



UNIVERSITÀ DI PISA
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in
INGEGNERIA MECCANICA

**PROGETTAZIONE E PROBLEMATICHE COSTRUTTIVE
DI UN CIRCUITO PIPING PER TRASFERIMENTO DI
FLUIDI AD ALTA TEMPERATURA**

Sintesi

Relatore:

Prof. Renzo Valentini

Candidato:

Cosmo Valente

Correlatore:

Prof. Leonardo Bertini

Tutor:

Ing. Pietro Pietrosanti

09 Maggio 2012

Anno accademico 2010-2011

Sommario

Il presente lavoro di tesi, svolto in collaborazione con la società Technip Italy S.p.A., descrive le principali fasi di progettazione di una linea piping di un impianto industriale petrolchimico, con particolare attenzione rivolta ai problemi metallurgici degli acciai inox austenitici stabilizzati. La tubazione, operante ad alta temperatura (650°C) e di ingenti dimensioni, deve trasportare fluido di processo da un forno ad un reattore e rispettare le specifiche richieste dalla normativa americana ASME B31.3 in materia di “*process piping*”.

Nonostante la realizzazione di tubazioni di questo genere sia oggi oggetto di routine per l'industria petrolchimica, rimane ancora un problema irrisolto per le società di ingegneria: il fenomeno dello *stress relaxation cracking* (SRC).

Viste le complesse problematiche metallurgiche connesse, la trattazione si articola in due parti:

- Parte I: progettazione della tubazione;
- Parte II: analisi dello SRC.

La progettazione (Parte I) si articola nelle seguenti fasi: design della linea (selezione del materiale da impiegare, del diametro, dello spessore e del layout), esecuzione delle verifiche (di *stress analysis*, delle perdite di carico e termiche), specificazione dei componenti, fabbricazione e controlli non distruttivi (CND).

La Parte II prende in esame gli aspetti metallurgici connessi con la progettazione e rappresenta lo stato dell'arte in tema di SRC. Infatti, per tubazioni di questo genere, è necessario impiegare stainless steel austenitici stabilizzati ad alte prestazioni (o in alternativa superleghe di nichel), come, nel presente caso, il 347H. Gli austenitici, però, possono subire impreviste degradazioni metallurgiche, fino al raggiungimento di improvvise rotture. Per tubazioni operanti nelle condizioni suesposte, le rotture sono spesso associate allo SRC, problema di notevole difficoltà di comprensione e di identificazione.

Dopo un'esposizione del fenomeno dello SRC, supportata da una vasta ricerca bibliografica, si propone un'innovativa tecnica di esecuzione delle saldature da eseguire nella linea piping progettata che minimizza il rischio ingegneristico.

Indice

INTRODUZIONE: SCOPO DEL LAVORO	1
PARTE I	1
1 Design	1
1.1 Selezione del materiale	1
1.2 Selezione del diametro	2
1.3 Selezione dello spessore	2
1.4 Ipotesi di layout	2
2 Verifiche	2
2.1 Verifiche di resistenza meccanica della tubazione	2
2.2 Verifica delle perdite di carico	3
2.3 Verifica delle dispersioni termiche	3
2.4 Conclusioni	3
PARTE II	3
3 Stress relaxation cracking	4
3.1 Fenomeni fisico-metallurgici post-saldatura	4
3.2 Meccanismo di rottura	5
3.3 Identificazione di rotture per SRC	6
3.4 Conclusione	7
4 Soluzione adottata	8
4.1 Il 16-8-2	8
4.2 Tecnica di saldatura	9
4.3 Trattamenti termici	10
4.4 Controlli non distruttivi e test	10
CONCLUSIONI	10

INTRODUZIONE: SCOPO DEL LAVORO

L'obiettivo della presente tesi consiste nella progettazione di un sistema di adduzione in grado di trasferire del fluido di processo da un forno ad un reattore. Il fluido da trasportare è ad altissima temperatura (650°C) ed è richiesto il trasferimento di una grande portata.

La progettazione della linea piping deve rispettare il codice ASME di *process piping* B31.3 e i requisiti di:

- **Sicurezza**
- **Qualità**
- **Fattibilità**
- **Economicità**

Il design di tubazioni che operano in queste condizioni, nonostante le gravose caratteristiche richieste (in particolare di temperatura operativa e dimensionale), è oggetto di routine (i.e. "*common engineering practice*") per le odierne società petrolchimiche, delle quali si seguono le linee guida e standardizzazioni.

Rimane comunque irrisolto il problema dello *stress relaxation cracking* (SRC), nonostante l'importanza delle tubazioni che operano in queste condizioni e gli ingenti sforzi economici intrapresi negli ultimi anni per trovare una sua soluzione. Lo SRC è una problematica metallurgica che interessa componenti saldati (o deformati plasticamente), in stainless steel austenitici (o superleghe di nichel), di grandi spessori e che operano ad alte temperature.

La tesi, promossa dalla Technip S.p.A., ha l'obiettivo di progettare la linea minimizzando il rischio ingegneristico e rappresenta lo stato dell'arte in tema di SRC.

PARTE I

In questa parte si descrivono le fasi della progettazione della linea e le verifiche eseguite, rispettando il codice ASME B31.3.

1 Design

La progettazione è svolta a partire dalla documentazione fornita dal processo (P&ID e PFD), dalla planimetria dell'impianto e dalle informazioni delle apparecchiature connesse. Non potendo mostrare suddetta documentazione (perché riservata), nella tesi sono estrapolate tutte le informazioni utili per l'esecuzione della progettazione.

Il design della linea si sviluppa attraverso le seguenti fasi:

1.1 Selezione del materiale

Si impiega il materiale più economico che soddisfi i requisiti minimi di resistenza meccanica, idoneità metallurgica e proprietà anticorrosive. Viste le alte temperature di esercizio risulta pertanto

indispensabile adoperare gli inox austenitici (alternativa senz'altro più economica rispetto alle più costose leghe di nichel). In particolare si predilige un austenitico stabilizzato (sia per evitare il fenomeno della sensibilizzazione, sia per incrementare le caratteristiche meccaniche a caldo) con un sufficiente contenuto di carbonio, necessario anch'esso per ottenere un'adeguata resistenza meccanica alle alte temperature, minimizzando i fenomeni di scorrimento viscoso (creep).

Il materiale selezionato è il **347H** (denominazione ASTM), con standard di riferimento ASTM A358 (classe 1).

1.2 Selezione del diametro

Il diametro della tubazione è scelto in base alla specifica di portata minima, a considerazioni di standardizzazione dei diametri e rispettando la caduta di pressione massima lungo l'intera linea (verifica svolta successivamente alla pianificazione del layout).

Il diametro nominale della linea è di **30"**.

1.3 Selezione dello spessore

Lo spessore è ottenuto dalla relazione che esprime la resistenza della tubazione in relazione alla pressione interna, in accordo con il codice B31.3.

Lo spessore è di **41 mm**.

1.4 Ipotesi di layout

Si ipotizzano quattro possibili layout della linea piping (composta da tratti di tubazione, raccordi, supporti, guide, molle, ecc.) partendo da: il posizionamento dei bocchelli di ingresso (del forno) e di uscita (del reattore), la planimetria dell'impianto (presenza di altre apparecchiature, strutture, *pipe rack*, ecc.) e l'implementazione di valvole richieste.

Per i quattro layout ipotizzati sono successivamente effettuate le verifiche di accettabilità della linea descritte nel paragrafo successivo.

2 Verifiche

La tubazione deve rispettare le specifiche richieste dal progetto ed essere conforme alla normativa ASME B31.3. In particolare, nel presente studio, sono eseguite le verifiche di resistenza meccanica della tubazione, delle perdite di carico e termiche.

2.1 Verifiche di resistenza meccanica della tubazione

L'intera tubazione deve essere verificata al fine di garantire l'accettabilità delle sollecitazioni e delle deformazioni dovute alla pressione interna ed alle azioni di carichi e spostamenti imposti, sia permanenti che occasionali.

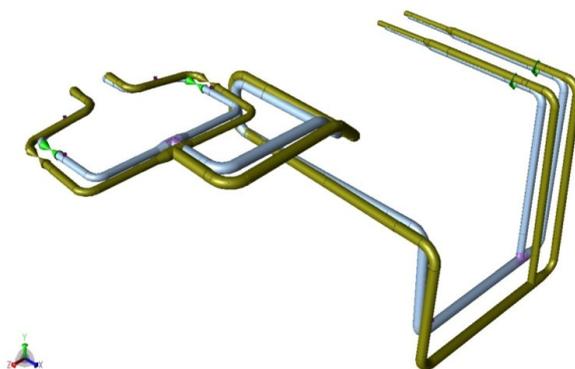
Per eseguire le verifiche di resistenza alla pressione interna si è fatto uso di un comune foglio di calcolo Excel sul quale sono riportate le varie formule del codice ASME B31.3 (è stata quindi scelta la formula che permetteva l'utilizzo degli spessori minimi) mentre per le verifiche di *stress analysis*, anch'esse richieste dal codice di riferimento (ASME B31.3), si è fatto uso del software CAESAR II.

Sono state svolte le seguenti verifiche di *stress analysis*: tensione longitudinale da carichi permanenti, tensione da deformazione imposta, tensione longitudinale da carichi occasionali, carichi sulle apparecchiature, test idraulico.

Un solo layout, dei quattro ipotizzati, verifica tutte le specifiche richieste dal codice.

È mostrata una rappresentazione del layout selezionato estrapolata da *CAESAR II*, che mostra la deformazione della stessa alla temperatura operativa (fig. 2.1).

Fig. 2.1 – Deformata (in giallo) del layout selezionato, nelle condizioni operative



2.2 Verifica delle perdite di carico

La perdita di carico totale della linea è verificata considerando le perdite distribuite e quelle concentrate. Quest'ultime sono calcolate seguendo la procedura consigliata dalla Crane Co.

2.3 Verifica delle dispersioni termiche

La tubazione deve essere progettata con lo scopo di mantenere quasi invariata la capacità termica del fluido di processo trasportato (richiesta espressa nel P&ID). A questo scopo è impiegata la lana di roccia (standard di riferimento ASTM547) e la verifica dell'isolamento termico è eseguita con l'ausilio del software *Naima 3E Plus 4.0*.

2.4 Conclusioni

Il layout selezionato, del quale una rappresentazione è presente nella figura 2.1, verifica tutte le specifiche richieste.

Di questa soluzione si redige la specificazione dei componenti, mentre la definizione della fabbricazione, dell'esecuzione delle saldature e dei CND viene effettuata dopo un'attenta analisi delle problematiche connesse con lo *stress relaxation cracking* (Parte II).

PARTE II

Nella seconda parte si analizza il problema dello *stress relaxation cracking* (SRC) e si definisce una metodologia di esecuzione delle saldature (applicata alla linea piping progettata nella Parte I) che ne minimizzi il rischio.

3 Stress relaxation cracking

Lo SRC è un fenomeno di degradazione che colpisce pregiate leghe metalliche (in particolare acciai austenitici e leghe di nichel) operanti alle alte temperature (500-750°C). È generalmente ricondotto alla combinazione dell'azione del rilassamento delle tensioni residue di saldatura con la sinergica azione della riformazione di precipitati (carburi di niobio nel caso dello SS 347H, elemento presente come stabilizzante).

Il problema ha una grande rilevanza, in particolare nell'industria petrolchimica, se si considera l'importanza delle apparecchiature che ne sono solitamente interessate (linee piping di processo, tubazioni all'interno di forni, o grandi *vessel*). Infatti, spesso lo SRC inficia in modo diretto sul costo operativo dell'impianto e sulla sua sicurezza causando:

- a. Perdita di contenimento (rischi di “*catastrophic cracks*”).
- b. Problematiche di HSE (nella sicurezza del personale e rischio ambientale).
- c. Incremento del costo di manutenzione ed ispezione.
- d. Inaspettati costi per inattività dell'impianto.

Nonostante l'importante impatto dello SRC dal punto di vista della sicurezza ed economico, per questo problema non è stata ancora trovata una soluzione ottimale. Tutt'ora vi sono molti studi a riguardo, tanto che esistono diverse maniere per definire lo stesso problema (*relaxation-*, *stressinduced-*, *stressinducedcorrosion-*, *stressassisted-*, ecc.). Tuttavia, allo stato attuale non esistono né standard, né codici, né specifiche di ingegneria che forniscono linee guida consolidate per prevenire tali problematiche.

3.1 Fenomeni fisico-metallurgici post-saldatura

Sono presi in considerazione i fenomeni fisico-metallurgici che nascono in un giunto saldato di acciaio austenitico quando mantenuto alle alte temperature (durante le fasi di saldatura, i trattamenti termici o in fase operativa).

- **Precipitazione e *Precipitate Free Zone***

Durante il riscaldamento indotto dalle condizioni operative (o dal PWHT, *Post Weld Heat Treatment*, o durante le fasi di saldatura), possono formarsi composti intermetallici che precipitano prevalentemente all'interno della matrice metallica del grano cristallino ed a bordo grano.

In generale il fenomeno di precipitazione provoca un incremento delle caratteristiche meccaniche e della durezza del materiale, in quanto i precipitati formati ostacolano il movimento delle dislocazioni e comportano distorsione delle strutture cristalline.

Nel caso dello stainless steel stabilizzato del tipo 347 si formano carburi di niobio (NbC) o in alternativa nitruri di niobio (NbN). Infatti, il niobio è aggiunto alla lega per prevenire la formazione di un altro tipo di precipitato, il Cr₂₃C₆, il quale altrimenti migrerebbe verso i bordi di grano con conseguente impoverimento del tenore di cromo nelle vicinanze dei bordi di grano stessi.

L'area adiacente al bordo del grano, impoverita di cromo, è chiamata *Precipitate Free Zone* (PFZ) e questa sua caratteristica può portare a problemi di corrosione (fenomeno di degradazione chiamato

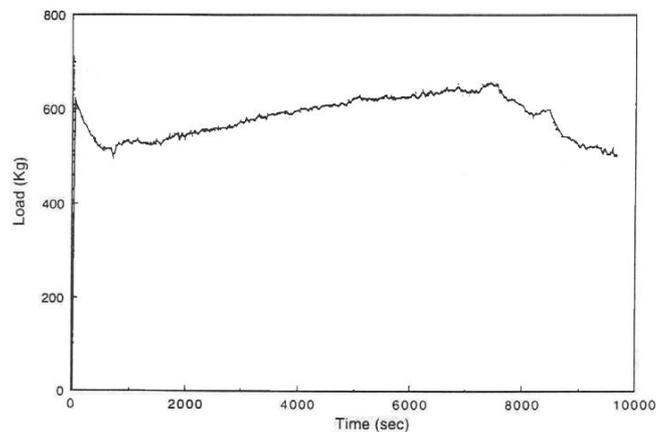
“sensibilizzazione”) e ad una riduzione eccessiva di resistenza. Questa differenza di resistenza può condurre a condizioni di incompatibilità localizzata di deformazione e portare a rotture.

- **Rilassamento delle tensioni**

Durante il trattamento termico post saldatura, o in alternativa durante la vita operativa ad alta temperatura, gli stress residui formatisi durante il processo di saldatura si ‘rilassano’, attraverso la trasformazione delle tensioni residue in deformazione plastica (creep).

Sono state eseguite numerose indagini sul rilassamento delle tensioni ed un esempio di risultati ottenuti è illustrato in figura 3.1. In questa prova è mostrato il comportamento di un provino (inizialmente ciclato termicamente per riprodurre le condizioni presenti nella HAZ) messo in trazione e mantenuto ad una deformazione e ad una temperatura costanti imposte. I risultati ottenuti con questa prova sono di particolare interesse in quanto, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, con il passare del tempo (nel tratto principale della prova) è necessario imporre al provino un carico maggiore per mantenere la deformazione costante.

Fig. 3.1 – Risultati del rilassamento delle tensioni di un provino in 347 (T=650°C)



Riassumendo l’andamento:

- a. Il picco iniziale rappresenta l’iniziale applicazione del carico. Nelle prime fasi la misura del carico diminuisce rapidamente, ma per un tempo molto breve.
- b. Successivamente il carico incrementa gradualmente. Durante questa fase precipita il Nb, che porta al rafforzamento della lega. Inoltre alcuni studi dimostrano un contemporaneo restringimento volumetrico del provino.
- c. L’ultimo decremento di tensione è invece dovuto alla nascita di cricche, fino a rottura.

3.2 Meccanismo di rottura

Vi sono molte proposte relative ai meccanismi che conducono allo SRC. Comunque, non vi è una teoria globale che ne spiega esaurientemente il fenomeno.

La causa principale dello SRC proverrebbe dalla mancanza di duttilità alle alte temperature. Molti materiali austenitici mostrano un comportamento di *age-hardening* a temperature tra i 500°C e i 750°C. L’indurimento da invecchiamento, come su menzionato, è un meccanismo di precipitazione, ed essendo la conseguenza dell’incremento di durezza, la capacità di deformazione dei grani risulta ridotta.

Nella letteratura specialistica sono frequentemente riportate due diverse teorie del meccanismo di rottura per SRC anche se, ulteriori studi, inizierebbero ad ipotizzare che questo fenomeno sia in realtà dovuto ad un loro effetto combinato.

- **Indebolimento della PFZ**

Con questa proposta di descrizione dello SRC sono tenute in gioco sia le tensioni residue che le reazioni metallurgiche del materiale.

La formazione di precipitati intergranulari ed intragranulari porta alla formazione della PFZ, con caratteristiche meccaniche e di durezza inferiori rispetto al centro del grano ed il bordo, causando un importante gradiente di resistenza. Come risultato la tensione risulta discontinua all'interno del materiale e la deformazione concentrata nelle PFZ. Quindi diminuisce la duttilità del materiale, fino all'instaurarsi di possibili rotture.

- **Scorrimento dei bordi di grano**

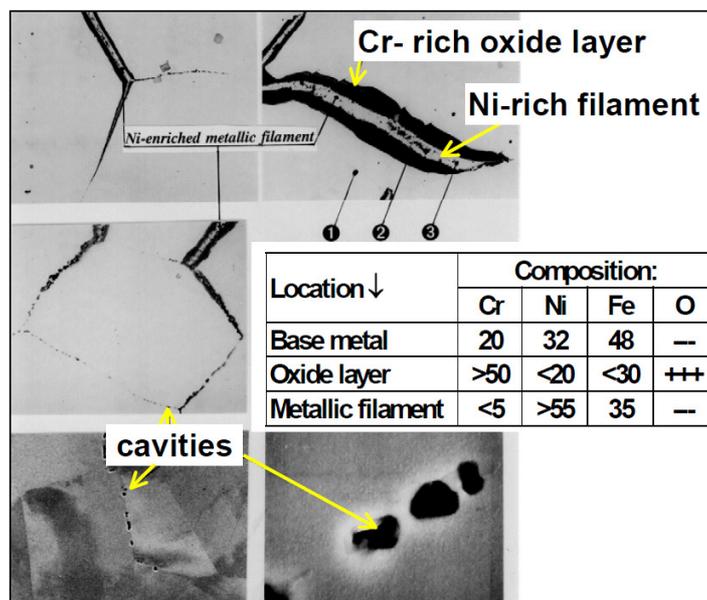
Questa teoria (chiamata anche *creep-like*) attribuisce la causa della rottura allo scorrimento dei bordi di grano per il rilassamento delle tensioni. Infatti, la presenza di basse forze di coesione lungo i bordi di grano, con il concomitante rafforzamento (per precipitazione) del nucleo dei grani stessi, provoca degli scorrimenti tra i grani e successiva formazione di microvuoti.

3.3 Identificazione di rotture per SRC

Le rotture per SRC possono essere identificate da tratti caratteristici, quali:

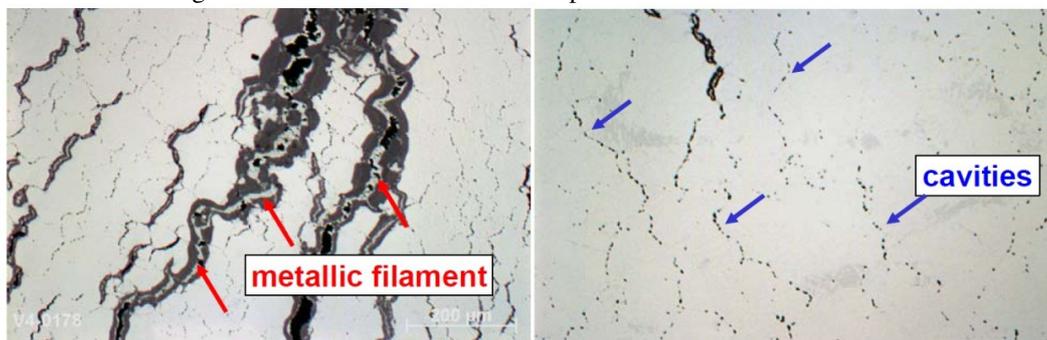
- Cricche sempre localizzate nei bordi di grano (o adiacenti ad essi) e presenza di piccole cavità (*microvoid* oppure *cavities*) a ridosso della frattura.
- Presenza della frattura nella HAZ, nel metallo d'apporto o in un'area deformata a freddo.
- Frequente presenza di un filamento metallico adiacente ai bordi di grano fessurati. Nonostante la composizione chimica del filamento metallico dipenda strettamente dal materiale di impiego, vi è sempre bassa presenza di cromo ed alta di nichel e ferro. (In alcune leghe a base di nichel il filamento metallico non è presente). Il filamento metallico è generalmente racchiuso da uno strato ricco di ossido di cromo con quantità inferiori di Ni e Fe rispetto al filamento.
- Fratture solamente presenti in zone dove la durezza Vickers è superiore a 200HV.
- Temperatura operativa del metallo sempre compresa tra 550°C e 750°C.

Fig. 3.2 – Esempio di frattura da SRC in HAZ di un Alloy 800H dopo 6000 ore di servizio a 600°C



Spesso insorgono rotture che non vengono identificate come da SRC, in quanto l'apparenza della cricca potrebbe essere spiegata anche come conseguenza di un meccanismo di corrosione, inducendo ad errate conclusioni. Un altro esempio proposto di frattura da SRC è presente in figura 3.3, con messa in evidenza dei tratti caratteristici su menzionati.

Fig. 3.3 – SRC in AISI 347 dopo servizio a 600-650°C



3.4 Conclusione

Nonostante la difficoltà nella comprensione e nell'identificazione del fenomeno dello SRC, risultano chiare le leghe che ne sono soggette e le temperature critiche. I problemi principali risiedono nel fatto che le prove meccaniche standard (trazione, Charpy, curvatura, creep) non rilevano questo meccanismo di degradazione e che, senza adoperare particolari precauzioni, il rischio di SRC è molto alto quando l'apparecchiatura in lega austenitica opera a temperature comprese tra i 550°C e i 750°C, comportando danni addirittura catastrofici.

Infine il fenomeno può essere brevemente descritto come segue. Durante la saldatura, la HAZ (zona immediatamente adiacente alla zona di fusione) è esposta ad alte temperature, le quali sono sufficienti per indurre la formazione di carburi di niobio stabili e per provocare allo stesso tempo un ingrossamento del grano. Durante il raffreddamento della saldatura, si verificano deformazioni plastiche nella HAZ, ma viste le grandi velocità di raffreddamento, alcuni dei carburi disciolti rimangono nella soluzione. Allo

stesso tempo, nella HAZ sono indotte delle alte tensioni residue. Durante il servizio alle alte temperature, le tensioni indotte dal processo di saldatura sono rilassate producendo deformazioni inelastiche. Inoltre, i carburi di niobio (insieme con composti di niobio-azoto) precipitano nelle dislocazioni presenti nella matrice, inducendo un aumento di resistenza nel grano e portando una concentrazione delle deformazioni da creep lungo i bordi di grano e nelle PFZ, derivanti dal rilassamento delle tensioni. Quando le deformazioni da creep superano il valore critico, si può verificare la nascita di cricche da SRC lungo i bordi di grano (cricche intergranulari) o nelle PFZ.

La soluzione migliore per evitare lo SRC è impiegare leghe con bassa sensibilità allo SRC, in alternativa evitare l'esecuzione di saldature o programmare opportunamente dei trattamenti termici, ma questo a volte non è possibile (come nel presente caso, in ogni saldatura eseguita in opera, etc.).

4 Soluzione adottata

Dalle esperienze passate (coadiuvate da una ricca ricerca bibliografica) risulta che non è possibile rimuovere completamente il rischio dello SRC per linee di grandi dimensioni operanti a suddette temperature. L'unica soluzione che annullerebbe il problema consisterebbe nell'impiegare degli opportuni trattamenti di ricottura (i.e. "*solution annealing*") per tutte le saldature (e/o zone soggette a severe piegature a freddo) ed eliminare saldature in opera. Questa soluzione è altresì impraticabile da un punto di vista pratico per linee di queste dimensioni.

Quindi si analizzano tutte le fasi di progettazione delle saldature da eseguire e i materiali d'apporto da impiegare, con lo scopo di ottenere sufficienti rassicurazioni ingegneristiche per operare in sicurezza, con l'ausilio delle esperienze industriali Technip nella decade passata.

4.1 Il 16-8-2

Per ottenere una soluzione a minor rischio ingegneristico ed evitare le innumerevoli problematiche causate dall'impiego di saldature che utilizzano lo stainless steel 347 come materiale d'apporto, si ritiene conveniente adoperare un altro tipo di acciaio inox, sviluppato specificatamente come materiale d'apporto per saldature: il 16-8-2. I numeri identificativi del materiale rappresentano le percentuali nominali dei maggiori elementi di lega presenti, rispettivamente: cromo, nichel e molibdeno.

Il 16-8-2, oltre a possedere eccellenti proprietà meccaniche alle alte temperature, ha buona resistenza allo SRC e a tutte le altre problematiche metallurgiche connesse con l'esecuzione di giunti saldati austenitici, come di seguito elencato:

- a. Il 16-8-2 è stato sviluppato appositamente per resistere allo **SRC** grazie alla microstruttura del materiale (base di austenite con una piccola quantità di ferrite, la cui combinazione porta ad un'eccellente stabilità micro strutturale e ad un mantenimento di buona duttilità dopo l'esposizione prolungata ad alte temperature).
- b. Le precauzioni adottate per prevenire lo SRC risultano valide anche per il *reheat cracking*. Infatti il *reheat cracking* potrebbe essere visto come lo SRC che avviene durante il PWHT, invece che durante la fase operativa. Inoltre la decisione di non eseguire trattamenti termici post saldatura (come indicato in seguito) evita il problema.

- c. Il rischio di *sigmatization* è molto ridotto in quanto il 16-8-2 è caratterizzato da una bassa presenza di ferrite (infatti la fase sigma generalmente nuclea nei bordi di grano di fase intermetallica tra austenite e ferrite). La fase sigma, dura e fragile, provocherebbe cricche nelle regioni altamente tensionate.
- d. L'*hot cracking* è evitato richiedendo una prestabilita quantità minima di ferrite (per ottenere una quantità minima di bordi di grano a fase alternata, dove si distribuiscono elementi basso fondenti, i quali minimizzano la probabilità di nascita di cricche). L'*hot cracking* rappresenta la possibile produzione di cricche e fessurazioni nelle saldature durante la solidificazione.
- e. La resistenza al *liquation cracking* (causato dalla presenza di composti basso fondenti nelle vicinanze dei bordi di grano, in particolare Fe₂Nb, che si sviluppano durante la dissolvenza della ferrite nell'austenite) è garantita dall'alta purezza dell'elettrodo e dall'assenza di niobio. Con il termine *liquation cracking* sono identificate le fratture che possono verificarsi nel materiale saldato già solidificato e nella HAZ se esposti a sufficienti alte temperature e sforzi di trazione.

4.2 Tecnica di saldatura

Si riporta un riassunto delle tipologie di saldatura da impiegare ed i materiali di apporto selezionati.

Tipologia di saldatura da impiegare:

- GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*): prime passate (*root pass* e *hot pass*)
- SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*): passate di riempimento

Materiale d'apporto:

- *Buttering layer* (SMAW): E-16-8-2
- *Root pass* (GTAW): ER-16-8-2 (oppure ER-347 nei casi in cui risulta obbligatorio avere composizione chimica del materiale di apporto omogenea a quella del materiale base per tutte le superfici in contatto con il fluido di servizio)
- *Filling pass* (SMAW): E-16-8-2

Si esegue per ogni saldatura un *buttering layer* con lo scopo di spostare la HAZ critica dal materiale base al metallo d'apporto, di qualità migliore (e.g. maggiore duttilità e minore suscettibilità ai fenomeni dei SRC nel caso dello E-16-8-2).

La scelta per le prime passate (*root pass* e *hot pass*) di impiegare la tecnica GTAW (con protezione gassosa di Argon al rovescio) risulta necessaria, vista l'impossibilità di avere ripresa al rovescio nell'esecuzione delle saldature di tubazioni (con lo SMAW non si riuscirebbe ad avere saldature 'pulite' con una corretta penetrazione e fusione dei lembi nella circonferenza interna del giunto saldato). Le passate successive di riempimento (*filling pass*) sono eseguite mediante la tecnica SMAW, più veloce e di più semplice impiego.

Per le passate iniziali con il GTAW si adopera una bacchetta di ER347, per avere lo stesso materiale del metallo base. Questo per assicurare in qualche maniera la stessa resistenza a corrosione contro il fluido di servizio (per evitare l'instaurarsi di corrosioni localizzate in presenza di ambienti fortemente ossidanti e/o, più raramente, corrosioni galvaniche). Successivamente è impiegato un elettrodo E16.8.2

che, come sottolineato in precedenza, risulta avere migliori caratteristiche meccaniche e metallurgiche alle alte temperature.

4.3 Trattamenti termici

A volte, per saldature di questo genere sono impiegati trattamenti termici di *stabilizing*, o meglio ancora di *solution annealing*; ma nel presente caso, come ampiamente discusso nella tesi, si preferisce evitare trattamenti termici post saldatura, in quanto ritenuti o di difficile realizzazione o rischiosi (che presentano più rischi che vantaggi tangibili).

4.4 Controlli non distruttivi e test

Si richiede l'esecuzione di un *mock-up* test: riproduzione fedele (con stesse proprietà fisiche, geometriche e ambientali) di un giunto saldato sul quale saranno effettuate verifiche NDE e distruttive.

Inoltre, per i giunti in esercizio, oltre alla prova idraulica prevista dal codice ASME B31.3, si impone l'esecuzione di CND (esame radiografico ad alta sensibilità ed esami con liquidi penetranti) da ripetere nelle stesse aree periodicamente. Per alcune verifiche si richiedono esami più stringenti, vista la particolarità e l'importanza delle saldature.

CONCLUSIONI

È stata progettata la linea piping che deve trasportare del fluido di processo, da un forno ad un reattore, selezionando: il materiale da impiegare, il diametro, lo spessore e definendo il layout (con indicazione della supporteria e dei componenti piping da impiegare). Alla linea sono state svolte con successo verifiche di: *stress analysis*, perdite di carico ed isolamento termico.

Successivamente alla specificazione dei componenti si è passati alla definizione dell'esecuzione delle saldature e dei CND, ma quest'ultima parte ha riscontrato delle difficoltà. Infatti la progettazione dell'esecuzione delle saldature è risultata di arduo approccio, in quanto si scontra con il fenomeno dello SRC, problema ancora irrisolto per le odierne società di ingegneria. Quindi è risultato necessario affrontare un approfondito studio a riguardo.

La presente tesi rappresenta lo stato dell'arte della conoscenza tecnica riguardante lo SRC (Parte II) e ricerca una tecnica di esecuzione delle saldature che permetta di fabbricare la linea piping che operi in sicurezza (progettata nella Parte I).

Con il supporto della società Technip S.p.A. è stata proposta una metodologia di esecuzione delle saldature del 347H che minimizza il rischio ingegneristico di SRC mediante l'impiego di 16-8-2 come materiale d'apporto (materiale dalle ottime proprietà meccaniche alle alte temperature e resistente alle problematiche metallurgiche connesse con l'esecuzione delle saldature).

Come sviluppi futuri, è consigliabile investigare la tecnica di saldatura ipotizzata mediante successivi test (impiegando la Gleeble Machine) e discuterne i risultati nei successivi seminari tecnici programmati dal gruppo di ricerca specifico organizzato dal TNO (*Netherlands Organization for Applied Scientific Research*).