potenza degli impianti di formatura. Secondo una prima stima tipica, un acciaio duplex si comporta in formatura come un acciaio austenitico della serie 300 di spessore doppio. Un confronto tra la minima forza prevista per iniziare la deformazione plastica durante il piegamento per vari acciai inossidabili è indicato in **Figura 14**. Riduzioni di spessore sono possibili usando gli acciai duplex, ma esse risultano minori di quanto previsto dall'aumento della resistenza.

Anche nel caso in cui l'impianto abbia potenza adeguata, occorre considerare il maggiore ritorno elastico dovuto all'elevata resistenza dei gradi duplex (vedere **Figura 12**).

La minore duttilità degli acciai duplex a confronto con gli austenitici deve a sua volta essere considerata. I gradi duplex hanno un allungamento minimo secondo la maggioranza delle specifiche dal 15 al 30 % a confronto del 40 % minimo previsto per gli austenitici. Mentre gli allungamenti effettivi possono essere in qualche misura maggiori, la relazione suggerita da questi valori minimi è corretta ed è un criterio valido per la formatura a freddo. I gradi duplex richiedono raggi di piegamento più generosi degli austenitici o una ricottura intermedia durante formatura in condizioni severe o per forme complesse a causa della loro inferiore duttilità.

## 10.4 Stampaggio

Gli acciai duplex sono agevolmente stampabili. Tuttavia, in molti casi gli acciai duplex sono usati in sostituzione di una parte che è stata ottimizzata per un acciaio inossidabile austenitico, ferritico o al carbonio. Il primo tentativo è spesso fatto senza alcun cambio di spessore. Per quanto la maggiore resistenza del grado duplex giustificerebbe una riduzione dello spessore, il costo della riprogettazione può far passare in secondo piano il beneficio della riduzione dei costi e del peso. In molti casi, la riduzione dello spessore potrebbe favorire la formatura. Tuttavia, nelle prime prove di formatura di un acciaio duplex, la sua lavorazione viene spesso considerata in qualche misura "difficoltosa".

Se il confronto è fatto con la formabilità dell'acciaio al carbonio o dell'inossidabile ferritico, i problemi sono correlati quasi per intero con la resistenza ed il ritorno elastico. Gli acciai duplex hanno un carico di snervamento maggiore di circa il 50 %. Gli acciai ferritici mostrano un grado di incrudimento limitato ed il carico necessario può essere relativamente basso. Gli acciai duplex partono da una resistenza elevata e la incrementano, per cui il ritorno elastico diventa un problema. D'altra parte, la duttilità degli acciai duplex è superiore, ed è possibile compensare il ritorno elastico aumentando l'entità della deformazione. Inoltre, a confronto con alcuni acciai ferritici, i duplex sono meno sensibili alla direzione di piegamento in relazione a quella di laminazione. Gli acciai duplex mostrano una certa anisotropia nelle proprietà

meccaniche a causa degli effetti della laminazione sulla struttura bifasica, ma l'effetto che ne deriva è minore rispetto agli acciai ferritici grazie alla loro maggiore duttilità.

La formatura di lamiere di acciaio inossidabile ferritico spesso viene favorita dall'imbutitura. In questa lavorazione la lamiera si deforma nel proprio piano con assottigliamenti minimi durante l'imbutitura. Negli acciai inossidabili ferritici, questa tipologia di formabilità è molto migliorata dallo sviluppo della struttura metallografica. Questo comportamento è stato poco considerato nel passato per lamierini di acciaio duplex, ma sembra improbabile che in una struttura bifasica si possano avere gli stessi vantaggi. Le procedure di imbutitura degli acciai duplex sono verosimilmente diverse in modo significativo rispetto agli inossidabili ferritici ed austenitici.

Nel caso più frequente, in cui gli acciai duplex sono confrontati con gli inossidabili austenitici, gli aggiustamenti devono essere in relazione sia con la maggiore resistenza che con la minore duttilità dei gradi duplex. Le proprietà di allungamento durante la formatura dei duplex sono limitate dalla fase ferritica ed essi non posseggono la capacità di incrudimento che permette agli inossidabili austenitici di deformarsi in misura così elevata.

## 10.5 Tornitura in lastra ("spinforming")

La resistenza meccanica ed alla corrosione degli acciai duplex, in particolare la loro resistenza alla tensocorrosione da cloruri, li rende candidati per applicazioni in parti in rotazione, come ad esempio le centrifughe. Lo spinforming è una tecnologia economica e spesso impiegata per produrre queste parti.

Lo spinforming è una lavorazione complessa, la cui riuscita è fortemente legata all'attrezzatura ed alle capacità degli operatori. Gli acciai inossidabili austenitici sono oggetto di questa lavorazione usualmente, ma richiedono spesso trattamenti multipli di ricottura intermedi per ripristinarne la duttilità durante la sequenza delle lavorazioni. La limitata esperienza nello spinforming degli acciai duplex indica che i carichi sono molto elevati, in particolare se non vi è alcuna riduzione di spessore rispetto agli acciai inossidabili austenitici. Con attrezzature di adeguata potenza e forza, gli acciai duplex possono essere lavorati con spinforming senza problemi, ma la loro ridotta duttilità può richiedere un numero maggiore di ricotture intermedie rispetto ai gradi austenitici. La planarità e la minimizzazione della "corona" di partenza sono punti importanti per la risposta allo spinning. Tuttavia, un severo spianamento meccanico, ad esempio con una livellatura a rulli, può consumare una parte della duttilità per la prima fase dello spinforming. Alcuni componenti in acciaio duplex sono stati lavorati con spinforming a temperature al di sopra di 650 °C (1200 °F), con successiva solubilizzazione.

# 11 Lavorazione per asportazione di materiale degli acciai duplex

Gli acciai inossidabili duplex hanno un carico di snervamento circa doppio rispetto ai gradi austenitici non legati all'azoto, ed il loro grado di incrudimento è almeno confrontabile con quello dei comuni gradi austenitici. Il truciolo che si forma durante la lavorazione di macchina dei duplex è resistente e abrasivo per gli utensili, specialmente per i gradi maggiormente legati. Dato che gli acciai duplex sono prodotti con il minore tenore possibile di zolfo, la rottura del truciolo non è favorita.

Per queste ragioni gli acciai duplex sono in genere più difficili da lavorare di macchina rispetto agli austenitici della serie 300 di analoga resistenza alla corrosione. Maggiori forze di taglio sono richieste e maggiore usura degli utensili sono tipici delle lavorazioni di macchina dei duplex. La più complessa lavorabilità di macchina in confronto agli austenitici si verifica con l'impiego di utensili in carburo. Ciò è illustrato in Figura 15 per confronto con alcuni acciai duplex ed il tipo EN 1.4401 (AISI 316) con un indice di lavorabilità di macchina relativo. Da notare il maggiore valore di lavorabilità dell'acciaio duplex tipo EN 1.4162 (UNS S32101) a confronto con il tipo EN 1.4401 (AISI 316).

## 11.1 Criteri generali per la lavorazione per asportazione di materiale degli acciai duplex

Per la lavorazione per asportazione di materiale degli acciai inossidabili possono essere seguite le seguenti linee guida, ma la loro importanza è ancora maggiore per i gradi duplex.

- Usare macchine potenti, rigide e con sistemi di posizionamento degli utensili e del pezzo estremamente robusti. (Le forze di taglio per realizzare tagli analoghi sono tipicamente molto maggiori per i duplex rispetto agli equivalenti acciai inossidabili austenitici.)
- Minimizzare le vibrazioni riducendo l'estensione dell'utensile al minimo possibile.
- Usare un raggio di spoglia dell'utensile non maggiore del necessario.
- Per gli utensili in carburo, preferire una geometria a spigolo vivo, pur mantenendo un'adeguata resistenza.
- Prevedere sequenze di lavorazione che consentano sempre una profondità di taglio maggiore rispetto allo strato incrudito dalla passata precedente.

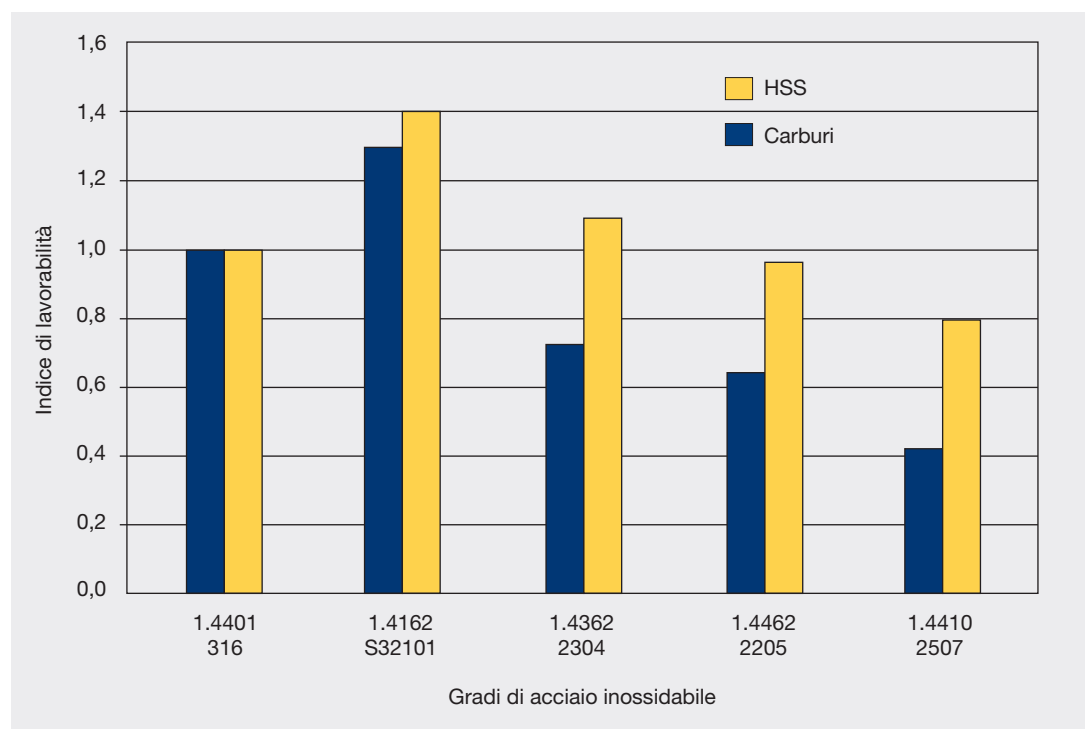
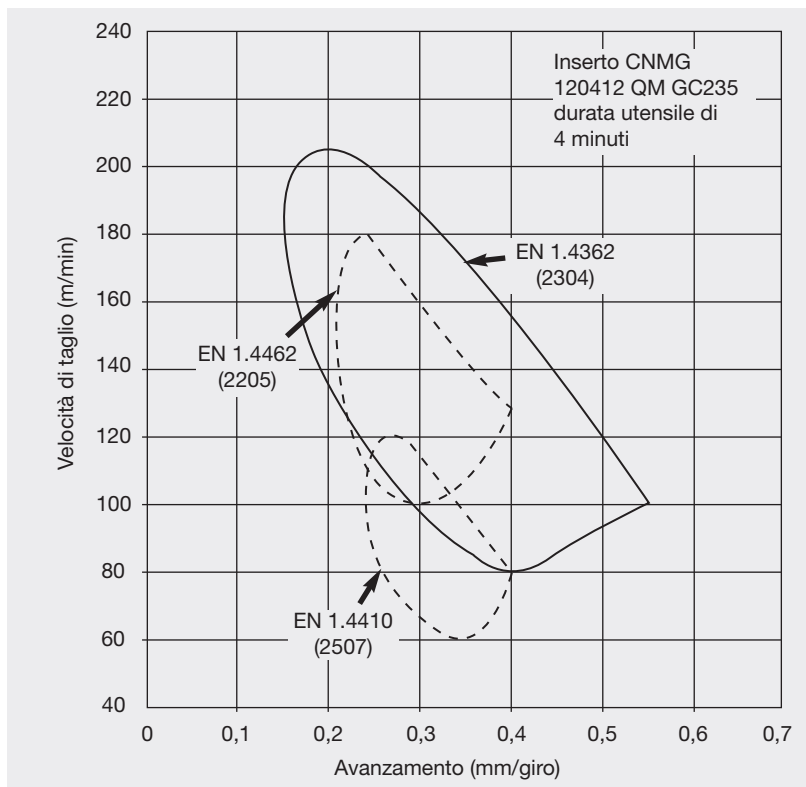


Figura 15: Lavorabilità di macchina relative degli acciai duplex a confronto con il tipo EN 1.4401 (AISI 316) con utensili in carburo cementati e con utensili ad alta velocità di taglio. (Fonte: Outokumpu)

- Usare una velocità opportuna ma non eccessiva per evitare il deterioramento e l'usura dell'utensile.
- Sostituire i consumabili degli utensili o riaffilarli ad intervalli programmati per assicurare la presenza di spigoli vivi.
- Usare generose portate di fluido di raffreddamento/lubrificazione impiegando oli di taglio o emulsioni con additivi del tipo ad alta pressione (EP)
- Usare inserti consumabili rivestiti in carburo con geometria atta a rompere il truciolo.

## 11.2 Tornitura e sfacciatura

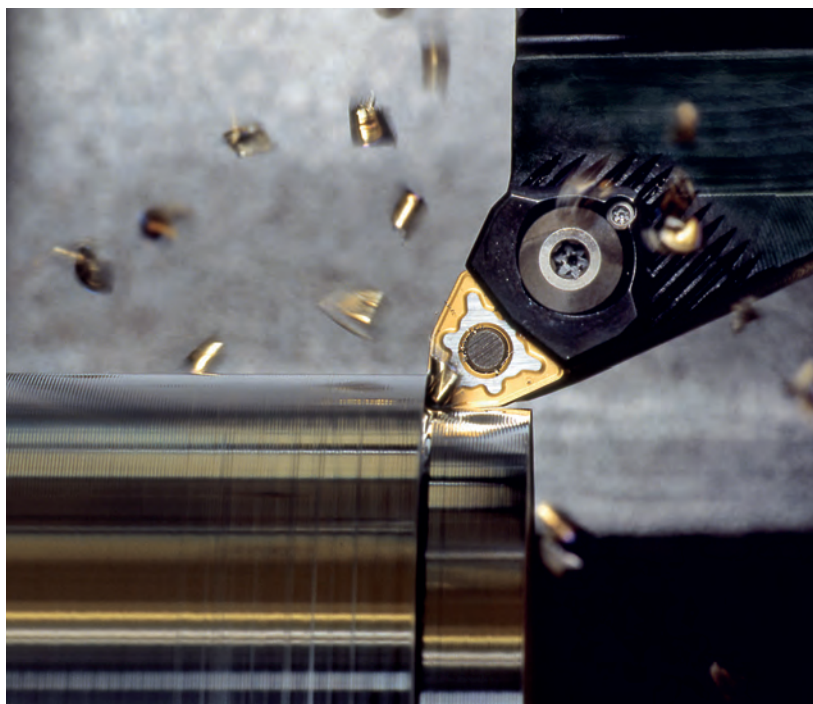
Tornitura e sfacciatura sono operazioni che coinvolgono così tante variabili che risulta impossibile fare raccomandazioni specifiche, applicabili in ogni caso. Le linee guida generali per la tornitura ed il taglio sono indicate in **Figura 16** e nel **Prospetto 11**. Utensili in carburo possono essere usati nella tornitura e consentono maggiori velocità di taglio rispetto agli utensili in acciaio super rapido. Tuttavia, gli utensili in carburo richiedono un'attenzione ancora superiore alla rigidità dell'utensile e del pezzo e sono sconsigliate interruzioni nel taglio.



**Figura 16:** Confronto tra i parametri di lavorazione per la tornitura di acciai duplex con inserti in carburo cementato con una durata dell'utensile di quattro minuti (Fonte: Sandvik)

**Prospetto 11:** Linee guida per la sfacciatura di acciai inossidabili duplex (Fonte: Outokumpu)

| Acciaio inossidabile (o dati di lavorazione) | Carburi                  |                 |                          |                 | Utensili in acciaio ad alta velocità |                 |
|----------------------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
|                                              | Sgrossatura              |                 | Finitura                 |                 |                                      |                 |
|                                              | Velocità (m/min)         | Velocità (sfm)  | Velocità (m/min)         | Velocità (sfm)  | Velocità (m/min)                     | Velocità (sfm)  |
| EN 1.4162 (S32101)                           | 170–240                  | 560–790         | 200–280                  | 660–925         | 20–30                                | 65–100          |
| EN 1.4362 (2304)                             | 120–160                  | 400–525         | 150–210                  | 500–680         | 18–25                                | 60–85           |
| EN 1.4462 (2205)                             | 90–120                   | 300–400         | 120–160                  | 400–525         | 15–20                                | 50–65           |
| Superduplex                                  | 50–70                    | 165–230         | 70–105                   | 230–350         | 10–15                                | 35–50           |
| Avanzamento (per giro)                       | 0,3–0,6 mm               | 0,012–0,024 in. | 0,05–0,3 mm              | 0,002–0,012 in. | 0,05–0,2 mm                          | 0,002–0,008 in. |
| Profondità di taglio                         | 2–5 mm                   | 0,080–0,200 in. | 0,5–2 mm                 | 0,020–0,080 in. | 0,5–2 mm                             | 0,020–0,080 in. |
| Grado                                        | 2101, 2304, 2205:        |                 | 2101, 2304, 2205:        |                 | Alta qualità                         |                 |
|                                              | ISO P20–P35 (C5)         |                 | ISO P10–P15 (C6–C7)      |                 |                                      |                 |
|                                              | Superduplex: ISO P30–P50 |                 | Superduplex: ISO P25–P35 |                 |                                      |                 |



Operazione di tornitura (Fonte: Seco Tools)

### 11.3 Fresatura frontale con carburo di tungsteno-cobalto sinterizzato

Le linee guida per la fresatura frontale di acciai duplex con carburo di tungsteno-cobalto sinterizzato sono riportate nel Prospetto 12.

- Usare inserti rivestiti oppure un inserto di grado duro per la sgrossatura. Un inserto più duro può essere usato per la finitura se è richiesta una finitura superiore.
- Usare fresatura concorde con uno spessore medio dei trucioli di almeno 0,1 mm (0,004"). Regolare l'avanzamento con un fattore di proporzionalità da 1,0 a 0,7 con un angolo di entrata variabile da 45° a 90°.
- Non impiegare liquido di raffreddamento, in particolare nella sgrossatura, per ottenere una buona espulsione dei trucioli dall'utensile.

Prospetto 12: Linee guida per la fresatura frontale di acciai duplex con carburo di tungsteno-cobalto sinterizzato cementato (Fonte: Outokumpu)

| Acciaio inossidabile (o dati di lavorazione di macchina) | Sgrossatura                                                                                            |                 | Finitura                                                                                               |                 |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|                                                          | Velocità (m/min)                                                                                       | Velocità (sfm)  | Velocità (m/min)                                                                                       | Velocità (sfm)  |
| EN 1.4162 (UNS S32101)                                   | 180–230                                                                                                | 595–760         | 200–250                                                                                                | 660–825         |
| EN 1.4362 (2304)                                         | 100–130                                                                                                | 330–425         | 130–150                                                                                                | 425–525         |
| EN 1.4462 (2205)                                         | 50–80                                                                                                  | 165–260         | 80–110                                                                                                 | 260–360         |
| EN 1.4410 (2507)                                         | 30–50                                                                                                  | 100–165         | 50–70                                                                                                  | 165–230         |
| Avanzamento (per dente)                                  | 0,2–0,4 mm                                                                                             | 0,008–0,016 in. | 0,1–0,2 mm                                                                                             | 0,004–0,008 in. |
| Profondità di taglio                                     | 2–5 mm                                                                                                 | 0,080–0,200 in. | 1–2 mm                                                                                                 | 0,040–0,080 in. |
| Grado di carburo                                         | EN 1.4162 (UNS S32101), EN 1.4362 (2304),<br>EN 1.4462 (2205): ISO P20–P40<br>Superduplex: ISO P25–P40 |                 | EN 1.4162 (UNS S32101), EN 1.4362 (2304),<br>EN 1.4462 (2205): ISO P10–P25<br>Superduplex: ISO P20–P30 |                 |

## 11.4 Foratura con punte elicoidali in acciaio super rapido

Le linee guida per la foratura con punte elicoidali in acciaio rapido sono riportate nei Prospetti 13 e 14.

- Geometria della punta: angolo della punta 130°, raccomandata la geometria auto – centrante; raccomandate punte web thinning (ad anima sottile) per forature di grande diametro.

- Liquido di raffreddamento; emulsione al 10 % con flusso abbondante verso la punta dell'utensile; per profondità maggiori a due volte il diametro, rimuovere i trucioli riempiendo periodicamente il foro con il liquido di raffreddamento;
- Maggiori velocità: il TiN consente un aumento del 10 %; un raffreddamento attraverso il foro consente un aumento del 10–20 %.

Prospetto 13: Parametri di foratura con punte elicoidali per acciai duplex in unità del SI (Fonte: Outokumpu)

| Diametro di foratura (mm) | Velocità (m/min)          |                     |                     |                  | Avanzamento (mm/giro)     |                     |                     |                  |
|---------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
|                           | EN 1.4162<br>(UNS S32101) | EN 1.4362<br>(2304) | EN 1.4462<br>(2205) | Super-<br>duplex | EN 1.4162<br>(UNS S32101) | EN 1.4362<br>(2304) | EN 1.4462<br>(2205) | Super-<br>duplex |
| 1–3                       | 12–37                     | 6–10                | 6–8                 | 5–8              | 0,05                      |                     |                     | 0,04             |
| 5                         | 12–37                     | 10–12               | 10–12               | 9–11             | 0,10                      |                     |                     | 0,08             |
| 10                        | 12–37                     | 12–15               | 10–12               | 9–11             | 0,20                      |                     |                     | 0,15             |
| 15                        | 12–37                     | 12–15               | 10–12               | 9–11             | 0,25                      |                     |                     | 0,20             |
| 20                        | 12–37                     | 12–15               | 10–12               | 9–11             | 0,30                      |                     |                     | 0,25             |
| 30                        | 12–37                     | 12–15               | 10–12               | 9–11             | 0,35                      |                     |                     | 0,30             |
| 40                        | 12–37                     | 12–15               | 10–12               | 9–11             | 0,41                      |                     |                     | 0,35             |

Prospetto 14: Parametri di foratura con punte elicoidali per acciai duplex in unità anglosassoni (Fonte: Outokumpu)

| Diametro di foratura (in.) | Velocità (sfm)            |                     |                     |                  | Avanzamento (in./giro)    |                     |                     |                  |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
|                            | EN 1.4162<br>(UNS S32101) | EN 1.4362<br>(2304) | EN 1.4462<br>(2205) | Super-<br>duplex | EN 1.4162<br>(UNS S32101) | EN 1.4362<br>(2304) | EN 1.4462<br>(2205) | Super-<br>duplex |
| 0,040–0,120                | 40–120                    | 20–33               | 20–25               | 16–25            | 0,002                     |                     |                     | 0,0015           |
| 0,2                        | 40–120                    | 33–40               | 33–40               | 30–36            | 0,004                     |                     |                     | 0,003            |
| 0,4                        | 40–120                    | 40–50               | 33–40               | 30–36            | 0,008                     |                     |                     | 0,006            |
| 0,6                        | 40–120                    | 40–50               | 33–40               | 30–36            | 0,01                      |                     |                     | 0,008            |
| 0,8                        | 40–120                    | 40–50               | 33–40               | 30–36            | 0,012                     |                     |                     | 0,01             |
| 1,2                        | 40–120                    | 40–50               | 33–40               | 30–36            | 0,014                     |                     |                     | 0,012            |
| 1,6                        | 40–120                    | 40–50               | 33–40               | 30–36            | 0,016                     |                     |                     | 0,014            |

## 12 Saldatura degli acciai duplex

### 12.1 Criteri generali di saldatura

#### 12.1.1 Differenze tra gli acciai inossidabili duplex e gli acciai austenitici

Quando vi sono problemi nella saldatura degli acciai inossidabili austenitici, essi sono spesso dovuti alla zona fusa, in particolare per via della tendenza alla criccabilità a caldo, con una solidificazione di tipo austenitico o principalmente austenitica. Per gli acciai inossidabili austenitici più comuni, modificare la composizione chimica del materiale d'apporto per ottenere un opportuno tenore di ferrite minimizza questi problemi. Per gli inossidabili austenitici più legati, in cui è necessario l'impiego di consumabili base nichel e la solidificazione austenitica è inevitabile, il problema è affrontato con ridotti apporti termici, che spesso richiedono più passate per completare il giunto.

Poiché gli acciai duplex hanno un'ottima resistenza alla criccabilità a caldo grazie al loro tenore di ferrite, la criccabilità a caldo è rara durante la saldatura di questi acciai. I problemi più rilevanti durante la saldatura degli acciai duplex sono correlati alla Zona Termicamente Alterata (ZTA) piuttosto che alla zona fusa. I problemi della ZTA sono la diminuzione della resistenza alla corrosione, la tenacità o la criccabilità dopo saldatura. Per evitare tali problemi, la procedura di saldatura dovrebbe minimizzare il tempo di permanenza complessivo nell'intervallo "al calor rosso" oltre che controllare l'apporto termico per ogni passata. L'esperienza ha dimostrato che questo approccio può consentire procedure ottimali tanto tecnicamente che economicamente.

Partendo da questi presupposti, è possibile fornire alcune linee guida per la saldatura degli acciai duplex ed applicare quindi questi criteri a specifici processi di saldatura.

#### 12.1.2 Selezione del materiale base

La saldabilità degli acciai inossidabili duplex può essere sostanzialmente modificata variandone l'analisi chimica o le modalità di produzione. L'importanza del contenuto di una sufficiente quantità di azoto del materiale base è stata più volte messa in evidenza. Se il materiale base è raffreddato lentamente nell'intervallo tra 700 °C e 1000 °C (da 1300 a 1800 °F) o se è consentito raffreddare in aria in questo intervallo per un minuto circa prima del raffreddamento in acqua, allora queste situazioni consumano parte del tempo a disposizione del saldatore per completare il giunto senza che si verifichino dannose precipitazioni. È importante che lo stato metallurgico del materiale impiegato nella specifica costruzione sia della stessa qualità, per composizione chimica e modalità di produzione, rispetto al materiale impiegato per la qualificazione della procedura di saldatura. La scelta in base alla composizione e alla specificazione di opportune prove per il materiale base è stata discussa nella sezione relativa alle specificazioni degli utilizzatori finali ed al controllo della qualità (sezione 6).

#### 12.1.3 Pulitura prima della saldatura

La raccomandazione di pulire tutte le zone che devono essere riscaldate prima di iniziare la saldatura non è tipica dei soli acciai duplex, ma di tutti gli inossidabili. L'analisi chimica del materiale base e dei consumabili sono state sviluppate supponendo che non vi siano fonti di contaminazione addizionali. Sporczia, grasso, oli, vernice e fonti di umidità di ogni genere possono interferire con le operazioni di saldatura ed influenzare negativamente la resistenza alla corrosione e le proprietà meccaniche del giunto. Nessuna qualificazione di procedura può servire, se il materiale base non è pulito a fondo prima della saldatura.

#### 12.1.4 Progettazione dei giunti saldati

Per gli acciai duplex, la progettazione del giunto saldato deve favorire la completa penetrazione ed evitare durante la solidificazione la presenza di materiale base non diluito in zona fusa. È consigliabile lavorare di macchina piuttosto che molare i lembi per ottenere costanza dei valori della spalla e della luce. Quando occorre molare, particolare cura deve essere posta a garantire l'uniformità della preparazione dei lembi e dell'accoppiamento. Ogni residuo della molatura deve essere rimosso per ottenere la completa



Reattore per delignificazione in EN 1.4462 (2205), Enterprise Steel Fab, Kalowna, Prince George, British Columbia, Canada (Fonte: Outokumpu)

fusione e penetrazione. Per un acciaio inossidabile austenitico, un saldatore esperto può sopperire a carenze della preparazione del giunto con opportuni movimenti della torcia. Nel caso dei duplex, alcune di queste tecniche possono causare una permanenza nell'intervallo di temperatura critico maggiore del previsto, portando risultati diversi da quelli relativi alla procedura qualificata.

Alcune soluzioni per giunti saldati tra acciai duplex sono illustrate in Figura 17. Altre soluzioni sono possibili, a condizione che assicurino giunti a piena penetrazione e minimizzino i rischi di sfondamento.

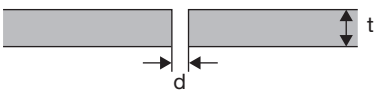
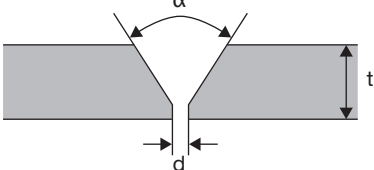
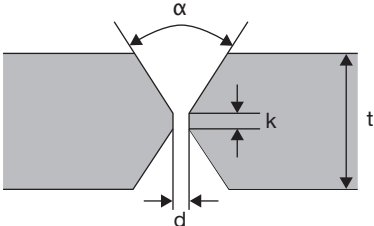
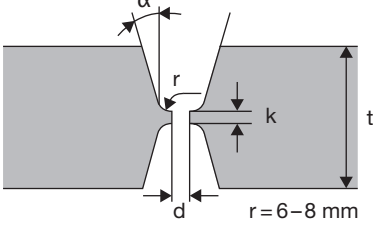
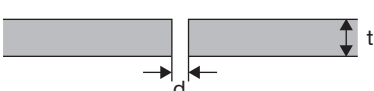
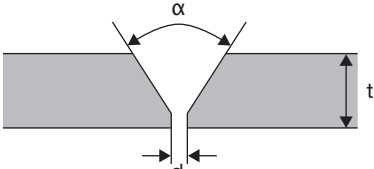
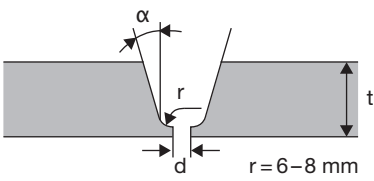
| Cianfrino                                                                           | Processo | Spessore<br>t (mm) | Luce<br>d (mm) | Spalla<br>k (mm) | Angolo<br>$\alpha$ (°) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------|----------------|------------------|------------------------|
|    | WIG      | 3-5                | 1-3            | -                | -                      |
|                                                                                     | MIG      | 3-6                | 1-3            | -                | -                      |
|                                                                                     | E-Hand   | 3-4                | 1-3            | -                | -                      |
|    | E-Hand   | 4-15               | 1-3            | 1-2              | 55-65                  |
|                                                                                     | WIG      | 3-8                | 1-3            | 1-2              | 60-70                  |
|                                                                                     | MIG      | 5-12               | 1-3            | 1-2              | 60-70                  |
|                                                                                     | UP       | 9-12               | 0              | 5                | 80                     |
|   | E-Hand   | >10                | 1,5-3          | 1-3              | 55-65                  |
|                                                                                     | MIG      | >10                | 1,5-3          | 1-3              | 60-70                  |
|                                                                                     | UP       | >10                | 0              | 3-5              | 90                     |
|  | E-Hand   | >25                | 1-3            | 1-3              | 10-15                  |
|                                                                                     | MIG      | >25                | 1-3            | 1-3              | 10-15                  |
|                                                                                     | UP       | >25                | 0              | 3-5              | 10-15                  |
|  | WIG      | >3                 | 0-2            | -                | -                      |
|                                                                                     | MIG      | >3                 | 0-2            | -                | -                      |
|                                                                                     | E-Hand   | >3                 | 0-2            | -                | -                      |
|  | E-Hand   | 3-15               | 2-3            | 1-2              | 60-70                  |
|                                                                                     | WIG      | 2,5-8              | 2-3            | 1-2              | 60-70                  |
|                                                                                     | MIG      | 3-12               | 2-3            | 1-2              | 60-70                  |
|                                                                                     | UP       | 4-12               | 2-3            | 1-2              | 70-80                  |
|  | E-Hand   | 12-60              | 1-2            | 2-3              | 10-15                  |
|                                                                                     | WIG      | >8                 | 1-2            | 1-2              | 10-15                  |
|                                                                                     | MIG      | >12                | 1-2            | 2-3              | 10-15                  |
|                                                                                     | UP       | >10                | 1-2            | 1-3              | 10-15                  |

Figura 17: Esempi di giunti saldati impiegati per acciai inossidabili duplex (Fonte: Aperam)

### 12.1.5 Preriscaldamento

Come criterio generale, il preriscaldamento non è raccomandato, perché può risultare dannoso. Esso non dovrebbe essere previsto dalle procedure, a meno di casi particolari. Il preriscaldamento può essere benefico se impiegato per eliminare l'umidità dall'acciaio, la quale può essere dovuta alla condensa notturna. Se il preriscaldamento è eseguito per questo scopo, l'acciaio dovrebbe essere riscaldato a circa 100 °C (200 °F) uniformemente e solo dopo la pulitura dei lembi del giunto.

### 12.1.6 Apporto termico e temperature di interpass

Gli acciai duplex sono in grado di sopportare solo apporti termici limitati. La solidificazione della zona fusa di tipo bi – fasico è resistente alla criccabilità a caldo, molto più degli acciai inossidabili austenitici. I duplex, con maggiore conduttività termica e minore coefficiente di dilatazione termica, non presentano le stesse concentrazioni di tensione locali degli inossidabili austenitici. Per quanto sia necessario limitare la severità del controllo dei giunti, la criccabilità a caldo non è un problema comune.

Un eccessivo apporto termico può causare, in zona fusa e in ZTA, eccessivi tenori di ferrite, con conseguenti diminuzioni di tenacità e di resistenza alla corrosione. Eccessivi apporti termici aumentano il rischio di formazione di fasi intermetalliche. Per evitare problemi in ZTA, le procedure di saldatura dovrebbero consentire un raffreddamento rapido di questa regione dopo saldatura. La temperatura del pezzo è importante, perché ha l'effetto più significativo sul raffreddamento della ZTA. Come criterio generale, la massima temperatura di interpass è limitata a 150 °C (300 °F) per acciai duplex standard e a 100 °C (210 °F) per superduplex. Tale limitazione dovrebbe essere imposta in sede di qualificazione della procedura di saldatura e la saldatura di produzione monitorata per assicurare che la temperatura di interpass non sia maggiore di quella usata in sede di qualificazione. Termometri elettronici e termocoppie sono gli strumenti di controllo preferiti per la misura delle temperature di interpass. Non sarebbe conservativo, nella qualificazione della procedura, consentire al saggio di prova con tecnica multipass di raggiungere una temperatura di interpass minore di quella ragionevolmente o economicamente ottenibile in produzione. In caso di un numero elevato di saldature, la programmazione della saldatura in modo da garantire un adeguato tempo di raffreddamento tra le passate è una pratica corretta ed economica.

### 12.1.7 Trattamento termico dopo saldatura

Il trattamento di distensione non è richiesto per gli acciai duplex, anzi è possibile che risulti dannoso poiché durante il trattamento termico possono precipitare fasi intermetalliche o verificarsi fragilità da fase alfa primo (475 °C/885 °F) causando una

diminuzione della tenacità e della resistenza alla corrosione. Temperature di trattamento termico superiori a 315 °C (600 °F) possono influenzare negativamente la tenacità e la resistenza alla corrosione degli acciai duplex.

Ogni trattamento termico dopo saldatura dovrebbe includere una solubilizzazione completa, seguita da un raffreddamento in acqua (vedere Prospetto 10). La solubilizzazione completa dovrebbe essere considerata dopo la saldatura autogena, poiché la microstruttura può risultare ricca di ferrite, se non è stato impiegato un consumabile più legato del materiale base.

Se dopo saldatura è prevista una solubilizzazione completa ed un raffreddamento successivo, ad esempio nella fabbricazione di un raccordo, allora il trattamento termico dovrebbe essere considerato parte integrante della procedura di saldatura. Il trattamento di solubilizzazione può eliminare i problemi relativi all'eccesso di ferrite e alle fasi intermetalliche, ed il processo di fabbricazione può tollerare alcune di queste condizioni non desiderate, come stato intermedio prima della ricottura finale.

### 12.1.8 Bilanciamento ottimale delle fasi

Si dice spesso che il bilanciamento delle fasi degli acciai duplex sia "50-50", con eguali quantità di ferrite ed austenite. Tuttavia, ciò non è rigorosamente esatto, poiché i moderni acciai duplex sono bilanciati per avere un tenore di ferrite tra il 40 % ed il 50 %, il resto austenite. Di norma, si ritiene che le favorevoli caratteristiche dei duplex siano possibili se è presente almeno il 25 % di ferrite, con la restante parte di austenite.

In alcuni dei processi di saldatura, in particolare quelli con protezione di scoria, l'equilibrio delle fasi è stato ottimizzato aumentando il tenore di austenite per migliorare la tenacità, compensando la diminuzione della tenacità causata dall'ossigeno proveniente dalla scoria. La tenacità di questi materiali d'apporto è comunque molto inferiore ai valori possibili per lamiere o tubi ricotti, ma essa può comunque risultare adeguata per le condizioni di servizio previste. Nessuno dei processi di saldatura è in grado di fornire la tenacità del materiale base allo stato completamente ricotto. Una restrizione dell'intervallo relativo al tenore di ferrite in zona fusa più severa rispetto al valore richiesto per acciai duplex ricotti può essere una limitazione immotivata ai metodi di saldatura applicabili.

Il bilanciamento delle fasi in ZTA, ossia la lamiera o il tubo originale più un ciclo termico, è di norma leggermente sbilanciato verso la ferrite rispetto al materiale base. Una misura metallografica accurata del bilanciamento delle fasi in ZTA è quasi impossibile. Se questa zona risulta molto ricca di ferrite, ciò può essere dovuto al caso molto raro di un raffreddamento molto rapido, che provoca un eccesso di ferrite e la diminuzione della tenacità.

## 12.1.9 Giunti eterogenei

Gli acciai duplex possono essere saldati ad altri duplex, agli inossidabili austenitici, agli acciai basso legati e agli acciai al carbonio.

I materiali di apporto di inossidabili duplex con maggiore tenore di nichel rispetto al materiale base sono spesso usati per saldare acciai duplex ad altri duplex, di grado diverso. L'elevato tenore di nichel del consumabile garantisce la formazione di un adeguato tenore di austenite durante il raffreddamento del giunto.

Nel caso di saldatura con acciai austenitici, sono usati di norma consumabili austenitici a basso carbonio e tenore di molibdeno intermedio tra i due acciai; per questi giunti è spesso impiegato materiale d'apporto AWS E309LMo/ER309LMo. Lo stesso consumabile, oppure il tipo AWS E309L/ER309L, è usato di norma per saldare acciai duplex ad acciai bassolegati o al carbonio. Se si usano consumabili base nichel, essi devono essere privi di niobio (columbio). Poiché gli acciai inossidabili austenitici hanno una resistenza inferiore ai gradi duplex, i giunti realizzati con consumabili austenitici possono non essere resistenti come il materiale base duplex.



Struttura metallografica della zona fusa, acciaio EN 1.4462 (2205), 500× (Fonte: Lincoln Smitweld bv)

Il Prospetto 15 riassume i consumabili di uso comune per la saldatura degli acciai duplex con altri acciai dissimili. Questi esempi riportano la designazione AWS (E) relativa agli elettrodi rivestiti, ma in funzione del processo, delle geometria del giunto e di altre variabili, fili pieni (con designazione AWS ER) e fili animati possono essere considerati.

Prospetto 15: Consumabili utilizzati per la Saldatura eterogenea

|                                                               | 1.4362 (2304), 1.4162 (S32101)<br>1.4062 (S32202), S82011 | 1.4462 (2205)<br>S32003   | Duplex 25 % Cr<br>Superduplex |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 1.4362 (2304)<br>1.4162 (S32101)<br>1.4062 (S32202)<br>S82011 | 23Cr-7Ni-N<br>E2209<br>E309L                              | E2209                     | E2209                         |
| EN 1.4462 (2205)<br>S32003                                    | E2209                                                     | E2209                     | 25Cr-10Ni-4Mo-N               |
| Duplex 25 % Cr<br>Superduplex                                 | E2209                                                     | 25Cr-10Ni-4Mo-N           | 25Cr-10Ni-4Mo-N               |
| 1.4301 (304)                                                  | E2209<br>E309L<br>E309LMo                                 | E2209<br>E309LMo          | E2209<br>E309LMo              |
| 1.4401 (316)                                                  | E2209<br>E309LMo                                          | E2209<br>E309LMo          | E2209<br>E309LMo              |
| Acciaio al carbonio<br>Acciaio bassolegato                    | E2209<br>E309L<br>E309LMo                                 | E2209<br>E309L<br>E309LMo | E2209<br>E309L<br>E309LMo     |

## 12.2 Qualificazione della procedura di saldatura

Con gli acciai inossidabili duplex, le comuni prove per la qualificazione delle procedure di saldatura sono molto semplici, con solo un numero ridotto di test per qualificare il materiale, il consumabile ed il processo di saldatura. Con prove di durezza e di piegamento (per la ricerca di martensite e di criccabilità a caldo, rispettivamente), queste prove di qualificazione rispecchiano la lunga esperienza di problemi caratteristici degli acciai ferritici, martensitici o austenitici. I duplex raramente hanno problemi con questi requisiti, ma d'altra parte questi test difficilmente possono individuare la presenza di fasi intermetalliche o eccessi di ferrite, problemi tipici degli acciai duplex. Inoltre, per la necessità di limitare la permanenza totale in temperatura della ZTA, le proprietà dei gradi duplex risultano variabili con lo spessore ed i parametri della specifica di saldatura. Di conseguenza, la "qualificazione" deve essere intesa in senso lato, ossia come dimostrazione che le procedure che saranno usate in produzione non causano uno scaldamento inaccettabile delle proprietà di interesse ingegneristico, in particolare la tenacità e la resistenza alla corrosione.

Sarebbe conservativo qualificare la procedura di saldatura con ogni spessore e geometria, in quanto differenze anche marginali dei parametri possono causare variazioni significative dei risultati in produzione. Tuttavia, la complessità delle costruzioni attuali renderebbe molto costose queste prove. Si ottengono risparmi qualificando le procedure (definite per spessore di parete, consumabile e processo di saldatura) determinate in base ai casi di produzione più comuni per i duplex.

## 12.3 Processi di saldatura

La seconda generazione di acciai duplex vide un significativo sviluppo commerciale nei primi anni '80. Data la scarsa conoscenza degli effetti dell'azoto nel controllo della stabilità delle fasi, l'attenzione era rivolta soprattutto alla limitazione dell'apporto termico. Con limitazioni tanto severe all'apporto termico, molti dei processi di saldatura ad elevato tasso di deposizione del materiale, come l'arco sommerso, furono ritenuti inadeguati per gli acciai duplex. Tuttavia, le proprietà dei duplex sono così interessanti che molti sforzi furono fatti per capire come utilizzare anche i processi più economici. Il risultato è che, di principio, tutti i processi a meno della fiamma ossiacetilenica, a causa della tendenza alla carburazione della zona fusa, sono oggi applicabili agli acciai duplex.

### 12.3.1 Saldatura con elettrodo non consumabile (GTAW/TIG)

La saldatura con elettrodo non consumabile (GTAW), talvolta indicata anche come saldatura TIG (tungsten inert gas), è utile soprattutto per brevi tratti eseguiti in manuale. Essa può essere automatizzata per geometrie semplici, ma in genere non è la soluzione più economica in grosse costruzioni ove sono richieste numerose saldature. Poiché numerose costruzioni richiedono l'esecuzione di alcune saldature eseguite con TIG anche quando la tecnologia di saldatura principale è un'altra, è in genere opportuno qualificare procedure TIG per riparazioni o rifiniture locali di altre saldature.

#### Apparecchiature

La saldatura TIG è eseguita con generatori a corrente costante, con circuiti ausiliari ad alta frequenza per l'accensione dell'arco. La saldatura TIG deve essere eseguita in corrente continua, polarità diretta (CCPD), con elettrodo al negativo. L'uso di polarità inversa (CCPI) porterebbe al deterioramento dell'elettrodo.

L'elettrodo deve essere di tungsteno toriato al 2 % (AWS specifica 5.12 classificazione EWTh-2 AWS). Il controllo dell'arco è favorito dall'affilatura conica della punta dell'elettrodo con angolo del cono da 30° a 60° e con l'estremità della punta appiattita. L'angolo ideale della punta per la corretta penetrazione in applicazioni automatiche è ottenuto sperimentalmente, con prove di pre-produzione.

#### Materiali d'apporto

La maggioranza dei materiali d'apporto duplex sono descritti di pari composizione chimica rispetto ai rispettivi materiali di base, per quanto, in realtà, risultino più legati in nichel. Di norma, vi è dal 2 % al 4 % di nichel in più rispetto al materiale base. Il tenore di azoto è in genere leggermente inferiore nel materiale d'apporto rispetto al materiale base. In genere, si accetta che i materiali d'apporto duplex più alto legati siano adatti per la saldatura dei duplex meno legati. Questi materiali d'apporto possono fornire risultati soddisfacenti nella saldatura dei tipi duplex con acciai austenitici, bassolagati o al carbonio.



Impianto di estrazione idrocarburi in EN 1.4410 (2507);  
(Fonte: Aquatech)



**Saldatura meccanizzata in loco di una tubazione di acciaio inossidabile duplex (Fonte: Arco Exploration and Production Technology)**

### Protezione gassosa

Nella saldatura TIG, come anche in ogni processo con protezione gassosa, è essenziale che il bagno di fusione sia protetto dall'ossidazione e dalla contaminazione atmosferica. Di norma, tale protezione è ottenuta con un gas inerte, l'argon, con purezza superiore o eguale al 99,95 %. È importante che il circuito del gas sia pulito, asciutto e privo di perdite, e che il gas possa scorrere in modo regolare per proteggere adeguatamente, senza però creare turbolenze o aspirare aria nel gas di protezione.

Il flusso di gas deve iniziare alcuni secondi prima dell'accensione dell'arco e deve essere mantenuto alcuni secondi dopo il suo spegnimento, di principio per un tempo tale da consentire alla zona fusa ed alla ZTA di raffreddarsi al di sotto dell'intervallo di ossidazione dell'acciaio inossidabile. Per la protezione dell'elettrodo, sono suggerite portate di 12–18 l/min (0,4–0,6 cfm) usando un comune diffusore di gas (gas lens), con valori ridotti alla metà in caso di semplici ugelli.

Le portate del gas di protezione al rovescio (a sua volta argon puro) dipendono dalle dimensioni della passata, ma devono essere adeguate ad assicurare la completa rimozione dell'aria e la completa protezione del giunto, come evidenziato dall'essenza di colori di rinvenimento. Dato che l'argon è più pesante dell'aria, l'alimentazione deve avvenire dal basso verso l'alto del volume interessato, con un lavaggio pari ad almeno sette volte il volume.

Giunti soddisfacenti sono stati ottenuti con argon puro, ma sono possibili ulteriori miglioramenti. L'aggiunta sino al 3 % di azoto secco può aiutare a trattenere l'azoto in zona fusa, in particolare per i gradi duplex più alto legati. Poiché si è constatato che l'aggiunta di azoto aumenta l'usura dell'elettrodo, l'aggiunta di elio compensa parzialmente questo effetto.

Aggiunte di ossigeno ed anidride carbonica al gas di protezione devono essere evitate in quanto riducono la resistenza alla corrosione del giunto. L'idrogeno non deve impiegato nel gas di protezione a causa della possibilità di infragilimento da idrogeno o di cricche da idrogeno nella ferrite degli acciai duplex.

Il sistema di adduzione del gas e di raffreddamento ad acqua della torcia, se presenti, devono essere verificati periodicamente per assicurare che il gas si mantenga asciutto e pulito.

### Tecnica e parametri

Con gli acciai duplex è particolarmente importante ottenere una adeguata preparazione dei lembi, allineamento, spalla e luce. Mentre gli inossidabili austenitici possono tollerare l'uso di specifiche tecniche per sopperire alla carenze della preparazione dei giunti, per i duplex queste tecniche possono aumentare il tempo di permanenza in temperatura. È inoltre raccomandato evitare l'uso di piatti di sostegno in rame, dato che gli inossidabili duplex sono sensibili alla contaminazione superficiale da rame.

Accensioni dell'arco al di fuori della zona di saldatura crea punti di saldatura autogena locali con elevatissime velocità di raffreddamento, con elevati tenori di ferrite localizzati e la possibile diminuzione della resistenza alla corrosione, in questi punti. L'accensione dell'arco deve essere eseguita nel cianfrino, per evitare questo problema.

I punti di saldatura a fondo cianfrino devono essere fatti con la completa protezione gassosa. Non dovrebbero essere fatti punti in cianfrino all'inizio della passata di penetrazione. Idealmente, per evitare la criccabilità della prima passata associata ai punti a fondo cianfrino, la prima passata di penetrazione dovrebbe essere interrotta ed i punti rimossi per molatura, oppure parzialmente molati prima di eseguire la passata.

La larghezza della luce deve essere tenuta costante per assicurare nella prima passata un corretto apporto termico ed una giusta diluizione. La partenza e la fine della prima passata devono essere molate prima di iniziare le passate di riempimento. Il pezzo deve potersi raffreddare al di sotto di 150 °C (300 °F) per acciai duplex standard e 100 °C (210 °F) per superduplex tra una passata e l'altra per garantire l'adeguato raffreddamento della ZTA prima delle passate successive.



Serbatoio per l'autotrasporto di asfalto in lean duplex (Fonte: Outokumpu)

Per il TIG, il consumabile più usato per la saldatura degli acciai duplex è di tipo corrispondente (matching), in qualche misura più legato rispetto al materiale base. I consumabili di tipo corrispondente per i duplex alto legati sono stati usati con successo, ad esempio un materiale d'apporto tipo superduplex è stato usato per saldare del materiale base EN 1.4462 (2205). I diametri più usati per i consumabili sono 1,6 mm, 2,4 mm e 3,2 mm (1/16", 3/32" e 1/8"). I consumabili devono essere puliti ed asciutti, e conservati in un recipiente adeguato sino all'utilizzo. I migliori risultati si ottengono saldando in posizione piana. La torcia dovrebbe essere mantenuta il più possibile in posizione verticale per minimizzare l'aspirazione di aria nel gas di protezione.

C'è una certa libertà nella scelta dell'apporto termico da utilizzare in relazione all'intervallo di spessore del materiale base ed alla geometria del giunto. L'apporto termico è compreso di norma nell'intervallo tra 0,5 kJ/mm e 2,5 kJ/mm (da 15 a 65 kJ/pollice) come calcolato con la seguente relazione:

$$\text{Apporto termico (kJ/mm)} = (V \times A) / (S \times 1000)$$

dove V = tensione (Volt)  
A = intensità di corrente (Ampere)  
S = velocità di saldatura (mm/s)

oppure

$$\text{Apporto termico (kJ/")} = (V \times A \times 6) / (S \times 100)$$

dove V = tensione (Volt)  
A = intensità di corrente (Ampere)  
S = velocità di saldatura (pollici/min)

Raccomandazioni generali per l'apporto termico:  
EN 1.4362 (2304)\* 0,5–2,0 kJ/mm (15–50 kJ/pollice)  
EN 1.4462 (2205) 0,5–2,5 kJ/mm (15–65 kJ/pollice)  
EN 1.4410 (2507) 0,3–1,5 kJ/mm (8–38 kJ/pollice)  
(\*) o lean duplex

Il TIG, se impiegato con protezione gassosa adeguata e controllo della permanenza in temperatura, fornisce

giunti con buona tenacità e resistenza alla corrosione ed è versatile, nell'ambito delle situazioni in cui può essere usato. Il TIG è spesso usato per integrare e finire la fabbricazione di costruzioni realizzate con altri processi di saldatura. E' importante che le procedure di saldatura TIG siano qualificate per essere idonee alla varietà di situazioni in cui possono essere usate.

### 12.3.2 Saldatura con elettrodo consumabile a filo continuo (GMAW/MIG)

La saldatura con elettrodo consumabile a filo continuo (GMAW), talvolta denominate MIG (metal inert gas), è usata soprattutto per passate lunghe che richiedono depositi di volumi di materiale relativamente abbondanti, in modo economico. Può essere automatizzata per geometrie semplici. La saldatura MIG è spesso impiegata per le passate più lunghe ed è poi integrata dalla saldatura TIG per un miglior controllo durante le complesse fasi di rifinitura.

#### Apparecchiature

Il MIG richiede apparecchiature specifiche, che includono un generatore a tensione costante con pendenza variabile e controllo con induttanza regolabile o possibilità di funzionamento in arco pulsato. Il MIG dovrebbe essere impiegato in corrente continua, polarità inversa (CCPI), con elettrodo positivo. Vi sono tre modalità principali di trasferimento del materiale d'apporto.

#### Trasferimento per corto circuito

Questa modalità, che richiede controlli separati della pendenza della curva e dell'induttanza al secondario, è utile per materiali aventi spessore sino a circa 3 mm (1/8"). Questa modalità fornisce il minore apporto termico ed è utile soprattutto per piccole sezioni, in cui vi è il rischio di deformazioni dovute all'apporto termico. Può essere impiegato per saldature in posizione.

### Trasferimento con arco pulsato

Questa modalità richiede due generatori di saldatura per coprire i due intervalli di corrente necessari, commutando tra i due per ottenere la pulsazione. Il trasferimento del consumabile è abbondante durante la fase spray, ma modesto durante la fase globulare. Questa combinazione fornisce il vantaggio di un elevato tasso di deposito con apporti termici limitati.

### Trasferimento spray

Questa modalità fornisce elevati tassi di deposito con archi stabili, ma anche elevati apporti termici. E' generalmente limitato alla posizione piana. Risulta economico se usato per passate lunghe, dritte con giunti di medie dimensioni.

### Materiali d'apporto

Il MIG usa elettrodi consumabili in forma di filo continuo, alimentato alla torcia da un sistema di avanzamento automatico. I consumabili per la saldatura MIG di acciai duplex sono di composizione pari al metallo base, con tenori di nichel maggiori per ottenere il desiderato bilanciamento delle fasi e proprietà allo stato come saldato.

### Protezione gassosa

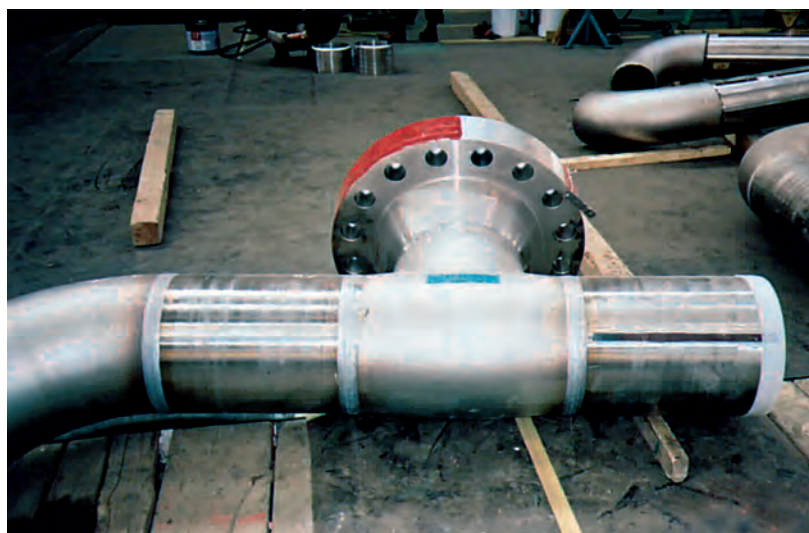
La scelta del gas di protezione per il MIG è in qualche misura più complessa rispetto al TIG e dipende in misura significativa dall'impiego da parte del costruttore di miscele gassose premiscelate oppure dalla sua capacità di realizzarle sul posto. I gas di protezione per il MIG vanno dall'argon puro sino all'80 % circa di argon con aggiunte di elio, azoto ed ossigeno, misurate per migliorare la saldabilità e le proprietà finali della struttura saldata. Le portate dipendono dalla modalità di trasferimento, dalla velocità di saldatura e dal diametro del filo, ma sono comprese in genere nell'intervallo 12–16 l/min (0,4–0,6 cfm) per fili di diametro tra 1 mm a 1,6 mm (da 0,035" a 0,063"). Valori eccessivi della sporgenza libera del filo andrebbero evitati per garantire una corretta protezione durante la saldatura. Come osservato per il TIG, l'integrità del circuito di alimentazione del gas è critica e vanno prese precauzioni contro l'assorbimento di aria nel gas di protezione. Poiché la saldatura è eseguita con passate lunghe, la protezione è importante per mantenere la qualità della saldatura. L'idrogeno deve essere evitato nel gas di protezione primario e nella protezione al rovescio a causa della possibilità di infragilimento da idrogeno o di cricche da idrogeno nella ferrite.

### Tecnica e parametri

I parametri tipici per la saldatura con trasferimento per corto circuito e spray arc sono riassunti nel Prospetto 16.

Come nel caso della saldatura TIG dei duplex, anche il MIG richiede una corretta preparazione dei lembi, allineamento, spalla e luce. L'uso di sostegni al rovescio di rame dovrebbe essere di principio evitato poiché gli acciai duplex sono sensibili alla contaminazione superficiale da rame e le barre in rame possono causare un raffreddamento troppo rapido in talune situazioni.

Accensioni dell'arco al di fuori della zona di saldatura possono creare punti di saldatura autogena locali con elevatissime velocità di raffreddamento, che causano elevati tenori di ferrite localizzata ed una possibile, minore resistenza alla corrosione in prossimità di quei punti. Qualsiasi accensione dell'arco al di fuori della zona di saldatura dovrebbe essere rimosso con accurata molatura.



Pezzo a T flangiato in EN 1.4462 (2205); (Fonte: Arco Exploration and Production Technology)

Prospetto 16: parametri tipici per la saldatura MIG per trasferimento per corto circuito e spray arc per gli acciai inossidabili duplex di varie dimensioni (Fonte: Avesta Welding)

| Trasferimento per corto circuito |       |                       |          |
|----------------------------------|-------|-----------------------|----------|
| Diametro del filo consumabile    |       | Intensità di corrente | Tensione |
| mm                               | Zoll  | A                     | V        |
| 1,0                              | 0,035 | 90–120                | 19–21    |
| 1,2                              | 0,045 | 110–140               | 20–22    |
| Trasferimento spray arc          |       |                       |          |
| 1,0                              | 0,035 | 170–200               | 25–28    |
| 1,2                              | 0,045 | 210–280               | 26–29    |
| 1,6                              | 0,063 | 270–330               | 27–30    |



**Saldatura meccanizzata di tubazioni di grande diametro in acciaio duplex nel versante nord dell'Alaska (Fonte: Arco Exploration and Production Technology)**

I punti di saldatura a fondo cianfrino devono essere fatti con la completa protezione gassosa. Non dovrebbero essere fatti punti in cianfrino all'inizio della passata di penetrazione. Idealmente, per evitare la criccabilità della prima passata associata ai punti a fondo cianfrino, la prima passata di penetrazione dovrebbe essere interrotta ed i punti rimossi per molatura, oppure parzialmente molati prima di eseguire la passata. La larghezza della luce deve essere tenuta costante per assicurare nella prima passata corretto apporto termico e diluizione. La partenza e la fine della passata di penetrazione devono essere molate prima di iniziare le passate di riempimento. Il pezzo deve potersi raffreddare al di sotto di 150 °C (300 °F) per acciai duplex standard e 100 °C (210 °F) per superduplex tra una passata e l'altra per garantire l'adeguato raffreddamento della ZTA prima delle passate successive.

I diametri più usati per i consumabili sono 1,6 mm, 2,4 mm e 3,2 mm (1/16", 3/32" e 1/8"). I consumabili devono essere puliti ed asciutti, e conservati in un recipiente adeguato sino all'utilizzo. I migliori risultati si ottengono saldando in posizione piana. La torcia dovrebbe essere mantenuta il più possibile in posizione verticale per minimizzare l'aspirazione di aria nel gas di protezione.

### **12.3.3 Saldatura con filo animato (FCAW)**

La saldatura a filo animato è uno degli sviluppi più recenti per gli acciai duplex. Il suo successo indica

proprio quanto lontano e rapidamente la tecnologia degli acciai duplex si sia sviluppata: Nel FCAW, il filo animato è alimentato automaticamente attraverso la torcia, con gli stessi dispositivi impiegati di solito per il MIG. Il contenuto del filo fornisce alcuni degli elementi di lega e la scoria che protegge il giunto dall'atmosfera, integrando il gas di protezione addotto alla torcia per proteggere la ZTA. Il FCAW è economico per via degli elevati tassi di deposito ed è adatto alla saldatura in posizione e per intervalli di spessore molto ampi.

#### **Apparecchiature**

La saldatura con filo animato viene effettuata con le stesse apparecchiature usate per il MIG.

#### **Materiali d'apporto**

Poiché i processi con protezione di scoria tendono a generare giunti con una tenacità in qualche misura ridotta, probabilmente a causa del maggiore tenore di ossigeno del consumabile, i consumabili per FCAW sono legati con maggiori tenori di nichel in modo da rendere la zona fusa più austenitica rispetto alla bilanciata struttura del materiale base. Dato inoltre che la composizione dell'anima dei fili e la produzione dei fili stessi sono registrate, vi possono essere differenze significative tra fili animati di diversi fornitori. È importante che durante la saldatura FCAW di produzione siano impiegati fili dello stesso tipo di quelli usati durante la qualifica delle procedure, per evitare variazioni in produzione.

#### **Protezione gassosa**

La protezione gassosa usata tipicamente per il FCAW sono miscele 80 % argon-20 % anidride carbonica e 100 % anidride carbonica per le posizioni piana e verticale, rispettivamente. La portata per ogni tipologia di gas è 20–25 l/min (0,7–0,9 cfm). Il controllo della sporgenza libera del filo è importante per limitare la carburazione del bagno, in particolare se viene usata anidride carbonica al 100 %.

#### **Tecnica e parametri**

Per fili di diametro 1,2 mm (0,045"), i tipici valori di corrente e di tensione sono 150–200 Ampere a 22–38 Volt e 60–110 Ampere a 20–24 Volt, per saldatura in posizione frontale e verticale, rispettivamente. Analogamente, le indicazioni per la tecnica di saldatura con FCAW sono identiche a quelle del MIG.

### **12.3.4 Saldatura con elettrodi rivestiti (SMAW)**

La saldatura SMAW, detta anche con elettrodi rivestiti o saldatura stick, è un processo di saldatura molto versatile per geometrie complesse in situazioni che presentino difficoltà per la posizione o possibilità di protezione. Per quanto sia possibile eseguire con l'elettrodo tutte le saldature di una struttura, in particolare quelle più piccole e complesse, esso è più spesso usato in combinazione con processi di saldatura più efficienti e produttivi per strutture di grandi dimensioni.

### Apparecchiature

L'apparecchiatura richiesta per lo SMAW è un generatore a corrente costante. Lo SMAW è eseguito con corrente continua, polarità inversa (CCPI), con elettrodo positivo.

### Materiali d'apporto

L'elettrodo rivestito consiste in un elettrodo consumabile con un rivestimento scorificante. Il rivestimento può contenere o meno elementi di lega da apportare al giunto. Il rivestimento è una miscela registrata che fornisce stabilità d'arco, protezione del metallo durante e dopo la solidificazione. Dato che i rivestimenti sono marchi registrati, vi possono essere differenze sostanziali tra prodotti nominalmente simili di diversi fornitori. I rivestimenti possono consentire un aumento della tenacità come anche migliorare la regolarità di maglia e possono essere concepiti per prestazioni in specifiche posizioni come quella piana, in posizione o in verticale.

I rivestimenti degli elettrodi rivestiti sono igroscopici e la presenza di acqua può comprometterne seriamente le prestazioni. Gli elettrodi dovrebbero essere conservati nelle loro confezioni originali sigillate sino all'uso. Una volta aperta la confezione, gli elettrodi dovrebbero essere conservati in un forno riscaldato ad almeno 95 °C (200 °F) per prevenire l'assorbimento di umidità che può causare porosità o criccabilità. Dato che la scoria aumenta il tenore di ossigeno in zona fusa e, di conseguenza, ne riduce la tenacità, è frequente per gli elettrodi rivestiti avere una struttura bilanciata ai massimi valori di austenite, cui si mantengono i benefici effetti della struttura bifasica. La tenacità del giunto è sensibilmente inferiore a quella del materiale base, ma in genere resta molto maggiore di quella ritenuta corretta per gli acciai al carbonio e legati. Un errore commesso talvolta nella qualificazione dei giunti saldati con elettrodi è l'uso di prove ASTM A 923 senza adeguate correzioni del criterio di accettabilità. La minore tenacità tipica dei giunti eseguiti con SMAW non è indicativa della presenza di fasi intermetalliche, ma è attribuita all'ossigeno proveniente dalla scoria. Richiedere almeno 54 J/40 ft-lb a 40 °C/°F, come per il materiale base, porta ad una mancata qualificazione di un processo usato da anni con eccellenti risultati pratici. La resilienza minima per la zona fusa è 34 J/ 25 ft-lb e 54 J/ 40 ft-lb per la zona termicamente alterata con riferimento ad ASTM A 923.

### Protezione gassosa

La protezione gassosa non è necessaria con questa tecnica, perché questo processo prevede una scoria protettiva creata dal rivestimento.

### Tecnica e parametri

I parametri di saldatura per lo SMAW sono molto legati al diametro dell'elettrodo, come indicato nel Prospetto 17.

Per massimizzare la protezione della scoria, il saldatore dovrebbe mantenere l'arco più corto possibile. Altrimenti, nel caso di archi lunghi, si possono introdurre porosità, eccessiva ossidazione ed apporto termico, peggiori proprietà meccaniche.

La prima passata dovrebbe essere eseguita con elettrodi di diametro minore, usando quelli maggiori per le passate di riempimento. L'arco dovrebbe essere acceso all'interno del cianfrino. Ogni altra accensione o spruzzo deve essere rimossa, molando accuratamente.

Lo SMAW non dovrebbe essere usato per gli acciai duplex per spessori inferiori a 2 mm (0,08"). Il pezzo dovrebbe essere possibilmente in piano, ma questa tecnica di saldatura può essere usata, virtualmente, per saldare in ogni posizione. L'elettrodo deve essere tenuto con un angolo di inclinazione di circa 20° rispetto al pezzo, con tecnica a tirare. Il materiale d'apporto deve essere depositato con cordoni rettilinei e stretti, riducendo le oscillazioni. La corrente dovrebbe essere scelta abbastanza alta per garantire un arco regolare e la fusione del consumabile e del materiale base.



Collettore in EN 1.4462 (2205) (Fonte: Arco Exploration e Production Technology)

Prospetto 17: Parametri di Saldatura SMAW tipici per acciai duplex con vari diametri di elettrodo (Fonte: Outokumpu)

| Diametro dell'elettrodo |         |                       |          |
|-------------------------|---------|-----------------------|----------|
| Diametro del filo       |         | Intensità di corrente | Tensione |
| mm                      | pollice | A                     | V        |
| 2,0                     | 0,078   | 35-60                 | 22-28    |
| 2,5                     | 0,094   | 60-80                 | 22-28    |
| 3,25                    | 0,125   | 80-120                | 22-28    |
| 4,0                     | 0,156   | 100-160               | 22-28    |

### 12.3.5 Saldatura ad arco sommerso (SAW)

La saldatura ad arco sommerso consente di realizzare giunti di dimensioni importanti con una permanenza totale in temperatura della ZTA inferiore a quella che si avrebbe con molte più passate, di dimensioni inferiori. Dato che la zona fusa presenta una solidificazione ferritica ed una trasformazione in fase austeno – ferritica, gli acciai duplex possono essere saldati con SAW con minimi rischi di criccabilità a caldo. Tuttavia, è necessario fare alcune modifiche alla forma dei giunti ed ai parametri di saldatura usati per gli inossidabili austenitici per avere giunti a completa penetrazione. Giunti fatti in SAW con velocità molto elevate e preparazione dei lembi inadeguate possono presentare cricche a centro cordone, ma abbassare la velocità di norma risolve il problema. Per costruzioni di grandi dimensioni e passate importanti e rettilinee, il SAW è un processo economico e tecnicamente soddisfacente per gli acciai duplex. Il SAW è usato comunemente per tubazioni in duplex di forte spessore.

#### Materiali di apporto e protezione

Per il SAW, i comuni consumabili di pari composizione del materiale base sono la scelta corretta. Tuttavia, è importante scegliere correttamente il flusso per ottenere le proprietà desiderate. Di norma, i flussi ad alto indice di basicità forniscono per i duplex la maggiore tenacità.

#### Tecnica e parametri

I parametri tipici della saldatura SAW degli acciai duplex sono riassunti nel Prospetto 18.

### 12.3.6 Saldatura con fascio elettronico e laser

L'esperienza con questi processi applicati ai duplex è positiva. Questi processi generano zone termicamente alterate molto ridotte, con raffreddamenti rapidi che prevengono la formazione di fasi intermetalliche. Tuttavia, l'elevata velocità di raffreddamento tipica di questi processi può causare un eccesso di ferrite nel giunto, rendendo critica la qualifica delle procedure. Una solubilizzazione dopo la saldatura con questi processi riduce il tenore di ferrite e migliora il bilanciamento ferrite/austenite nel giunto.

### 12.3.7 Saldatura a resistenza

Nel caso di saldatura a resistenza ad impulsi singoli, usata con tecnica a punti, la ZTA si raffredda molto velocemente. Questa tempra è ancora più rapida per i duplex rispetto agli inossidabili austenitici a causa della maggiore conduttività termica dei duplex. In questo caso, vi sarà uno strato sottile di materiale in prossimità della linea di fusione che arriva al range di temperature in cui la struttura bifasica è trasformata intermante in ferrite. Il raffreddamento è così veloce che anche i duplex a maggiore tenore di azoto non sono in grado di ri-austenitizzarsi in quella zona. E' perciò possibile avere materiale base tenace ed un giunto con uno strato di ferrite di limitata tenacità.

Con una saldatrice programmabile, è possibile generare un ciclo di saldatura a doppio impulso per ridurre la velocità di raffreddamento e prevenire la formazione di questo strato continuo di ferrite. Può anche essere necessario qualificare diversi spessori di parete.

Il processo a resistenza a rulli difficilmente crea lo stesso problema e molto difficilmente comporta permanenze in temperatura tali da produrre fasi intermetalliche, ma la qualifica della procedura dovrebbe essere mirata al rischio di eccessivi tenori di ferrite.

**Prospetto 18: Parametri tipici per la saldatura SAW di acciai inossidabili duplex con vari diametri di filo (Fonte: Outokumpu)**

| Diametro del filo |         | Intensità di corrente | Tensione |
|-------------------|---------|-----------------------|----------|
| mm                | pollice | A                     | V        |
| 2,5               | 0,094   | 250–450               | 28–32    |
| 3,25              | 0,125   | 300–500               | 29–34    |
| 4,0               | 0,156   | 400–600               | 30–35    |
| 5,0               | 0,203   | 500–700               | 30–35    |

Nota: La velocità di saldatura tipica è 30–60 cm/minuto

## 13 Altre tecnologie di giunzione

I vantaggi delle tecnologie di giunzione diverse dalla saldatura (in cui il materiale base è fuso per generare il giunto) comprendono le ridotte distorsioni e le basse tensioni residue. I giunti possono essere a tenuta e di buona resistenza. Tuttavia, il legame non può avvicinarsi, nelle sue proprietà, ad un giunto saldato in cui la zona fusa presenta una resistenza meccanica ed alla corrosione elevate come il materiale base, o quasi. Si tratta di una considerazione importante per i duplex, che sono superiori agli acciai inossidabili austenitici della serie 300 sia per resistenza meccanica che per corrosione.

### 13.1 Preparazione del giunto

Per ogni operazione di giunzione è molto importante pulire accuratamente l'acciaio inossidabile prima di unire le parti. Le superfici devono essere prive di oli, grassi, sporco, polvere o impronte digitali. Si dovrebbe impiegare un solvente per rimuovere dalle superfici questi contaminanti. Oli e grassi possono impedire ai flussanti la rimozione degli ossidi superficiali durante la brasatura forte e dolce. Eventuali contaminanti non rimossi riducono la superficie di giunzione effettiva. Spesso una superficie leggermente rugosa produce giunti migliori rispetto ad una liscia. Talvolta, la bagnabilità delle superfici, che è critica per la giunzione, può essere migliorata smerigliandola con un abrasivo leggero.

### 13.2 Adesivi

E' disponibile in commercio un'ampia gamma di adesivi per la giunzione di superfici metalliche. Gli acciai duplex sono trattati nello stesso modo di ogni altra lega metallica prima della giunzione con adesivi. I produttori di adesivi possono dare supporto per la scelta del corretto adesivo per una specifica resistenza del giunto, temperatura e condizioni di servizio.

### 13.3 Brasatura dolce

La brasatura dolce si distingue da quella forte per la temperatura di fusione della lega brasante. La temperatura della brasatura dolce è di norma inferiore a 450 °C (840 °F). In genere, le brasature dolci non hanno la resistenza meccanica delle brasature forti e la loro temperatura di servizio è inferiore. Materiali d'apporto tipici della brasatura dolce includono le leghe



Evaporatore a film cadente di acciaio inossidabile EN 1.4410 (2507) (Fonte: Gary Carinci, TMR Stainless)

stagno-piombo, stagno-argento e stagno-piombobismuto. Questi leghe brasanti a bassa temperatura di fusione producono giunti con diversa resistenza meccanica ed alla corrosione, con colorazioni variabili.

Per realizzare una buona brasatura dolce, lo strato di ossido superficiale dell'acciaio inossidabile deve essere rimosso da un flussante prima di realizzare la brasatura. L'alta stabilità del film passivo degli acciai inossidabili, in particolare nei duplex legati al molibdeno, può rendere molto difficoltosa l'azione del flussante. I comuni flussanti di tipo acido contengono cloruri. Se si impiegano flussanti contenenti cloruri, essi devono essere rimossi con lavaggio in acqua e/o neutralizzati immediatamente dopo la brasatura dolce. Un'incompleta rimozione del flussante può generare vaiolatura, talvolta anche prima che il manufatto sia posto in servizio.

### 13.4 Brasatura forte

I materiali d'apporto per la brasatura forte hanno una temperatura di fusione superiore a 450 °C (840 °F). Tali leghe brasanti sono leghe a base argento, nichel e rame. Le leghe brasanti a base argento hanno bassa temperatura di fusione e sono brasate a 618–705 °C (1145–1300 °F), mentre le leghe a base rame sono brasate a 1100–1150 °C (2000–2100 °F) e quelle a base nichel, alto fondenti, sino a 1175 °C (2150 °F). I giunti brasati con leghe a base nichel possono tollerare maggiori temperature di servizio rispetto ai giunti brasati con leghe a base argento e rame.

L'intervallo di temperatura 705–980 °C (1300–1800 °F) dovrebbe essere evitato con gli acciai duplex. E' dunque importante brasare a temperature superiori ai 1040 °C (1900 °F) oppure inferiori a 705 °C (1300 °F). I giunti brasati possono essere temprarsi se le temperature brasanti sono superiori ai 1040 °C (1900 °F).

La lega brasante corretta dovrebbe essere scelta in relazione alla resistenza alla corrosione prevista, alla temperatura di servizio ed alla resistenza del giunto. Le leghe brasanti a base nichel contengono sino al 25 % di cromo, che le rende in qualche misura resistenti alla corrosione, per quanto non così resistenti come l'acciaio duplex EN 1.4462 (2205).

E' stato scritto che gli acciai duplex contenenti azoto sarebbero difficili da brasare. Questo potrebbe riguardare la seconda generazione di acciai duplex, contenenti maggiori tenori di azoto. Per la brasatura degli acciai duplex sono disponibili solo pochi dati, per cui il costruttore dovrebbe procedere sperimentalmente per ottimizzare i parametri di brasatura.

Come per la brasatura dolce, lo strato di film passivo deve essere rimosso prima e durante le operazioni di brasatura per ottenere un giunto brasato sano. Allo stesso modo, a ciò si aggiunge la necessità di rimuovere il flussante dopo la brasatura. La procedura è simile alla pulitura dopo la brasatura dolce ed include la fase di lavaggio con acqua o neutralizzatori chimici.



Unità di desolfurazione di gas di scarico costruita con acciaio duplex EN 1.4462 (2205) (Fonte: Aperam)

## 14 Pulitura al termine della fabbricazione

La pulitura al termine della fabbricazione degli acciai duplex non differisce da quella prevista per gli altri inossidabili. Tale operazione è molto importante, così come anche il controllo della temperatura di interpass o l'uso del gas di protezione in saldatura. Un acciaio inossidabile non correttamente pulito al termine della fabbricazione può avere problemi a temperature molto inferiori ed in ambienti molto meno aggressivi di quanto non dovrebbe avere il materiale base. Ciò significa che l'extra costo pagato per avere un materiale più resistente alla corrosione è sprecato, se durante la fabbricazione non fosse mantenuto o ripristinato lo stato ottimale della superficie del materiale. Spruzzi di saldatura, colori di rinvenimento, tracce di matita, colpi d'arco ed incisioni possono costituire inneschi per la corrosione in ambienti acquosi. Nello stesso tempo, essi possono anche avere un potenziale diverso rispetto alla superficie dell'acciaio, con il rischio di costituire coppie galvaniche. E' importante eliminare queste interruzioni della continuità dello strato passivo superficiale. La Figura 18 presenta una sintesi di queste imperfezioni localizzate che possono verificarsi durante la fabbricazione e che dovrebbero essere eliminate prima di mettere in servizio qualunque acciaio inossidabile.

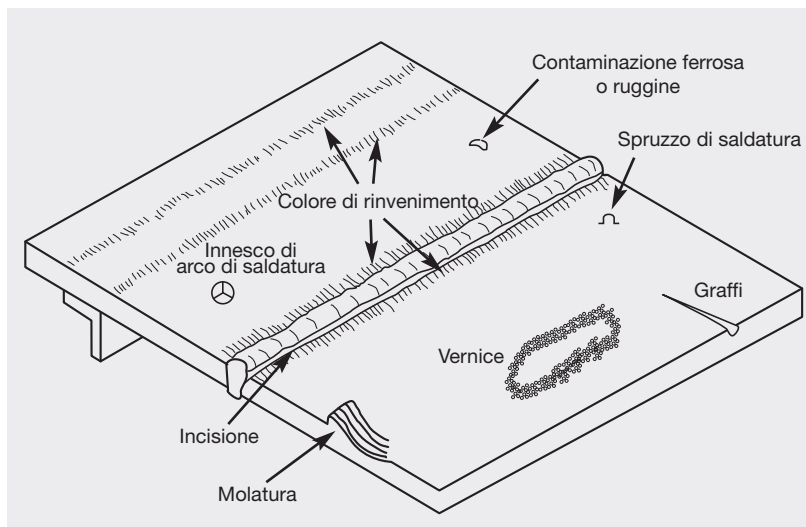


Figura 18: Difetti tipici di fabbricazione o condizioni superficiali che si possono verificare (Fonte: Nickel Institute Publication 10026)

### 14.1 Tracce di matita, vernice, sporcizia, oli

Tutti questi contaminanti possono agire come inneschi corrosivi tanto nel caso della vaiolatura che per la corrosione interstiziale degli inossidabili. Inoltre, essi possono provocare una contaminazione di carbonio. Nel caso di nuove operazioni di saldatura, si può avere precipitazione di carburi. L'acciaio si può sensibilizzare e si può verificare corrosione intergranulare in servizio. La contaminazione dovrebbe essere rimossa con solventi.

### 14.2 Contaminazione ferrosa

Le contaminazioni ferrose, sono dovute alla fabbricazione o al contatto degli acciai inossidabili con utensili in acciaio al carbonio. Se vengono utilizzati utensili in acciaio al carbonio sugli acciai inossidabili o se si effettuano attività di fabbricazione con acciai al carbonio vicino alle aree di stoccaggio di acciai inossidabili si può verificare il trasporto di ferro sulla loro superficie. Il ferro può arrugginire in un secondo tempo in presenza di umidità o ambienti umidi e può innescare la corrosione sugli acciai inossidabili. Una soluzione è evitare ogni contatto tra acciai inossidabili ed acciai al carbonio. Sugli acciai inossidabili dovrebbero essere impiegati solo utensili, spazzole e dime in acciaio inossidabile, con dischi mola nuovi e non contaminati. Spesso, in officina, gli utensili sono identificati con opportuni colori.



Contaminazione ferrosa nella fabbricazione per laminazione di acciai inossidabili duplex (Fonte: Gary Carinci, TMR Stainless)

E' spesso poco pratico ed antieconomico evitare del tutto l'uso di utensili in acciaio al carbonio e prevenire la contaminazione da ferro dall'ambiente dell'officina. In questa ottica, si accetta che vi sia trasferimento di ferro ma ci si impegna ad assicurare che sia rimosso prima che l'acciaio inossidabile sia messo in servizio.

Per rimuovere il ferro si possono usare metodi meccanici, chimici o loro combinazioni. I metodi di pulitura migliori dipendono dalla geometria e dalle dimensioni del manufatto, dalle condizioni di servizio previste e dagli aspetti pratici legati allo smaltimento dei prodotti residui. Un metodo comune è il trattamento chimico con acido nitrico, che dissolve il ferro libero sulla superficie dell'acciaio inossidabile, senza intaccare l'acciaio stesso o il film passivo. Vi possono comunque essere molti diversi metodi di pulitura chimica che possono portare al risultato desiderato. I dettagli dei metodi di pulitura sono descritti nello standard ASTM A 380<sup>7</sup>. E' particolarmente importante che l'utilizzatore sia a conoscenza delle problematiche di sicurezza discusse nella ASTM A 380.

ASTM A 967<sup>8</sup> (in sostituzione della US Federal Specification QQP-35c) fornisce informazioni sulla scelta del corretto metodo di prova per comprovare l'efficacia del trattamento di passivazione dell'acciaio inossidabile. In questa specifica, è previsto che il cliente definisca il grado di passivazione da ottenere e consenta alla ditta incaricata del trattamento di scegliere la procedura idonea, che risulti economica ed efficace.



Chimichiera con serbatoi in EN 1.4462 (2205) (Fonte: Aperam)

## 14.3 Spruzzi di saldatura, decolorazione dei giunti, inclusioni di flusso, scoria, inneschi d'arco

Tutti questi difetti si possono verificare, in saldatura. Essi possono agire come inneschi e promuovere la corrosione interstiziale in ambienti contenenti cloruri, e dovrebbero essere evitati o rimossi dopo saldatura. Gli spruzzi di saldatura possono essere evitati durante la fabbricazione con specifici prodotti anti-spruzzo. La decolorazione dei giunti provoca una diminuzione della resistenza alla corrosione a causa della distruzione dello strato passivato. Una decolorazione forte o colori di rinvenimento devono essere evitati con idonei gas di protezione o con il flussaggio a rovescio dei giunti con gas inerti. Spesso, tuttavia, i colori di rinvenimento non possono essere totalmente evitati e devono essere rimossi con la pulitura dopo saldatura. Inclusioni di flusso e di scoria, inneschi d'arco ed incisioni marginali possono essere rimossi con metodi meccanici come per molatura con abrasivi fini oppure con spazzolatura manuale o con dischi in acciaio inossidabile. E' importante usare dischi mola fini, poiché diversamente segni derivanti dai dischi della mola potrebbero a loro volta provocare corrosione in servizio in forma localizzata e corrosione interstiziale.

Un aspetto distintivo degli acciai duplex rispetto agli inossidabili austenitici di analoga resistenza alla corrosione è che i colori di rinvenimento dovuti alla saldatura tendono ad essere sottili, aderenti e più resistenti alla corrosione. La decolorazione dei giunti può essere rimossa chimicamente con un decapaggio; ad esempio, il decapaggio del EN 1.4462 (2205) con una soluzione al 20 % di acido nitrico e 5 % di acido fluoridrico. Tale soluzione dissolve l'ossido di cromo ed attacca anche l'acciaio inossidabile, rimuovendo lo strato impoverito di cromo. Le paste passivanti possono essere usate in alternativa alle soluzioni acide, cui sono confrontabili ma rispetto alle quali sono più semplici da utilizzare per grandi manufatti. Tuttavia, bisogna ricordare che le paste decapanti producono una soluzione pericolosa durante il lavaggio, ed è responsabilità del loro utilizzatore seguire procedure corrette nel loro utilizzo. In funzione della resistenza alla corrosione dell'acciaio duplex, possono anche essere usate per la rimozione dei colori di rinvenimento acidi più o meno aggressivi.

Alcune ricerche mostrano che la migliore resistenza alla corrosione dopo saldatura si ottiene con una passivazione chimica dopo la pulitura meccanica.

7 ASTM A 380 Standard practice for cleaning, descaling and passivation of stainless steel parts, equipment, and systems

8 ASTM A 967 Standard specification for chemical passivation treatments for stainless steel parts

# 15 Le applicazioni degli acciai duplex

## Desolforazione dei prodotti gassosi della combustione

Le centrali a carbone hanno davanti a sé un futuro incerto in relazione alla qualità dell'aria programmata a livello mondiale. Ulteriori riduzioni delle emissioni di SO<sub>2</sub> saranno richieste e la desolforazione dei prodotti gassosi della combustione (FDG) è un metodo per ottenere questi bassi livelli di emissioni di anidride solforosa. L'uso di calce o di fanghi calcarei per lo "wet scrubbing" di anidride solforosa da gas di scarico è una tecnologia matura, dato che il metodo di base è stato impiegato per caldaie sin dagli anni '70. Gli scrubber moderni sono oggi in grado di eliminare oltre il 90 % della SO<sub>2</sub> dai gas di scarico. Le moderne unità FDG comprendono diverse zone a differenti temperature, concentrazioni di cloruri e pH. L'inossidabile EN 1.4462 (2205), è stato impiegato per applicazioni FDG in Europa ed Asia per il loro costo ridotto e la migliore resistenza alla corrosione rispetto agli acciai inossidabili austenitici. Recentemente, l'uso degli acciai duplex è stato accettato nel Nord America e questo tipo di inox è divenuto la scelta più comune per gli absorber FDG grazie alle loro ottime proprietà tensile, buona resistenza alla corrosione ed elevata tenacità dopo saldatura.



Unità di dissalazione di acqua di mare multi stage flash costruita con acciai duplex EN 1.4162 (UNS S32101) e EN 1.4462 (2205) (Fonte: Outokumpu)

## Dissalazione

La dissalazione è una delle prove più severe per i materiali avendo condizioni corrosive di servizio con alte concentrazioni di cloruri e temperature. La storia della dissalazione è per lo più una storia di sviluppo di materiali, dato che i clienti degli impianti cercano un compromesso tra le esigenze legate alla resistenza alla corrosione con la necessità di controllare i costi degli investimenti, per rendere i progetti di dissalazione realizzabili. Nelle prime esperienze di dissalazione, tanto gli impianti di evaporazione multi-stage flash (MSF) che quelli multi-effect (MED) furono costruiti con acciai al carbonio. In un secondo tempo, gli evaporatori MSF furono tipicamente placcati con acciaio inossidabile austenitico EN 1.4404 (AISI 316L). Le camere MED furono in primo luogo rivestite con resine epossidiche, poi placcate con acciai inossidabili.

I vantaggi degli acciai duplex per questa applicazione sono l'elevata resistenza meccanica – doppia rispetto ai convenzionali gradi austenitici – combinata con un'elevata resistenza alla corrosione. Di conseguenza, gli evaporatori in acciaio duplex possono essere costruiti con lamiere più sottili, con minori quantità di materiale e saldature. Ulteriori benefici includono la maggiore facilità di gestione ed il minore impatto ambientale complessivo.

Il punto di svolta per gli acciai inossidabili duplex è stato nel 2003, quando il tipo EN 1.4462 (2205) fu scelto per evaporatori da installare negli impianti MSF di Melittah e MED di Zaura, in Libia. L'impianto con 4 milioni di galloni al giorno (MIGD) di capacità fu commissionato nel 2004.

Il passo successivo nell'evoluzione degli acciai duplex nella dissalazione si ebbe nel 2004, quando due diversi tipi di acciaio duplex furono usati nelle strutture degli evaporatori, impiegando il EN 1.4462 (2205) per parti soggette alle condizioni più critiche ed il EN 1.4362 (2304) per quelle esposte a condizioni meno severe.

Sono stati costruiti in tempi recenti tre impianti MSF con queste soluzioni, con una combinazione di EN 1.4462 (2205) ed EN 1.4162 (UNS S32101): Taweelah B (Abu Dhabi, capacità 69.2 MIGD), Jebel Ali L2 (Dubai, 55 MIGD) e Ras Abu Fontas B2 (Qatar, 30 MIGD). La soluzione che abbina EN 1.4362 (2304) e EN 1.4462 (2205) fu impiegata sin dal 2003 negli impianti MED e più recentemente nella costruzione del più grande impianto MED ad oggi fabbricato, quello di Al Hidd nel Bahrain, con capacità di 60 MIGD.

## Oil and gas

Nel settore oil and gas, i duplex hanno avuto un ruolo determinante in presenza di condizioni severe. Ciò è dovuto non solo alla loro resistenza meccanica ed alla corrosione, ma anche al fatto che la loro resistenza a vaiolatura e corrosione interstiziale è superiore ai convenzionali acciai austenitici, con valori di resistenza equivalente al pitting (PREN) spesso maggiori di 40.

Le principali applicazioni degli acciai duplex sono linee di processo, sistemi di tubazioni di processo ed apparecchiature come separatori, scrubber e pompe. Sott'acqua i duplex sono impiegati nella fabbricazione di tubi interrati, sistemi di tubazioni e collettori, componenti ad albero di nave, linee di processo e pipeline per il trasporto di oil e gas corrosivi. I superduplex (25 % cromo) sono utili per la loro resistenza alle tensioni di progetto, quindi possono essere spesso usati per componenti come barre, forgiati, fusi, lamiere, tubi e fissaggi. Gli acciai super – duplex hanno inoltre un'eccellente resistenza a fatica e compatibilità galvanica con altri acciai alto legati.

Le linee ombelicali sono impiegate per controllare varie funzioni nei pozzi mediante linee idrauliche e possono essere anche usate per iniezione chimica. Da quando furono introdotte sul mercato le linee ombelicali in acciaio, i duplex sono divenuti il materiale più utilizzato. Negli ultimi anni vi è stata la tendenza all'esplorazione a profondità sempre maggiori sotto il livello del mare, con la richiesta di linee ombelicali sempre più lunghe. L'aumento della resistenza dei materiali consente la diminuzione del peso delle ombelicali, cosa che consente anche di allungarle. La tendenza è anche all'impiego delle ombelicali in acque più calde, sviluppando soluzioni in cui nelle ombelicali è introdotto un riser. Di conseguenza, è aumentata la domanda di resistenza meccanica ed

alla corrosione. Nuovi acciai iper-duplex sono stati sviluppati per impiego in ombelicali con migliori resistenze meccaniche ed alla corrosione rispetto ai super duplex.

## Biocarburanti

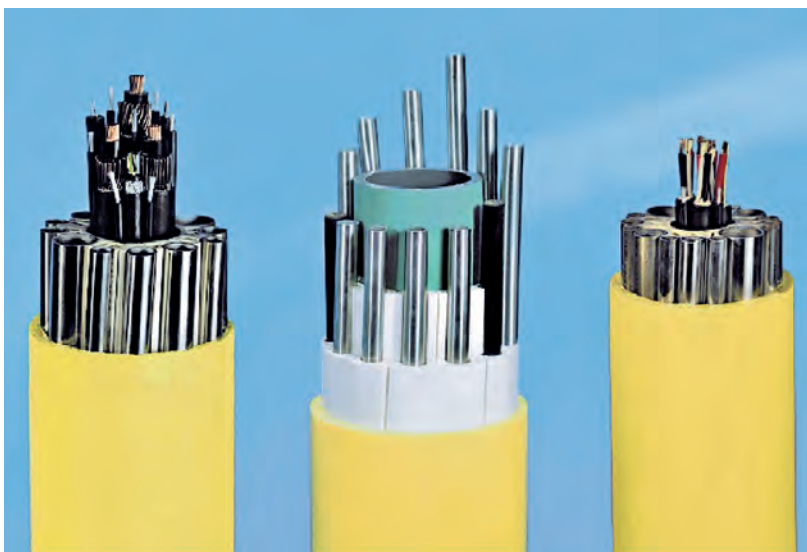
Nelle campagne, il settore dei biocarburanti (specie l'etanolo) è un settore in espansione in cui trovano sempre maggiore impiego i tipi duplex. L'acciaio EN 1.4462 (2205) è stato usato per l'impianto di biomasse liquide NExBTL a Singapore e l'EN 1.4162 (UNS S32101) fu scelto dal costruttore olandese Oostwouder Tank- & Silobouw BV per un proprio serbatoio per il progetto in larga scala di biocarburante nel porto di Amsterdam per conto Noba Vetveredeling BV. Il grado EN 1.4162 (UNS S32101) fu scelto anche per i recipienti e le tubazioni dell'ampliamento dell'impianto etanolo di Agroetanol nell'isola di Händelö, in Svezia. I tipi duplex standard sono stati usati in sostituzione degli austenitici della serie 300 per molte applicazioni per servizio etanolo.

## Alimentare

Anche nell'industria alimentare gli acciai duplex standard hanno un ruolo rilevante. Questi acciai sono stati usati per due progetti in Spagna, un deposito alimentare ed un serbatoio per il vino. Nel porto di Barcellona Emypro SA ha costruito serbatoi alimentari interamente in EN 1.4162 (UNS S32101) in sostituzione dei tipi EN 1.4301/1.4307 (AISI 304/304L). Il serbatoio per vino, costruito dal costruttore spagnolo Martinez Sole per Garcia Carrión in Daimiel, nel sud della Spagna, è il primo impiego di acciaio inossidabile duplex: l'EN 1.4162 (UNS S32101) ed il EN 1.4362 (2304) furono usati nella costruzione del tetto e di tutti i nuovi serbatoi di livello superiore, come alternativa a basso costo dei gradi EN 1.4301/1.4404 (AISI 304/316L).

## Architettura

Gli acciai duplex continuano a svolgere un ruolo importante nella costruzione di ponti, dove la corrosione e la presenza di sale si combinano con la necessità di sopportare carichi elevati. Due recenti esempi, entrambi in Asia, sono il ponte Stonecutters Bridge di Hong Kong ed il ponte pedonale in Marina Bay, Singapore, entrambi costruiti con acciaio duplex tipo EN 1.4462 (2205). Per lo Stonecutters Bridge, furono usate nel 2006 200 tonnellate di lamiere e tubi di acciaio duplex EN 1.4462 (2205). Alcune parti furono finite da un costruttore cinese partendo da lamiere prodotte ad hoc. Le lamiere furono decapate e pallinate per garantire il livello ideale di riflettività sia di giorno che di notte.



Tubazione ombelicale per applicazioni oil e gas offshore (Fonte: Sandvik)



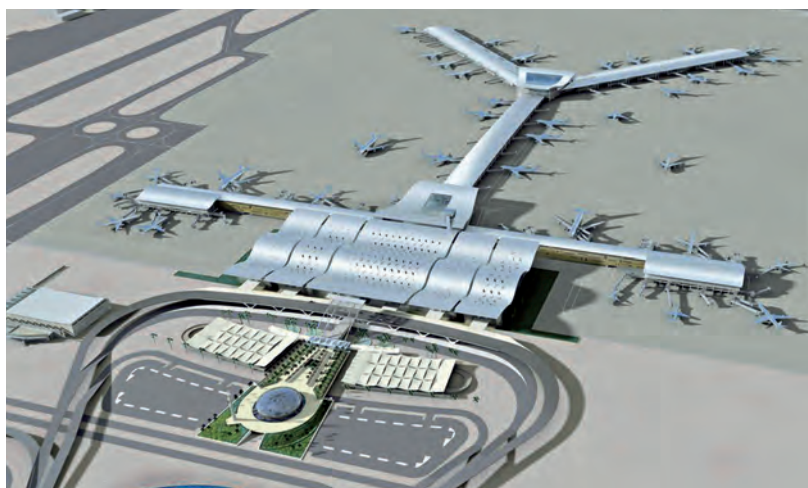
**Stonecutters Bridge, Hong Kong (Fonte: Ove Arup & Partners)**

The Helix, il ponte pedonale in Marina Bay, Singapore, usa a sua volta 570 tonnellate di acciaio duplex. Lo stupefacente stile del ponte comprende due membrature tubolari a spirale di acciaio inossidabile che simboleggiano la struttura del DNA, ed la doppia elica e le strutture di supporto che usano rispettivamente tubi e lamiere in duplex EN 1.4462 (2205). Le superfici di acciaio duplex forniscono un'illuminazione notturna riflettendo le luci in modo studiato per migliorare il design.

Il più grande tetto al mondo di acciaio inossidabile, quello dell' International Airport New Doha, in Qatar, è fatto di acciaio duplex standard al molibdeno (UNS S32003). L'aspetto più impressionante del terminal è il suo tetto ondulato, che si dice appunto sia il tetto in acciaio inossidabile più grande al mondo. L'area del tetto è all'incirca 195 000 metri quadrati (2,1 milioni di piedi quadrati) ed usa indicativamente 1600 tonnellate (3,5 milioni di libbre) di acciaio duplex. Molti fattori sono stati presi in considerazione nella scelta del tipo di acciaio inossidabile. Il principale fu la vicinanza dell'aeroporto dal mare. Il tetto doveva resistere non solo al calore ed all'umidità tipica del Medio Oriente, ma anche alla corrosione marina. Altri fattori nella scelta includono i costi ed un adeguato rapporto resistenza – peso per gli acciai duplex, a confronto con altri tipi di inossidabili.



**The Helix, Singapore, con struttura portante in acciaio duplex tipo EN 1.4462 (2205) (Fonte: Financial Dynamics/C. F. Jones)**



**Aeroporto Internazionale New Doha con tetto in acciaio duplex ( Fonte: Qatar Airways)**

## Lecture consigliate

### Informazioni generali

P. Johansson, M. Liljas, A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes, Proceedings of 4<sup>th</sup> European Stainless steel Conference Science and Market, Paris 2002.

M. Liljas, J.Y. Jonsson, S.Wessman, Stress Relief Treatment of 22Cr Duplex Stainless Steel EN 1.4462, Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2005

M. Liljas, 80 Years with Duplex Steel, a Historic Review and Prospects for the Future, Proceedings of 6<sup>th</sup> European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008

H. Liu, P.Johansson, M.Liljas , Structural Evolution of LDX 2101 During Isothermal Ageing at 600–850°C, Proceedings of 6th European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008

Z. Wei, J. Laizhu, H. Jincheng, S. Hongmei, Study of Mechanical and Corrosion Properties of a Fe-21.4Cr-6Mn-1.5Ni-0.24N-0.6Mo Duplex Stainless Steel, Materials Science and Engineering A, 2008, 497: 501–504

J. Charles, Why and Where Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 29.

M.G. Mecozzi, M. Barteri, Effect of Alloying Elements and Impurity on Hot Ductility of 23% Cr 4% Ni Stainless Steel, 5<sup>th</sup> World Conference Duplex Stainless Steels, Conference Proceedings, KCI Publishing, 1997, p. 1011–1016.

J. Charles, Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 3 and p. 151.

F. Dupoiron, S. Faucheur, and G. Varvat, Fabrications of Process Equipment in Duplex Stainless Steels, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 621.

C. W. Kovach, High-Performance Stainless Steels, Nickel Development Institute Reference Book Series No 11021, Toronto, Canada, 2000

### Metallurgia

R. Sanchez, I. Moreno, J. Amagro, J. Botella, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless Steel, 4<sup>th</sup> Stainless Steel Science and Market Congress, Conference Proceedings, Paris 2002, p. 108–113.

J.-O. Nilsson, The Physical Metallurgy of Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 73.

J.-O. Nilsson, The Use of Modern Physical Metallurgy in the Development and Characterization of Special Stainless Steels, Journal de Physique, 4, 1993, Vol. 3, Number 7/V1, p. C7-67–C76.

B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in Duplex Steels and the Relation Between Continuous Cooling and Isothermal Heat Treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.

## Lavorazioni di macchina

C. Bergqvist, J. Olsson, Machining in the New Duplex Grade LDX 2101-Easier Than Expected. Proceedings of Duplex 2007, Grado, Italy 2007.

B. Pellegrini, B.N. Di Caprio and R. Pacagnella, Tool Performance in Continuous Cutting of Duplex Stainless Steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 175.

C.G. Carlborg, Å. Nilsson and P-Å. Frandlind, Machinability of Duplex Stainless Steel, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 685.

## Saldatura

F. Hägg, M.Liljas, B.Holmberg, The welding consequences of replacing austenitic with duplex stainless steel. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2007

C. Baxter, M.Young, Practical aspects for production welding and control of duplex stainless steel pressure and process plants. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

C. Baxter, N.A McPherson, High-productivity welding of duplex stainless steel. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

B. Holmberg, M.Larén, Welding and applications of the new lean duplex steel LDX 2101. IIW Annual meeting, Prague, Czech Republic, 2005.

C. Eriksson, P.Johansson, M.Liljas, E.M. Westin, Mechanical properties of welds in the new lean duplex stainless steel LDX 2101. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2003

L. Duprez, B. De Cooman, N. Akudt, Microstructure Evolution During Isothermal Annealing of a Standard Duplex Stainless Steel Type 1.4462, Steel Research, 71, 2000, No.10, p. 417–422

L. van Nassau, H. Meelker, F. Neessen and J. Hilkes, Welding duplex and superduplex stainless steel, an update of the guide for industry, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 17.

L. Karlsson, Duplex stainless steel weld metal – effects of secondary phases, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 43.

C. Baxter, L. Tuveson-Carlström, L. Svensson and A. Brorson, The significance of filler metal type on the stress corrosion cracking and fracture toughness of welded 2205 duplex stainless steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 279.

B. Holmberg, How to Perform Welding in Duplex Stainless Steels to Obtain Optimum Weld Metal Properties, Stainless Steel World, March 1997, p. 28.

P. Rouault and C. Bonnet, A new shielding gas range for the TIG, plasma and MIG welding of duplex and superduplex stainless steels, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 289.

R.N. Gunn, Intermetallic formation in superduplex stainless steel heat affected zone, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 335.

L. Karlsson, S.L. Andersson and S. Rigdal, Welding superduplex stainless steels with Ni-base consumables, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 433.

B. Bonnefois, J. Charles, A. Bruyere, and R. Cozar, Welding of super duplex steels: new efficient solutions for joining using Ni alloys filler materials, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 499.

D.N. Noble, W. A. Bruce, and R.N. Gunn, Hot tapping 22% Cr duplex stainless steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 471.

K. Yasuda, R.N. Gunn, and T.G. Gooch, Prediction of austenite content in duplex stainless steels weld metals, Paper 26, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

L. Odegard, C-O Pettersson and S-A Fager, The selection of welding consumables and properties of dissimilar welded joints in the superduplex stainless steel Sandvik SAF 2507 to carbon steel and highly alloyed austenitic and duplex stainless steels, Paper 94, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

V. van der Mee, H. Meelker, and L. van Nassau, How to avoid hydrogen cracking in (super) duplex stainless steel weldments, Paper 119, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

M. Liljas, The welding metallurgy of duplex stainless steels, Paper KV, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

D.J. Kotecki and J.L. P. Hilkes, Welding processes for duplex stainless steels, Paper KVI, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

## Ispezione

F.H. Dijkstra and J.A. de Raad, Non-destructive testing of duplex welds, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 509.

D.J. Kotecki, Ferrite measurement in duplex stainless steel, Proceedings of the 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 957.

C.I.K. Sinclair and B.W.O. Shepherd, Non-destructive testing of welds in duplex stainless steels, Paper 63, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

J.D. Redmond and R.M. Davison, Critical Review of Testing Methods Applied to Duplex Stainless Steels, Stainless Steel World, April 1998, p. 37–45

## Riferimenti

- 1 J. Charles, Super duplex stainless steels: structure and properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, p. 3, 1991.
- 2 R. Sánchez, I. Moreno, J. Almagro, J. Botella, X. Llovet, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless, Fourth Stainless Steel Science and Market Congress, Paris 2002, Conference Proceedings
- 3 I. Zucato, M. C. Moreira, I. F. Machado and S. M. Giampietri Lebrão, Microstructural Characterization and the Effect of Phase Transformations on Toughness of the UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850 °C, Materials Research Print version ISSN 1516-1439, Mat. Res. vol.5 no.3 São Carlos July/Sept. 2002
- 4 B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.
- 5 C. Hounглу and S. Hertzman, Kinetics of Intermetallic Phase Formation in Duplex Stainless Steel and Their Influence on Corrosion Resistance, Report IM-2689, Swedish Institute of Metals Research, Stockholm, Sweden.
- 6 G. Herbsleb and P. Schwaab, Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and their Influence on Corrosion Behavior in Acids, Proceedings of Duplex Stainless Steels Conference, ASM, Metals Park, Ohio, 1983, p.15
- 7 L. Iturgoyen and M. Anglada, The Influence of Aging at 475°C on the Fatigue Crack Propagation of a Duplex Stainless Steel, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 2, p. 746, 1991.
- 8 D. Bauernfeind and G. Mori, Corrosion of Superaustenitic Stainless Steels in Chloride- and Sulfate-Containing Media-Influence of Alloying Elements Cr, Mo, N, and Cu, Proceedings of NACE Corrosion 2003 Conference, Paper 03-257
- 9 P.-E. Arnvig, and W. Wasielewska, Stress Corrosion Behaviour of Highly Alloyed Stainless Steels under Severe Evaporative Conditions, ACOM 3-1993, Avesta Sheffield AB, 1993.
- 10 A. Miyasaka, K. Denpo and H Ogawa, Prediction of Application Limits of Stainless Steels in Oilfield Equipment, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 1, p. 241, 1991.
- 11 J.J. Eckenrod, et al, "Effects of Chemical Composition and Thermal History on the properties of Alloy 2205 Duplex Stainless Steel", New Developments in Stainless Steel Technology, R. A Lula, Ed., ASM 1985.
- 12 R.M. Davison and J.D. Redmond, Paper No. 302, CORROSION/91, NACE International, Houston, Texas, 1991.
- 13 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Paragraph UHA 51.

## Appendice 1: Designazioni degli acciai inossidabili duplex e denominazioni commerciali

| UNS No.          | Tipo  | EN No. | Designazione EN    | JIS/Giappone | GB/PR Cina            | KS/Corea    | Denominazione commerciale                                                                                                            |
|------------------|-------|--------|--------------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S31200           |       |        |                    |              | 022Cr25Ni6Mo2N        |             | 44LN                                                                                                                                 |
| S31260           |       |        |                    |              | 022Cr25Ni7Mo3<br>WCuN |             | DP3<br>DP12                                                                                                                          |
| S31500           |       |        |                    |              |                       |             | 3RE60                                                                                                                                |
| S32001           |       | 1.4482 | X2CrMnNiMoN21-5-3  |              |                       |             | Nitronic 19D                                                                                                                         |
| S32003           |       |        |                    |              |                       |             | ATI 2003                                                                                                                             |
| S32101           |       | 1.4162 | X2CrMnNiN21-5-1    |              |                       |             | LDX 2101<br>B2101                                                                                                                    |
| S32202           |       |        |                    |              |                       |             | UR 2202                                                                                                                              |
| S31803<br>S32205 | 2205* | 1.4462 | X2CrNiMoN22-5-3    | SUS 329 J3L  | 022Cr22Ni5Mo3N        | STS 329J3L  | SAF 2205<br>UR 2205<br>UR 2205+<br>UR 2205Mo<br>DMV 22-5<br>ATI 2205<br>2205 Code Plus Two<br>NAS 329J3L<br>NSSC DX1<br>DP8<br>B2205 |
| S32304           | 2304* | 1.4362 | X2CrNiN23-4        |              | 022Cr23Ni5Mo3N        |             | SAF 2304<br>UR 2304<br>B2304                                                                                                         |
| S32506           |       |        |                    |              |                       |             | NAS 64                                                                                                                               |
| S32520           |       | 1.4507 | X2CrNiMoCuN25-6-3  |              |                       |             | UR 2507Cu                                                                                                                            |
| S32550           | 255*  |        |                    |              | 03Cr25Ni6Mo3Cu2N      |             | Ferrallium 255<br>UR 2507Cu                                                                                                          |
| S32707           |       |        |                    |              |                       |             | SAF 2707 HD                                                                                                                          |
| S32750           | 2507* | 1.4410 | X2CrNiMoN25-7-4    | SUS 329 J4L  | 022Cr25Ni7Mo4N        | STS 329 J4L | AF 2507<br>UR 2507<br>NAS 74N<br>SAF 2507                                                                                            |
| S32760           |       | 1.4501 | X2CrNiMoCuWN25-7-4 |              |                       |             | Zeron 100<br>UR 2507W<br>NAS 75N                                                                                                     |
| S32808           |       |        |                    |              |                       |             | DP28W                                                                                                                                |
| S32900           | 329   | 1.4460 | X3CrNiMoN27-5-2    | SUS 329 J1   | 0Cr26Ni5Mo2           | STS 329 J1  |                                                                                                                                      |
| S32906           |       |        |                    |              |                       |             | SAF 2906                                                                                                                             |

| UNS No. | Tipo | EN No. | Designazione EN  | JIS/Giappone | GB/PR Cina | KS/Corea | Denominazione commerciale |
|---------|------|--------|------------------|--------------|------------|----------|---------------------------|
| S32950  |      |        |                  |              |            |          | 7-Mo Plus                 |
| S32960  |      |        |                  |              |            |          |                           |
| S33207  |      |        |                  |              |            |          | SAF 3207 HD               |
| S39274  |      |        |                  |              |            |          | DP-3W                     |
| S39277  |      |        |                  |              |            |          | AF918                     |
| S82011  |      |        |                  |              |            |          | ATI 2102                  |
| –       |      | 1.4655 | X2CrNiCuN23-4    |              |            |          |                           |
| –       |      | 1.4477 | X2CrNiMoN29-7-2  |              |            |          |                           |
| –       |      | 1.4424 | X2CrNiMoSi18-5-3 |              |            |          |                           |

\* Nome comune, non marchio depositato, di uso abituale, non riconducibile ad uno specifico produttore

## Appendice 2: Indice delle specifiche

### Specifiche ASTM/ASME

| UNS No. | Tipo | A 815                | A 959                    | A 480/M<br>SA 480     | A 314    | A 240/M<br>SA 240 | A 484/M<br>SA 484     | A 276<br>SA 276 | A 479/M<br>SA 479 |  |
|---------|------|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------|-------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|--|
|         |      | Fittings<br>per tubi | Prodotti<br>semilavorati | Requisiti<br>generali | Billette | Laminati<br>piani | Requisiti<br>generali | Barre, profili  | Barre, profili    |  |
| S31200  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |
| S31260  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |
| S31803  |      | X                    | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32001  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |
| S32003  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |
| S32101  |      | X                    | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32202  |      | X                    |                          | X                     | X        | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32205  | 2205 | X                    | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32304  | 2304 |                      | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               |                   |  |
| S32506  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32520  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |
| S32550  | 255  | X                    | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32707  |      |                      |                          |                       |          |                   |                       |                 |                   |  |
| S32750  | 2507 | X                    | X                        | X                     |          | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32760  |      | X                    | X                        | X                     | X        | X                 | X                     | X               | X                 |  |
| S32900  | 329  |                      | X                        | X                     |          | X                 | X                     |                 |                   |  |
| S32906  |      |                      | X                        | X                     |          | X                 | X                     |                 | X                 |  |
| S32950  |      | X                    | X                        | X                     | X        | X                 | X                     |                 | X                 |  |
| S39274  |      | X                    | X                        | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |
| S39277  |      |                      | X                        |                       |          |                   | X                     |                 | X                 |  |
| S33207  |      |                      |                          |                       |          |                   |                       |                 |                   |  |
| S82011  |      |                      |                          | X                     |          | X                 |                       |                 |                   |  |

### Specifiche EN

| EN No. | Designazione EN    | EN 10028-7 | EN 10088-2 | EN 10088-3 | EN 10088-4 | EN 10088-5 | EN 10095 | EN 10216-5 |  |
|--------|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|------------|--|
| 1.4362 | X2CrNiN23-4        | X          | X          | X          | X          | X          | X        | X          |  |
| 1.4655 | X2CrNiCuN23-4      |            | X          |            |            |            |          |            |  |
| 1.4460 | X3CrNiMoN27-5-2    |            |            | X          |            | X          |          |            |  |
| 1.4477 | X2CrNiMoN29-7-2    |            | X          | X          | X          | X          |          |            |  |
| 1.4462 | X2CrNiMoN22-5-3    | X          | X          | X          | X          | X          |          | X          |  |
| 1.4507 | X2CrNiMoCuN25-6-3  | X          | X          | X          |            |            |          | X          |  |
| 1.4410 | X2CrNiMoN25-7-4    | X          | X          | X          | X          | X          |          | X          |  |
| 1.4501 | X2CrNiMoCuWN25-7-4 | X          | X          | X          |            |            |          | X          |  |
| 1.4424 | X2CrNiMoSi18-5-3   |            | X          | X          | X          | X          |          | X          |  |
| 1.4062 | X2CrNiN22-2        |            |            |            |            |            |          |            |  |
| 1.4162 | X2CrMnNiN21-5-1    |            |            |            | X          | X          |          |            |  |

|  | A 580/M  | A 270                  | A 789/M<br>SA 789                                                                | A 790/M<br>SA 790                                                  | A 928/M                               | A 923              | A 182    | API 650 | NSF/ANSI 61       |
|--|----------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------|---------|-------------------|
|  | Vergella | Tubazione<br>sanitaria | Profilato tubolare,<br>senza saldatura<br>e saldato senza<br>materiale d'apporto | Tubo,<br>senza saldatura<br>e saldato senza<br>materiale d'apporto | Saldato con<br>materiale<br>d'apporto | Test sui<br>duplex | Fittings |         | Acqua<br>potabile |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    | X        |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    |          |         |                   |
|  |          | X                      | X                                                                                | X                                                                  | X                                     | X                  | X        | X       | X                 |
|  |          |                        | X                                                                                |                                                                    |                                       |                    |          |         |                   |
|  |          | X                      | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    |          | X       | X                 |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    |          | X       | X                 |
|  | X        |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    | X        |         |                   |
|  |          | X                      | X                                                                                | X                                                                  | X                                     | X                  | X        | X       | X                 |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    |          | X       | X                 |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    |          |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       | X                  | X        | X       |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     | X                  | X        | X       |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    |          |         |                   |
|  |          | X                      | X                                                                                | X                                                                  | X                                     | X                  | X        | X       |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    | X        | X       |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    |          |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    | X        |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  | X                                     |                    | X        |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    | X        |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    | X        |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    |          |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    |          |         |                   |
|  |          |                        | X                                                                                | X                                                                  |                                       |                    |          |         |                   |
|  |          |                        |                                                                                  |                                                                    |                                       |                    |          |         |                   |

|  | EN 10217-7 | EN 10222-5 | EN 10250-4 | EN 10263-5 | EN 10272 | EN 10296-2 | EN 10297-2 | EN 10312 |
|--|------------|------------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|
|  | X          |            | X          |            | X        | X          | X          |          |
|  |            |            |            |            |          |            |            |          |
|  |            |            | X          |            |          |            | X          |          |
|  |            |            |            |            |          |            |            |          |
|  | X          | X          | X          | X          | X        | X          | X          | X        |
|  |            |            | X          |            | X        |            | X          |          |
|  | X          | X          | X          |            | X        | X          | X          |          |
|  | X          |            | X          |            | X        |            | X          |          |
|  |            |            |            |            |          |            | X          |          |
|  |            |            |            |            |          |            |            |          |
|  |            |            |            |            |          |            |            |          |

## Acciai inossidabili duplex per getti

| UNS No. | ASTM 890 castings, general | ASTM A 995 castings, pressure parts |
|---------|----------------------------|-------------------------------------|
| J93370  | X                          |                                     |
| J93372  | X                          | X                                   |
| J93373  | X                          |                                     |
| J93345  | X                          | X                                   |
| J93371  | X                          | X                                   |
| J92205  | X                          | X                                   |
| J93404  | X                          | X                                   |
| J93380  | X                          | X                                   |

## Indice dei titoli delle specifiche

| Titoli delle specifiche |                                                                                                                                       |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A 182 / A 182M          | Forged or Rolled Alloy-Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service                         |
| A 240 / A 240M          | Heat-Resisting Cr and Cr-Ni Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels                                              |
| A 270                   | Seamless and Welded Austenitic and Ferritic / Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing                                              |
| A 314                   | Stainless Steel Billets and Bars for Forging                                                                                          |
| 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 480 / A 480M          | General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip                                       |
| A 484 / A 484M          | General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings                                                                  |
| A 580 / A 580M          | Stainless Steel Wire                                                                                                                  |
| A 789 / A 789M          | Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service                                                  |
| A 790 / A 790M          | Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe                                                                        |
| A 815 / A 815M          | Wrought Ferritic, Ferritic / Austenitic, and Martensitic Stainless Steel Fittings                                                     |
| A 890 / A 890M          | Castings, Fe-Cr-Ni-Mo Corrosion-Resistant, Duplex for General Application                                                             |
| A 923                   | Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Wrought Duplex Stainless Steels                                                          |
| A 928 / A 928M          | Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe Electric Fusion Welded with Addition of Filler Metal                                       |
| A 959                   | Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Stainless Steels                                                                   |
| A 988 / A 988M          | Hot Isostatically-Pressed Stainless Steel Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High Temperature Service                           |
| A 995 / A 995M          | Castings, Austenitic-Ferritic (Duplex) Stainless Steels for Pressure-Containing Parts                                                 |
| API 650                 | Welded Steel Tanks for Oil Storage                                                                                                    |
| NSF / ANSI 61           | Drinking Water System Components                                                                                                      |
| NACE MR0175             | Sulphide stress cracking resistant material for oil field equipment                                                                   |
| EN 10028-7              | Flat products made of steels for pressure purposes – Part 7: Stainless steels                                                         |
| EN 10088-2              | Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes |

| Titoli delle specifiche |                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EN 10088-3              | Stainless steels – Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes |
| EN 10095                | Heat resisting steels and nickel alloys                                                                                                                                                |
| EN 10216-5              | Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Stainless steel tubes                                                                             |
| EN 10217-7              | Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 7: Stainless steel tubes                                                                               |
| EN 10222-5              | Steel forgings for pressure purposes – Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels                                                                        |
| EN 10250-4              | Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 4: Stainless steels                                                                                                    |
| EN 10263-5              | Steel rod, bars and steel wire for cold heading and cold extrusion – Part 5: Technical delivery conditions for stainless steels                                                        |
| EN 10272                | Stainless steel bars for pressure purposes                                                                                                                                             |
| EN 10296-2              | Welded circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel                                                  |
| EN 10297-2              | Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel                                                |
| EN 10312                | Welded stainless steel tubes for the conveyance of aqueous liquids including water for human consumption – Technical delivery conditions                                               |
| EN ISO 8249             | Welding – Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel-weld metals                                                          |
| VdTÜV WB 418            | Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4462                                                                                                                              |
| VdTÜV WB 496            | Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4362                                                                                                                              |
| VdTÜV WB 508            | Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4410                                                                                                                              |



INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION

Con il supporto di:

International Stainless Steel Forum ([www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org))

Euro Inox ([www.euro-inox.org](http://www.euro-inox.org))

ISBN 978-1-907470-03-5

