

561

**Studio sperimentale delle misure per prevenire l'esposizione dei saldatori alle emissioni di fumi. Parte II / *Experimental study of measures preventing welders from fume exposure*, S. A. Egerland et al.**

Da una collaborazione tra Fronius International GmbH ed il Welding and Joining Institute di Acquisgrana (Aachen) è nato all'interno della Commissione VIII dell'IIW (Health, Safety, and Environment) questo contributo inedito sul tema delle emissioni di fumi nella saldatura ad arco. Le soluzioni tecnologiche sviluppate per garantire la protezione dei lavoratori rendono tuttavia talvolta difficile per l'utente valutarne quantitativamente l'efficacia. Utilizzando varianti avanzate del processo a filo continuo con protezione gassosa nelle condizioni limite spesso presenti a livello industriale, questo studio ha avuto lo scopo appunto di quantificare l'efficienza e, in caso di utilizzo combinato, il grado di interazione delle misure tecniche per la protezione dai fumi di saldatura. Pertanto, è stata utilizzato un approccio che coinvolge la misurazione del tasso di emissione di fumi, la determinazione di elementi chimici specifici e la valutazione dei tassi di esposizione. A valle delle misurazioni sperimentali sono stati quindi elaborati i parametri considerati utili per coloro che hanno il compito di decidere quale misura possa fornire una protezione efficace.

579

**La gestione del sistema di qualità nelle attività di brasatura in accordo ai requisiti della norma UNI EN ISO 22688,**

G. Garbarino e M. Martini.

La norma ISO 22688 "Requisiti di qualità per la brasatura dei materiali metallici", entrata in vigore il 15 aprile 2020, è un valido strumento di supporto che stabilisce i requisiti di qualità per la corretta gestione del processo di fabbricazione, sia in officina sia in cantiere, di qualsiasi tipo di costruzione brasata. Al fine di assicurare il livello di qualità richiesto per i prodotti brasati e per ottimizzare i costi di fabbricazione, l'intero processo produttivo di brasatura deve essere controllato a partire dall'arrivo dei materiali in officina. Per tenere in debita considerazione tutti i differenti fattori che possono influenzare la qualità, il costruttore deve implementare un sistema di assicurazione della qualità. Questo articolo si pone l'obiettivo di sintetizzare i requisiti fondamentali richiesti dalla norma per operare in accordo ai criteri della buona pratica di fabbricazione.

587

**Introduzione alla saldatura degli acciai maraging,**

G. Garbarino e A. Avon.

Il termine maraging si riferisce ad una famiglia di leghe Fe-Ni in grado di coniugare elevate caratteristiche tensili ad ottima tenacità e resistenza alla fatica. Tali proprietà sono ottenute grazie alla presenza di una matrice costituita interamente da martensite (MAR) indurita attraverso la presenza di precipitati che si generano a valle di un opportuno trattamento termico di invecchiamento (AGING). L'introduzione nel mercato di questi acciai risale ai primi Anni '60 del secolo scorso e da allora sono stati oggetto di numerose applicazioni in diversi settori, primo tra tutti quello aerospaziale. Da allora questi acciai hanno trovato largo impiego nel settore aerospaziale ed aeronautico, dove le loro caratteristiche di resistenza meccanica e tenacità, unite all'ottima saldabilità, hanno costituito un punto di forza unico, e nel settore dell'attrezzaggio (principalmente stampi e matrici), anche in questo caso grazie alle elevate caratteristiche tensili unite alla buona lavorabilità ed al livello minimo di distorsioni, rilevato a valle del trattamento termico di invecchiamento. Ad oggi, i gradi più diffusi di queste leghe base ferro sono caratterizzati dalla presenza di nichel (in tenore pari al 18%) e di elementi che favoriscono la precipitazione durante il trattamento di invecchiamento.

## DIRETTORE RESPONSABILE

Dott. ing. Luca Timossi

## REDATTORE CAPO

Dott. ing. Michele Murgia

michele.murgia@iis.it

## REDAZIONE

Isabella Gallo

redazione.rivista@iis.it

## PROGETTO GRAFICO E IMPAGINAZIONE

Isabella Gallo

## ABBONAMENTI

rivistamarketing@iis.it

## PUBBLICITÀ

Cinzia Presti

cinzia.presti@iis.it



## Organo Ufficiale dell'Istituto Italiano della Saldatura

Direzione · Redazione · Pubblicità:

Lungobisagno Istria, 15A - 16141 Genova

Tel.: (+39) 010 8341475 - Fax: (+39) 010 8367780

redazione.rivista@iis.it - www.iis.it



Associato all'Unione Stampa Periodica Italiana

## Rivista Italiana della Saldatura

Abbonamento cartaceo annuale 2023:

Italia: € 110.00

Esteri: € 170.00

Un numero separato: € 26.00

Abbonamento elettronico annuale 2023: € 80.00

La Rivista viene inviata gratuitamente ai Soci dell'Istituto Italiano della Saldatura.

Registrazione al ROC n. 5042 - Tariffa regime libero: "Poste Italiane SpA - Spedizione in Abbonamento Postale 70%, DCB Genova"

Fine Stampa Novembre 2023

Aut. Trib. Genova 341 - 20.04.1955

Stampa: ALGRAPHY srl, Genova - www.algraphy.it



L'Istituto Italiano della Saldatura aderisce per i contenuti della propria Rivista alle Linee Guida emanate da COPE, Committee on Publication Ethics (<http://publicationethics.org>), con particolare riferimento ai contenuti degli articoli, alla pubblicazione di informazioni riservate o sensibili ed alla citazione delle fonti. La riproduzione degli articoli pubblicati è permessa purché ne sia citata la fonte, ne sia stata concessa l'autorizzazione da parte della Direzione della Rivista e sia trascorso un periodo non inferiore a tre mesi dalla data della pubblicazione. La collaborazione è aperta a tutti, Soci e non Soci, in Italia e all'estero.

La Direzione della Rivista si riserva di accettare o meno, a suo insindacabile e privato giudizio, le inserzioni pubblicitarie.

Ai sensi del GDPR (Reg. UE 679/2016), i dati personali dei destinatari della Rivista saranno oggetto di trattamento nel rispetto della riservatezza, dei diritti della persona e per finalità strettamente connesse e strumentali all'invio della pubblicazione e ad eventuali comunicazioni ad esse correlate.

## Studio della saldabilità di un acciaio bainitico ad alto silicio

**Autori**

- **Mattia Franceschi, Edoardo Bregolin, Andrea Zambon, Luca Pezzato**, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Padova, Italia.
- **Alvise Miotti Bettanini, Luca Pasqualini, Simone Campagnolo, Davide Beniero**, INE SpA, Cittadella, Padova, Italia.

### Abstract ■ Sommario

Gli acciai bainitici ad alto silicio sono materiali di recente ideazione che combinano eccellenti caratteristiche meccaniche di resistenza alla trazione (>1.5 GPa) e duttilità (~15%) con altrettanto importanti caratteristiche funzionali come la resistenza all'abrasione. Di conseguenza, questi acciai sono valutati come possibile alternativa alle proposte esistenti in numerose applicazioni industriali tra le quali l'ambito ferroviario. Tuttavia, la saldabilità di questi acciai appare critica per via della loro composizione chimica e la formazione di strutture di tempra fragili, con possibili difettosità rispettivamente di criccabilità a caldo e a freddo. Questi materiali richiedono quindi uno studio approfondito della loro saldabilità al fine di promuoverne (valutarne) l'adozione su scala industriale. In questa attività di ricerca si è studiata la saldabilità di un acciaio a medio tenore di carbonio (0.4 wt.%) e alto tenore di silicio (3.2 wt.%) tramite processi di saldatura UNI EN ISO 4063: 135 (GMAW), 111 (SMAW) e 141 (GTAW). I consumabili utilizzati sono stati scelti sulla base delle caratteristiche meccaniche del materiale base e perciò sono stati presi in considerazione consumabili per la saldatura di acciai bonificati. I giunti, realizzati tramite i tre processi di cui sopra, sono stati sottoposti ad un trattamento termico di bonifica modificato, detto di "austempering". L'evoluzione microstrutturale e le proprietà meccaniche dei giunti, prima e dopo trattamento, sono state caratterizzate con microscopia ottica ed elettronica, prove di durezza e di trazione trasversale. Le tensioni residue dopo saldatura sono state valutate mediante diffrazione con raggi X. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona saldabilità e compatibilità tra il materiale base e i consumabili utilizzati in tutti i processi, non evidenziando problematiche di criccabilità a caldo e a freddo. In prospettiva, questi risultati stimolano la ricerca e lo sviluppo di nuovi consumabili di saldatura con resistenza allo snervamento superiore a 1 GPa, attualmente non contemplati dalla normativa.

.....  
*High silicon bainitic steels are recently developed materials that*

*combine excellent mechanical properties of tensile strength (>1.5 GPa) and ductility (~15%) with equally important functional characteristics such as abrasion resistance. Consequently, these steels are evaluated as a possible alternative to existing proposals in numerous industrial applications including railways. However, their weldability appears critical due to the chemical composition and the formation of brittle hardening structures, with possible hot and cold cracking defects respectively. These materials therefore require an in-depth study of their weldability in order to promote (evaluate) their adoption on an industrial scale. In this research activity, the weldability of a medium carbon steel (0.4 wt.%) and high silicon content (3.2 wt.%) was studied using UNI EN ISO 4063: 135 (GMAW), 111 (SMAW) and 141 (GTAW). The consumables were chosen on the basis of the mechanical properties of the base material and therefore consumables for QT steels were taken into consideration. The joints, made using the three techniques mentioned above, were subjected to a modified heat treatment known as "austempering". The microstructural evolution and mechanical properties of the joints before and after heat treatment were characterized with optical and electronic microscopy, hardness measurements and transverse tensile tests. The residual stresses after welding were evaluated by X-ray diffraction. The results obtained highlighted good weldability and compatibility between the base material and the consumables used in all processes, not highlighting problems of hot and cold cracking. Looking ahead, these results stimulate research and development of new consumables with yield strength greater than 1 GPa, currently not covered by standards.*

#### IIW Thesaurus Keyword

QT steels; GMA Welding; GTA Welding; consumable; cracking; microstructure; weldability.

(\*) Memoria presentata alle Giornate Nazionali di Saldatura, GNS12, Workshop "Progettazione e comportamento in servizio di strutture ed apparecchiature saldate, proprietà dei giunti e metallurgia della saldatura", 24-25 maggio 2023, Porto Antico di Genova, Centro Congressi, Genova.

## Studio della saldabilità di un acciaio bainitico ad alto silicio

**Autori**

- **Mattia Franceschi, Edoardo Bregolin, Andrea Zambon, Luca Pezzato**, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Padova, Italia.
- **Alvise Miotti Bettanini, Luca Pasqualini, Simone Campagnolo, Davide Beniero**, INE SpA, Cittadella, Padova, Italia.

### Abstract ■ Sommario

Gli acciai bainitici ad alto silicio sono materiali di recente ideazione che combinano eccellenti caratteristiche meccaniche di resistenza alla trazione (>1.5 GPa) e duttilità (~15%) con altrettanto importanti caratteristiche funzionali come la resistenza all'abrasione. Di conseguenza, questi acciai sono valutati come possibile alternativa alle proposte esistenti in numerose applicazioni industriali tra le quali l'ambito ferroviario. Tuttavia, la saldabilità di questi acciai appare critica per via della loro composizione chimica e la formazione di strutture di tempra fragili, con possibili difettosità rispettivamente di criccabilità a caldo e a freddo. Questi materiali richiedono quindi uno studio approfondito della loro saldabilità al fine di promuoverne (valutarne) l'adozione su scala industriale. In questa attività di ricerca si è studiata la saldabilità di un acciaio a medio tenore di carbonio (0.4 wt.%) e alto tenore di silicio (3.2 wt.%) tramite processi di saldatura UNI EN ISO 4063: 135 (GMAW), 111 (SMAW) e 141 (GTAW). I consumabili utilizzati sono stati scelti sulla base delle caratteristiche meccaniche del materiale base e perciò sono stati presi in considerazione consumabili per la saldatura di acciai bonificati. I giunti, realizzati tramite i tre processi di cui sopra, sono stati sottoposti ad un trattamento termico di bonifica modificato, detto di "austempering". L'evoluzione microstrutturale e le proprietà meccaniche dei giunti, prima e dopo trattamento, sono state caratterizzate con microscopia ottica ed elettronica, prove di durezza e di trazione trasversale. Le tensioni residue dopo saldatura sono state valutate mediante diffrazione con raggi X. I risultati ottenuti hanno evidenziato una buona saldabilità e compatibilità tra il materiale base e i consumabili utilizzati in tutti i processi, non evidenziando problematiche di criccabilità a caldo e a freddo. In prospettiva, questi risultati stimolano la ricerca e lo sviluppo di nuovi consumabili di saldatura con resistenza allo snervamento superiore a 1 GPa, attualmente non contemplati dalla normativa.

.....  
*High silicon bainitic steels are recently developed materials that*

*combine excellent mechanical properties of tensile strength (>1.5 GPa) and ductility (~15%) with equally important functional characteristics such as abrasion resistance. Consequently, these steels are evaluated as a possible alternative to existing proposals in numerous industrial applications including railways. However, their weldability appears critical due to the chemical composition and the formation of brittle hardening structures, with possible hot and cold cracking defects respectively. These materials therefore require an in-depth study of their weldability in order to promote (evaluate) their adoption on an industrial scale. In this research activity, the weldability of a medium carbon steel (0.4 wt.%) and high silicon content (3.2 wt.%) was studied using UNI EN ISO 4063: 135 (GMAW), 111 (SMAW) and 141 (GTAW). The consumables were chosen on the basis of the mechanical properties of the base material and therefore consumables for QT steels were taken into consideration. The joints, made using the three techniques mentioned above, were subjected to a modified heat treatment known as "austempering". The microstructural evolution and mechanical properties of the joints before and after heat treatment were characterized with optical and electronic microscopy, hardness measurements and transverse tensile tests. The residual stresses after welding were evaluated by X-ray diffraction. The results obtained highlighted good weldability and compatibility between the base material and the consumables used in all processes, not highlighting problems of hot and cold cracking. Looking ahead, these results stimulate research and development of new consumables with yield strength greater than 1 GPa, currently not covered by standards.*

#### IIW Thesaurus Keyword

QT steels; GMA Welding; GTA Welding; consumable; cracking; microstructure; weldability.

(\*) Memoria presentata alle Giornate Nazionali di Saldatura, GNS12, Workshop "Progettazione e comportamento in servizio di strutture ed apparecchiature saldate, proprietà dei giunti e metallurgia della saldatura", 24-25 maggio 2023, Porto Antico di Genova, Centro Congressi, Genova.

## 1. Introduzione

Negli ultimi anni è stata sviluppata una nuova generazione di acciai ad alta resistenza, con microstruttura bainitica nanostrutturata carbide-free (CFB), che grazie alle caratteristiche meccaniche e microstrutturali è diventata promettente candidata per varie applicazioni industriali. La bainite carbide-free è una microstruttura composita costituita da ferrite bainitica e austenite ricca in carbonio, ottenuta grazie a una notevole concentrazione di silicio (>1.5%) e/o alluminio che inibiscono la precipitazione della cementite [1–3]. La dimensione dei costituenti microstrutturali, che è dell'ordine delle decine di nanometri, è ottenuta mediante un attento controllo dell'analisi chimica della lega e del trattamento termico (*austempering*). Inoltre la combinazione di ferrite bainitica nanostrutturata e la trasformazione indotta dalla deformazione dell'austenite residua in martensite (effetto TRIP) consente di raggiungere eccezionali valori di resistenza meccanica (> 1,5 GPa), duttilità (~20%) e tenacità (~1 MPa m<sup>1/2</sup>) [4,5]. Questo risultato permette la fabbricazione di componenti strutturali con massa significativamente ridotta a parità di resistenza e con minore impatto energetico. [6, 7]. Tuttavia la saldabilità di questi nuovi acciai appare limitata dal tenore di carbonio e più in generale dal valore del carbonio equivalente (CE) che, per l'acciaio oggetto di questo studio, è CE > 0.8 [8]. Tale valore è di norma associato ad una difficile saldabilità che potrebbe comportare problematiche di cricabilità a caldo (alti tenori di Si) e a freddo, a causa della formazione di strutture fragili in ZTA a ridosso della zona fusa, come spesso riscontrato nella saldatura di acciai a medio e alto carbonio. In tal senso, è di fondamentale importanza conoscere e contenere le tensioni residue generate durante la saldatura, che costituiscono una condizione necessaria per la formazione di cricche in zone fragili del materiale. La seconda problematica è legata alla sensibilità della microstruttura CFB ai trattamenti termici e alla chimica del materiale. Durante il processo di saldatura, l'apporto di un consumabile con chimica diversa rispetto al materiale base e l'esposizione alle alte temperature comportano fenomeni di diffusione tra materiale base e materiale d'apporto, in funzione delle attività dei singoli elementi, che modificano la composizione chimica della ZTA. Ne risulta quindi che la ZTA potrebbe non rispondere in modo adeguato al trattamento di *austempering*, con la formazione di strutture diverse dalla CFB inizialmente progettata. Le prime sperimentazioni sull'argomento sono state effettuate da Bhadeshia che ha evidenziato delle limitazioni legate alla formazione di martensite nel cordone di saldatura e nella ZTA [3]. Successivamente sono stati effettuati tentativi con diversi metodi di saldatura, tra cui Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), come riporta Królicka in una *review* [8], con acciai ad alto tenore di carbonio (0.55-0.82% in peso [9]). Fang et al. [10–12] hanno messo a punto un processo innovativo per evitare la degradazione delle proprietà meccaniche delle strutture saldate, ovvero il cosiddetto "trattamento di rigenerazione".

Questa nuova tecnica proposta consiste nel controllare la temperatura del giunto saldato trasferendolo in un forno e mantenendolo ad una temperatura idonea, per un tempo sufficiente a trasformare l'austenite - conseguente all'apporto termico del processo di saldatura - in bainite evitandone la trasformazione in martensite fragile. Questa combinazione di procedura di saldatura e trattamento termico porta ad evitare cricche a freddo o più in generale la formazione di strutture fragili in ZTA, con conseguente deterioramento delle proprietà meccaniche. Inoltre, gli autori hanno combinato il trattamento di rigenerazione con l'applicazione della deformazione plastica [12], sviluppando il metodo Rotary Impacting Trailing Welding (RITW), accelerando la trasformazione bainitica, analogamente a quanto avviene nei trattamenti di *ausforming* [13–17], inducendo anche variazioni nella morfologia della microstruttura. Sempre al fine di controllare la dimensione e morfologia del grano austenitico, Song et al. [8,18] hanno proposto qualche anno dopo il metodo "two-pass welding process" con due torce di saldatura in tandem, allo scopo di affinare la precedente granulometria di austenite nella zona fusa e nella zona termicamente alterata, accelerando la trasformazione bainitica. Sempre allo scopo di ridurre la ZTA, Fang et al. [11] hanno proposto anche l'impiego della saldatura laser, che consente di limitare il deterioramento delle proprietà meccaniche, che risultano pertanto paragonabili al materiale base.

Appare quindi evidente che la saldatura degli acciai bainitici ad alto carbonio, silicio e manganese è ancora oggetto di studio da parte della comunità scientifica. Risulta inoltre di fondamentale importanza che questi studi adottino processi di saldatura e consumabili attualmente esistenti sul mercato, in conformità a standard EN ISO in modo da promuovere e accelerare l'adozione di questi acciai su larga scala in ambito industriale. Pertanto, in questo studio la saldabilità di un acciaio bainitico di nuova concezione è stata valutata tramite i processi di saldatura UNI EN ISO 4063: 135 (GMAW), 111 (SMAW) e 141 (GTAW), in combinazione rispettivamente a consumabili di saldatura EN ISO 16834-A, EN ISO 18275-A, EN ISO 16834-A.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Materiale

In questo studio è stato utilizzato l'acciaio ad alto contenuto di silicio e a medio tenore di carbonio con composizione chimica riportata in Tabella 1. Un alto contenuto di silicio e alluminio sono stati selezionati per prevenire la precipitazione di cementite dall'austenite durante il trattamento

Tabella 1 - Composizione chimica (wt.%) dell'acciaio ad alto silicio utilizzato in questo studio.

C	Si	Mn	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0.38	3.2	2.56	0.105	0.05	0.05	0.02	0.05	Bal.

Tabella 2 - Parametri di processo per la saldatura GMAW, SMAW e GTAW.

	GMAW	SMAW	GTAW
<b>Materiale base</b>	Acciaio bainitico	Acciaio bainitico	Acciaio bainitico
<b>Geometria giunto</b>	Butt weld – V groove	Butt weld – V groove	Butt weld – V groove
<b>Preriscaldamento</b>	200 °C	200 °C	200 °C
<b>PWHT</b>	/	/	/
<b>Numero passate</b>	6	10	14
<b>Posizione</b>	EN ISO 6947: PA	EN ISO 6947: PA	EN ISO 6947: PA
<b>Materiale d'apporto – EN/AWS</b>	EN ISO 16834-A: G 69 4 M21 Mn3Ni1CrMo	EN ISO 18275-A: E 62 4 1,5NiMo B 4 2 H5	EN ISO 16834-A: W 79 6 I1 Mn4Ni2Mo
<b>Materiale d'apporto – diametro</b>	0.8 mm	2.5 mm	1.6 mm
<b>Gas di protezione</b>	EN ISO 14175: M21	/	EN ISO 14175: I1
<b>Corrente di saldatura</b>	168 A	101 A	188 A
<b>Tensione di saldatura</b>	27 V	27 V	15 V
<b>Velocità di saldatura</b>	37 cm/min	19 cm/min	19 cm/min
<b>Apporto termico</b>	0.80 kJ/cm	0.85 kJ/cm	0.91 kJ/cm
<b>Temperatura di interpass</b>	200 °C	200 °C	260 °C

Tabella 3 - Composizione chimica dei consumabili utilizzati per la fabbricazione dei giunti saldati.

Consumabile	Tecnica	Fe	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	V
INEFIL NiMoCr (filo)	GMAW	Bal.	0.08	1.60	0.50	0.007	0.007	0.30	1.50	0.25	0.12	0.09
INE 80B (puro apporto, rivestimento basico)	SMAW	Bal.	0.08	1.30	0.40	-	-	0.30	1.50	0.40	-	-
INETIG 120 S1 (bacchetta)	GTAW	Bal.	0.08	1.90	0.80	0.007	0.007	0.40	2.15	0.25	0.15	0.10

di *austempering* necessario per ottenere una microstruttura bainitica priva di cementite (CFB), che consente di mantenere elevati tenori di tenacità. Infine, il contenuto di manganese è stato adeguato al fine di rafforzare la matrice austenitica e abbassare il valore di *martensite start* ( $M_s$ ) per ottenere bainite a bassa temperatura [19].

## 2.2 Setup sperimentale

Le saldature realizzate in questo studio sono state ottenute partendo da piastre di lunghezza di 200 mm, larghezza pari a 100 mm e uno spessore di 10 mm, con una cianfrinatura al bordo con un angolo di 30°, ricavate dal lingotto iniziale (Figura 1). Precedentemente alla saldatura, le piastre sono state vincolate tramite puntatura a due piastre in acciaio al carbonio per garantire una geometria costante durante l'intero processo. Prendendo in considerazione il tenore di carbonio della lega e il corrispettivo *carbon equivalent* (CE), si è reso necessario un preriscaldamento a 200 °C, realizzato mediante fiamma. Le procedure di saldatura sono descritte nella Tabella 2. La composizione chimica del materiale d'apporto ed i valori

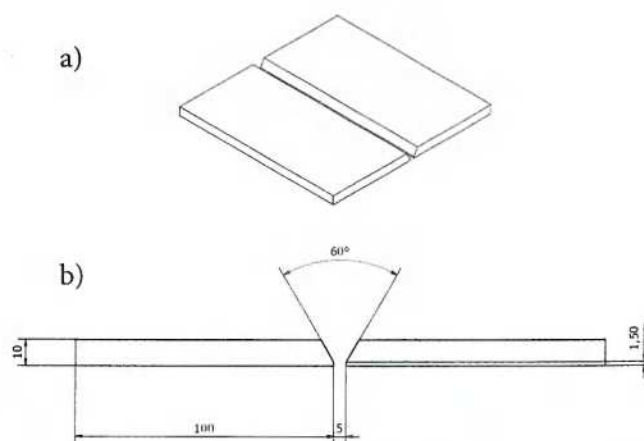


Figura 1 - Rappresentazione schematica dei campioni utilizzati per la realizzazione dei giunti saldati.

delle proprietà meccaniche del puro apporto in condizioni *as-welded* sono elencati rispettivamente nella Tabella 3 e nella Tabella 4.

Tabella 4 - Proprietà meccaniche (trazione monoassiale) del puro apporto in condizioni as-welded.

Consumabile	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	Elongation (%)
INEFIL NiMoCr	750	820	19
INE 80B	660	750	22
INETIG 120 S1	800	900	20

## 2.3 Misurazione della tensione residua

La misurazione dei valori della tensione residua (RS) è stata effettuata mediante metodo di diffrazione con raggi X con un diffrattometro Spider X (GNR Analytical Instrument Group Srl, Agrate Conturbia (NO), Italia) operante a 30 kV e 90  $\mu$ A, con un tubo radiogeno al cromo e un filtro al vanadio posizionato sul lato del rivelatore, che è stato utilizzato per l'abbattimento della componente  $K\beta$ , sia lungo la direzione longitudinale del cordone di saldatura che in direzione perpendicolare. Sono state selezionate cinque posizioni sulle saldature come illustrato nella Figura 2. Le misure sono state implementate utilizzando il piano (311) come picco di diffrazione e l'angolo  $\psi$  è stato variato, tra  $-30$  e  $+30^\circ$ , considerando in totale 11 angoli. Il diametro dello spot analizzato è stato fissato pari a 2 mm. I calcoli delle sollecitazioni sono stati effettuati con il supporto del software StressNet, fornito dal fornitore del diffrattometro.

## 2.4 Ispezione con liquidi penetranti

Sulla superficie superiore delle saldature sono state eseguite ispezioni con liquidi penetranti (PT) secondo la norma UNI EN 571-1 [20] sostituita da UNI EN ISO 3452-1 [21].

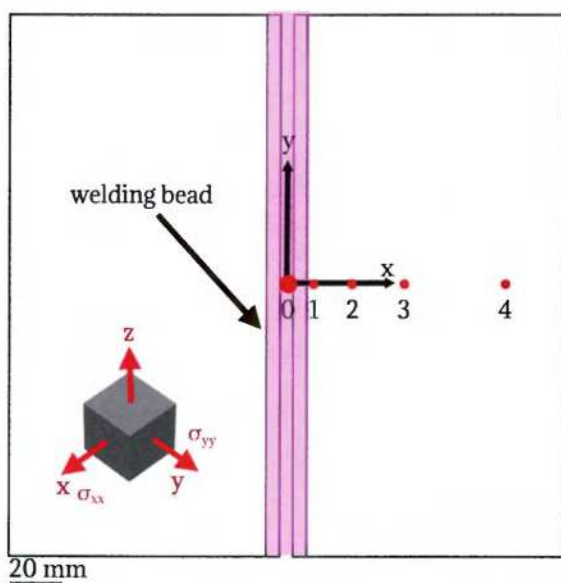


Figura 2 - Rappresentazione schematica dei giunti saldati e dei punti dove sono state effettuate le misure di tensioni residue.

## 2.5 Indagine microstrutturale

I cordoni sono stati sezionati trasversalmente alla direzione di saldatura, a distanza superiore a 25 mm dal punto iniziale/fine del cordone, e lungo la sezione trasversale del giunto sono stati prelevati provini per l'indagine microstrutturale. Le porzioni di materiale entro i 25 mm dal punto iniziale/fine del cordone sono state scartate per trascurare l'effetto dell'accensione e spegnimento dell'arco. Un'intera sezione trasversale è stata preparata secondo la procedura metallografica standard di preparazione dei campioni, utilizzando l'attacco Klemm's I per individuare la zona di fusione (FZ), la zona termicamente alterata (HAZ), il materiale base (BM) e i difetti. L'attacco Nital 2 è stato quindi utilizzato per rivelare i costituenti microstrutturali sulle varie zone delle saldature. Dopo l'attacco, le microstrutture sono state studiate mediante microscopia ottica e elettronica a scansione (Leica DMRE (Leica Microsystem Srl, Milano, Italia), Zeiss EVO MA10 (Carl Zeiss, Milano, Italia)).

## 2.6 Prove di durezza e di trazione monoassiale

Profili di microdurezza Vickers ( $HV_{0.3}$ ) sono stati realizzati lungo la sezione trasversale dei provini in accordo ad ASTM E92-17 [22].

I provini per le prove di trazione monoassiale sono stati ricavati dalle saldature lungo la direzione ortogonale alla direzione di saldatura. Provini di spessore 2 mm e larghezza pari allo spessore della lamiera e aventi il cordone di saldatura nella parte centrale, sono stati lavorati per avere una sezione trasversale uniforme durante le prove di trazione. In questo studio è stata adottata una macchina per prove di trazione MTS 322 (MTS Systems Corporation, Eden Prairie, MN, USA) con cella di carico da 50 kN. Prima delle prove di trazione, ogni campione è stato dipinto con uno spray in bianco e nero per creare uno schema stocastico di punti in corrispondenza del tratto utile. Per l'intera durata di ciascuna prova di trazione, sono state acquisite immagini dei provini sottoposti a trazione con una telecamera ad alta velocità ed elaborate utilizzando il software DIC GOM Aramis™ per analizzare la distribuzione delle deformazioni nel tratto utile del campione.

## 3. Risultati e discussione

### 3.1 Tensioni residue

Sono stati dapprima valutati i valori delle tensioni residue (RS) sulle lamiere di acciaio, allo stato "as-received". I risultati hanno evidenziato uno stato di tensione residua di compressione superficiale media pari a  $-861 \pm 35$  MPa, attribuito al processo di fabbricazione del materiale studiato, come già evidenziato in altre ricerche su materiali simili [23] [24-27]. In aggiunta, è stato possibile vedere che il processo di saldatura ha indotto un rilassamento delle tensioni sui tre giunti

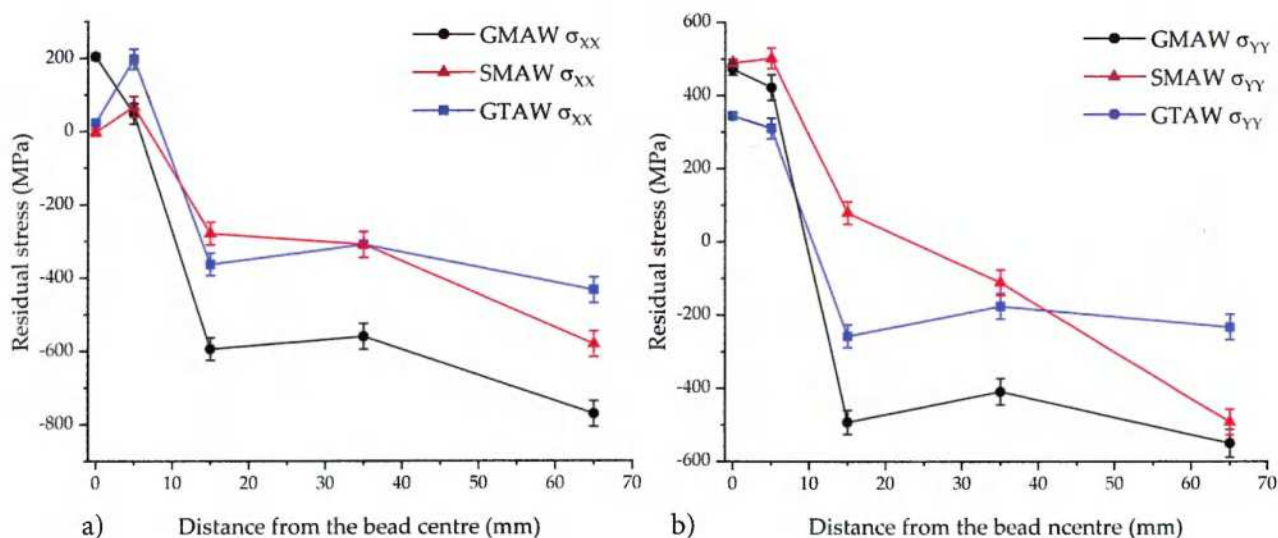


Figura 3 - Distribuzione delle tensioni residue (a) direzioni trasversale, (b) direzione longitudinale.

saldati. In entrambe le direzioni, trasversale e longitudinale rispetto alla direzione di saldatura, sono state riscontrate tensioni residue di compressione in valore assoluto inferiori rispetto alle tensioni misurate nel materiale precedentemente alla saldatura. In prossimità della zona fusa si osservano delle tensioni di trazione originate durante la solidificazione del giunto, inferiori, in valore assoluto, rispetto al carico di snervamento del materiale. La differenza nel valore assoluto tra saldature è in parte legata all'apporto termico relativo alla tecnica di saldatura e al tipo di configurazione utilizzata. Durante la saldatura GTAW, è stata adottata una configurazione DCEN, che si traduce in una maggiore quantità di calore diretta verso il metallo base e una zona interessata dal calore più ampia, come evidenziato dai dati raccolti in Figura 3. Inoltre, la differenza dei livelli di sollecitazione tra l'orientamento longitudinale (Y) e quello trasversale (X) è da attribuirsi ad un flusso termico non isotropo durante la saldatura, come spiegato da Ouali et al. [28]. Il calore viene fornito principalmente lungo la direzione di saldatura e l'estrazione è maggiore in questa direzione rispetto a quella in direzione X, quindi, considerando i vincoli, le sollecitazioni sviluppate nella direzione Y sono maggiori che in direzione X, in accordo con ASM Handbook vol. 6 [29].

Infine, è stato riscontrato che tutti i processi di saldatura introducono distorsioni continue e simmetriche in direzione Z, comprese tra  $1.1^\circ \pm 0.1^\circ$  (per il GMAW) e  $2.3^\circ \pm 0.3^\circ$

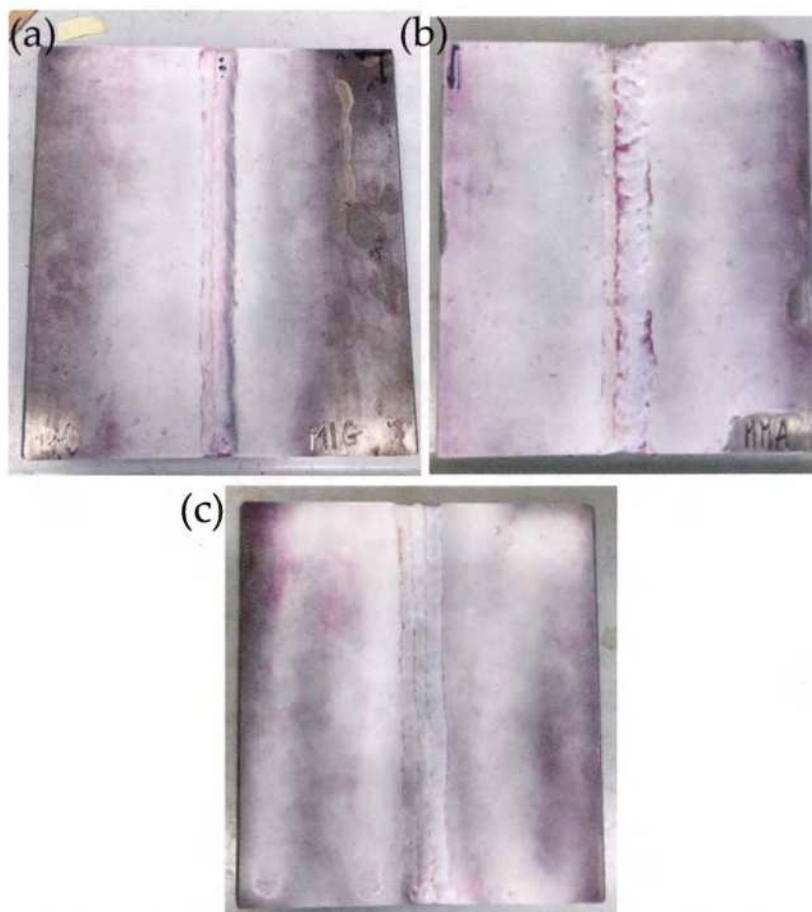


Figura 4 - Risultati delle ispezioni effettuate mediante liquidi penetranti sui tre giunti saldati a) GMAW, b) SMAW e c) GTAW.

(per la saldatura GTAW) a causa delle sollecitazioni indotte termicamente, che hanno anche indotto la frattura in corrispondenza del sistema di vincoli adottati per mantenere la geometria, nei giunti GMAW e GTAW.

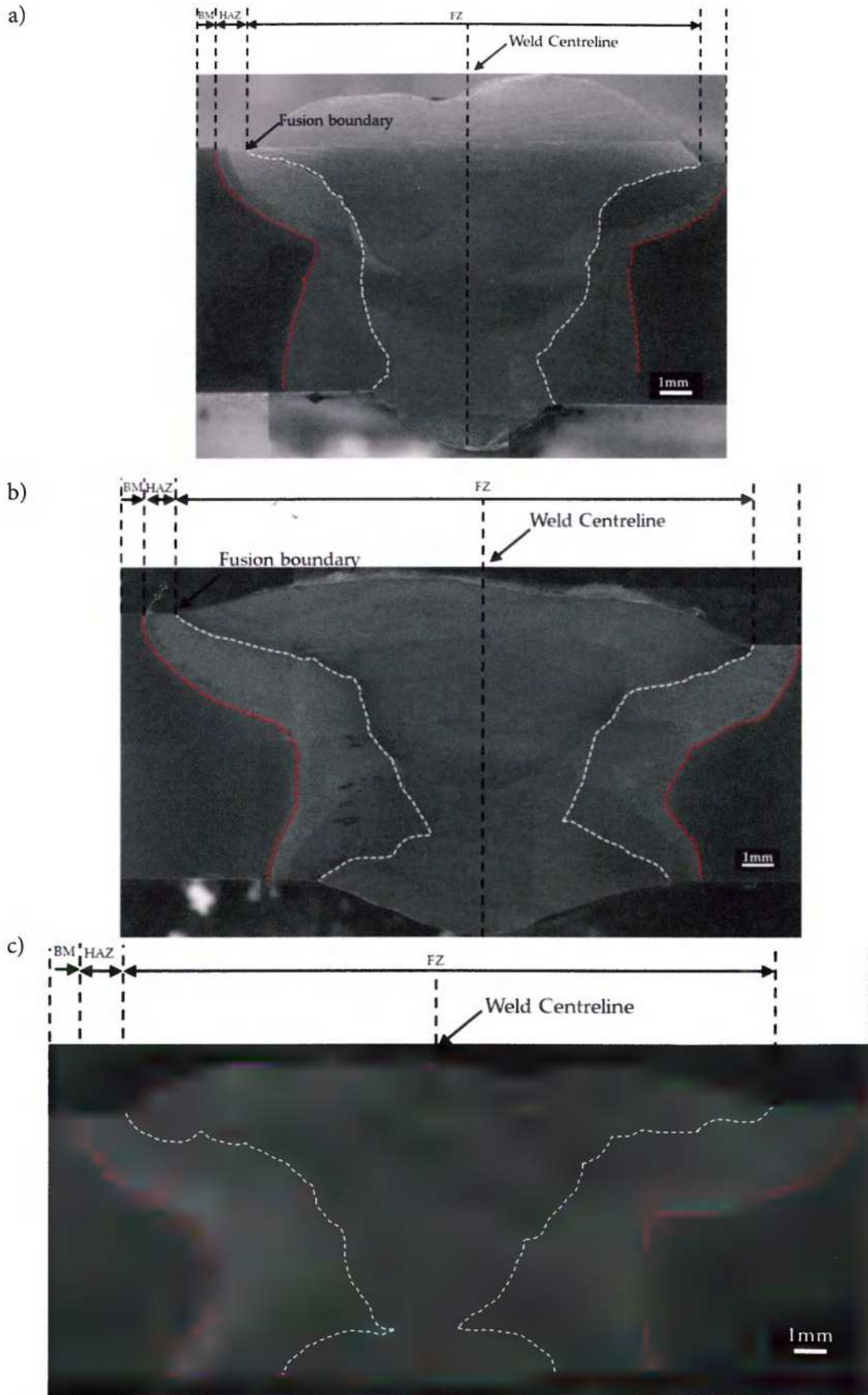


Figura 5 - Panoramica delle sezioni dei giunti saldati a) GMAW, b) SMAW, c) GTAW.



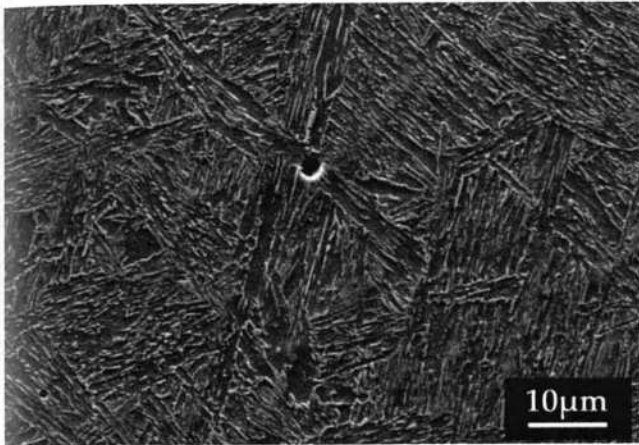


Figura 6 - Micrografia SEM che mostra la presenza di ferrite aciculare nel cordone di saldatura del giunto ottenuto con processo SMAW.

Come ipotizzato da Guo e coautori [30], il rapido raffreddamento derivante da elevati apporti termici comporta che la velocità di raffreddamento tra due passaggi successivi aumenti, inducendo maggiori deformazioni termiche e distorsioni, che sono direttamente proporzionali all'apporto termico [30].

L'ispezione tramite liquidi penetranti non ha evidenziato difettosità, quali cricche a caldo o freddo, come mostrato in Figura 4. Nel caso della saldatura ad elettrodo rivestito SMAW, ai lati del cordone si evidenziano possibili imperfezioni di

saldatura riconducibili a incisioni marginali o residui di scoria non perfettamente rimossa.

Nella Figura 5 si riportano i risultati delle indagini microstrutturali effettuate sulle sezioni trasversali dei tre giunti saldati, su campioni estratti a 25 mm dall'estremità in modo da evitare modifiche indotte dai processi di accensione e spegnimento dell'arco elettrico. Si può osservare che le tre sezioni trasversali di saldatura sono caratterizzate da strutture eterogenee e comprendono una zona di fusione (ZF) a doppio V, la zona termicamente alterata (ZTA) e il materiale base. Le osservazioni al microscopio ottico non hanno evidenziato la presenza di macro difetti come cricche a caldo e a freddo, mancanza di penetrazione, mancanza di fusione nelle zone di interpass, in corrispondenza della parete laterale e della radice [31]. Le analisi SEM nella ZF per le tre saldature hanno evidenziato una microstruttura costituita da una matrice di ferrite aciculare ( $\alpha_C$ ), che nuclea in corrispondenza delle inclusioni e austenite residua, con una durezza media di 280 ( $HV_{0.3}$ ), (Figure 6 e 7), [32].

In aggiunta, le indagini SEM (Figura 7) e i profili di durezza acquisiti nella ZTA (Figura 8) hanno portato a distinguere tre diverse zone, con diversi costituenti microstrutturali, indotti a seguito alle sequenze termiche indotte dalla saldatura. In primo luogo, nella regione prossima alla linea di fusione (Figura 7a) la microstruttura è costituita da martensite non rinvenuta, poiché il calore fornito dal processo induce la completa austenitizzazione del materiale e successiva

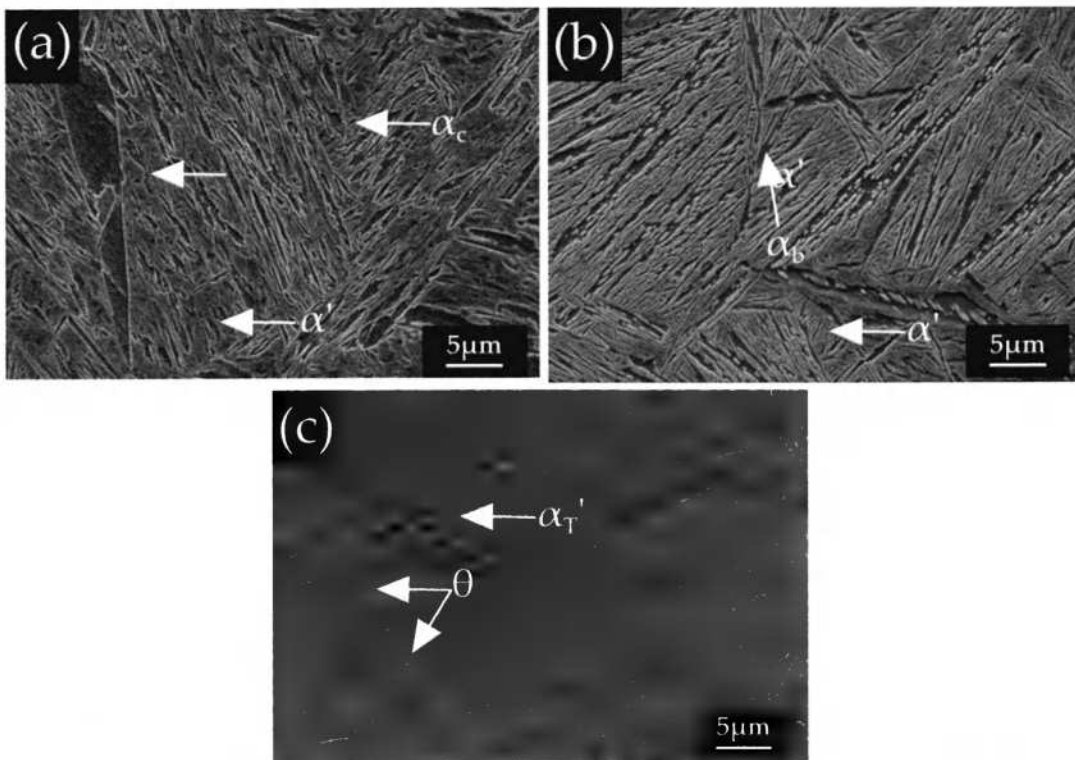


Figura 7 - Micrografie SEM che evidenziano la microstruttura nella zona termicamente alterata a) martensite nella zona adiacente al cordone di saldatura; b) zona con microstruttura bifasica costituita da ferrite bainitica e martensite; c) microstruttura costituita da martensite rinvenuta e cementite ( $\alpha_c$ : ferrite aciculare,  $\alpha_b$ : ferrite bainitica,  $\alpha'$ : martensite,  $\alpha_T'$ : martensite rinvenuta,  $\gamma$ : austenite,  $\theta$ : cementite).

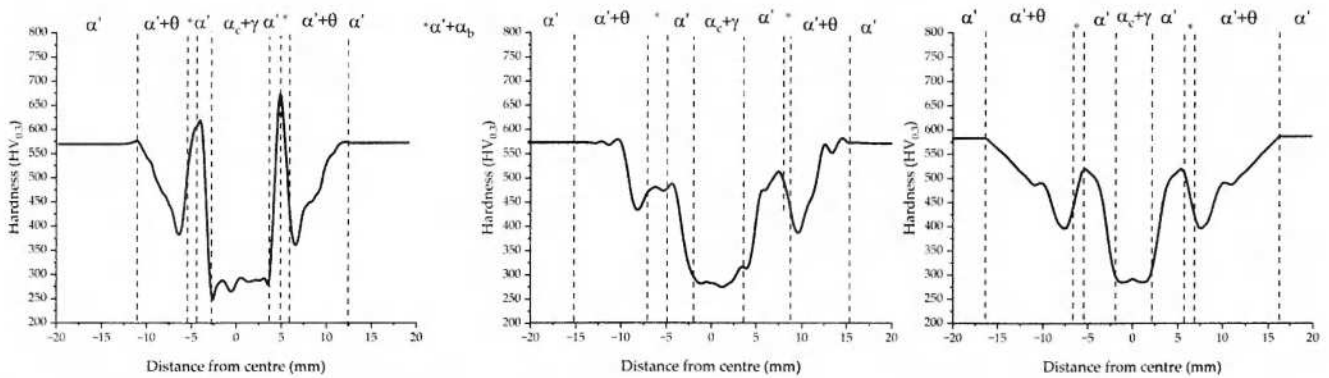


Figura 8 - Profili di durezza a) GMAW, b) SMAW e c) GTAW ( $\alpha$ : ferrite aciculare,  $\alpha'$ : martensite,  $\gamma$ : austenite,  $\theta$ : cementite).

trasformazione martensitica durante il seguente raffreddamento. Di conseguenza, è stato rilevato un picco nel profilo di durezza. Percorrendo la sezione trasversale nella ZTA si trova una seconda regione, costituita da ferrite bainitica e martensite/austenite, derivante dalla completa austenitizzazione del materiale, seguita da un raffreddamento continuo delle saldature durante la produzione. Infine, avvicinandosi al materiale base è stata individuata anche una terza regione costituita da martensite rinvenuta con cementite dispersa. In corrispondenza di ciò, si osserva un minimo di microdurezza nella sezione trasversale della saldatura, in cui la microdurezza locale scende al di sotto di 400 HV<sub>0.3</sub>. Successivamente, la durezza aumenta fino al raggiungimento della durezza iniziale. Inoltre, nei giunti SMAW e GTAW, la prima sotto regione della ZTA (martensite non rinvenuta) è costituita da martensite con minore durezza rispetto al caso GMAW, con il picco di durezza che non supera i 500 HV<sub>0.3</sub>. In linea di principio, le differenze dovrebbero essere ricondotte al ciclo termico sperimentato dal materiale durante la fabbricazione del cordone. A causa del maggior numero di passate richieste per realizzare il cordone e quindi del maggiore apporto di calore totale fornito dai processi SMAW e GTAW, si può verificare un parziale rinvenimento della microstruttura a causa della redistribuzione e agglomerazione degli atomi di carbonio in *cluster* in prossimità delle discontinuità del reticolo cristallino [36]. La formazione di *cluster* e la conseguente riduzione della tetragonalità del contenuto di carbonio della martensite sono responsabili della riduzione della durezza. Questo è supportato anche dalle micrografie e dalle misure di durezza, che confermano come la saldatura GTAW produca una ZTA più ampia rispetto alla saldatura con metodo GMAW. Dopo il trattamento di *austempering* a 325 °C il materiale base, indipendentemente dalla tecnica di saldatura, è caratterizzato dalla tipica microstruttura bainitica priva di carburi (Figura 9) costituita da ferrite bainitica e austenite arricchita di carbonio a doppia morfologia, blocchi non trasformati tra film localizzati tra le sottounità di ferrite ( $\alpha$ ) [6]. Per quanto riguarda la zona di fusione nei tre giunti saldati, si è osservata una microstruttura multifasica costituita da martensite, bainite e austenite residua come illustrato nella Figura 10 (a, c, e).

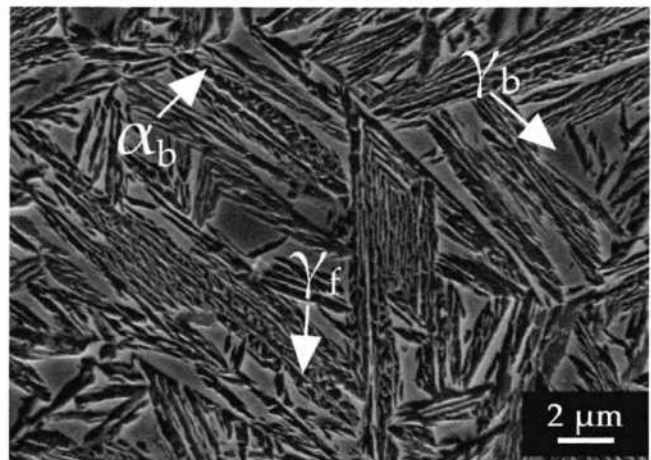


Figura 9 - Microstruttura bainitica carbide-free nella regione del materiale base post-trattamento termico.

Inoltre, indipendentemente dal processo di saldatura adottato, una porzione del materiale base adiacente alla zona fusa non è caratterizzata dalla tradizionale microstruttura bainitica attesa, in quanto le analisi SEM hanno evidenziato la presenza di isole ferritiche e la coalescenza di ferrite bainitica. Bhadeshia et al. hanno dimostrato ed evidenziato la possibilità che le sub-unità di ferrite bainitica, che condividono lo stesso orientamento cristallografico, possano coalescere nei primi stadi della trasformazione. Questo porta ad una distribuzione bimodale dello spessore delle sub-unità di ferrite bainitica, con sub-unità di spessore dell'ordine dei 100 nm e isole con dimensioni dell'ordine di diversi micron. Tale fenomeno può essere razionalizzato considerando la diffusione di elementi tra il materiale base e il materiale d'apporto. Il tenore di carbonio del materiale base è 4.5 volte superiore rispetto al materiale d'apporto e ciò porta ad una naturale diffusione del carbonio dalla ZTA verso la ZF, riducendo così il tenore di carbonio nella ZTA più prossima alla ZF. Questo comporta una variazione della risposta al trattamento termico, con formazione di isole ferritiche caratterizzate da proprietà meccaniche inferiori, come confermato dai profili di durezza (Figura 11), [9, 33]. Successivamente, sono state eseguite delle prove di trazione statica monoas-

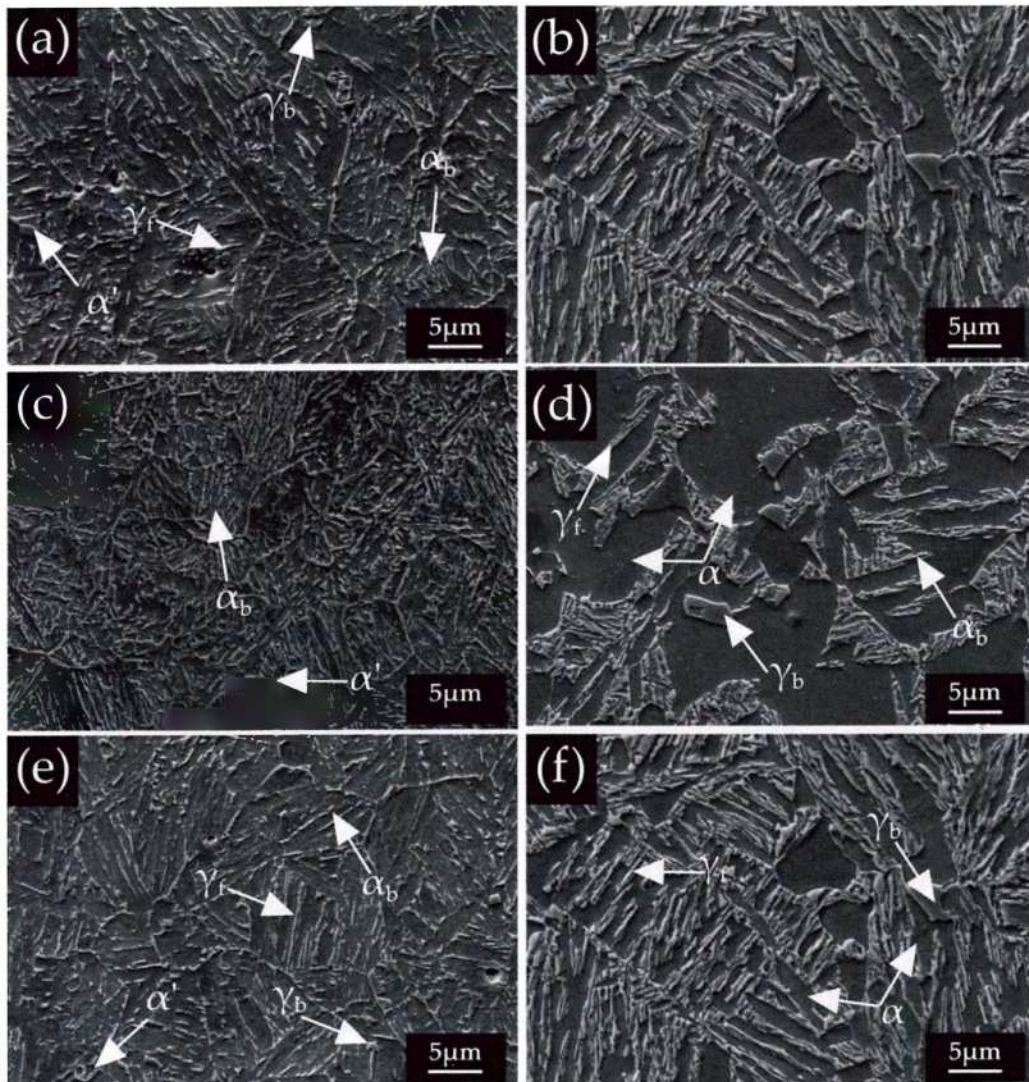


Figura 10 - Micrografie SEM riguardanti la microstruttura della zona di fusione e all'interfaccia tra zona fusa e materiale base per i tre giunti saldati (a-b) GMAW, (c-d) SMAW e (e-f) GTAW.

siale su campioni estratti trasversalmente al giunto, al fine di studiare le proprietà meccaniche dei tre giunti saldati dopo il trattamento termico post saldatura. I risultati sono riportati in Tabella 5. Dalla valutazione del carico massimo risulta che il giunto saldato GTAW è quello caratterizzato dalle più alte prestazioni, che derivano dalle migliori proprietà meccaniche del materiale utilizzato per la realizzazione del giunto anche in seguito al trattamento termico.

Tabella 5 - Proprietà meccaniche (trazione monoassiale) trasversale al giunto.

Weld coupon	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	RA (%)	Zona di frattura
GMAW	1016 ±2	38	Cordone di saldatura
SMAW	1144 ±17	45	Cordone di saldatura
GTAW	1292 ±10	47	Cordone di saldatura

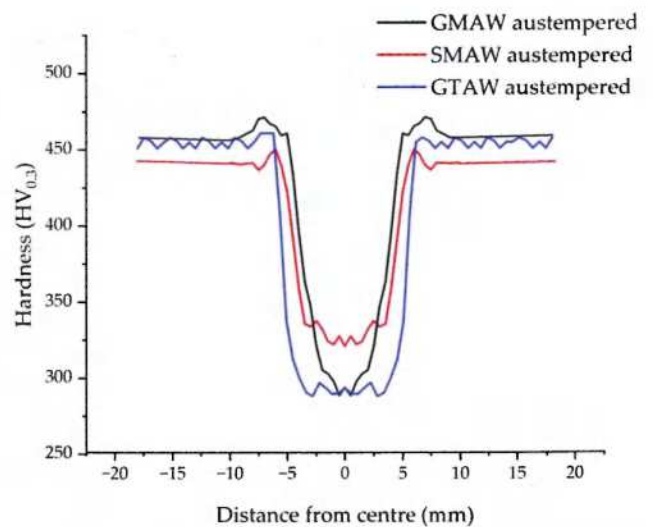


Figura 11 - Profili di durezza a) GMAW, b) SMAW e c) GTAW dopo trattamento di austempering.

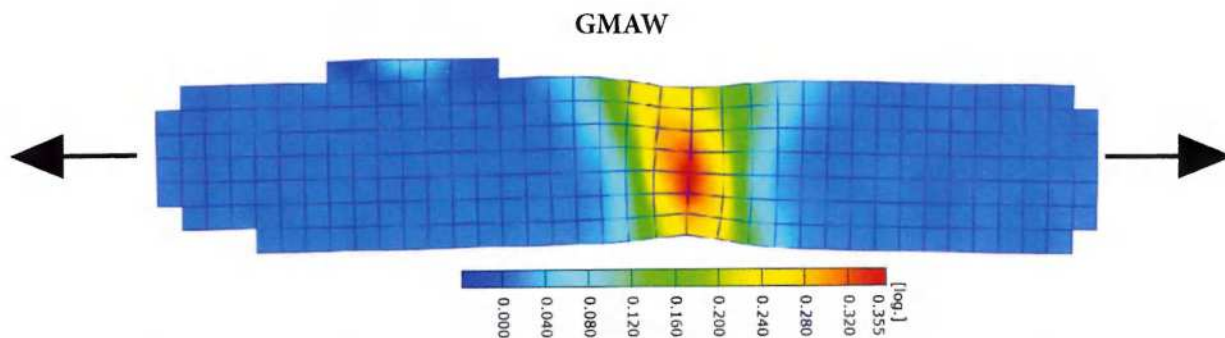


Figura 12 - Risultati ARAVIS per l'analisi della distribuzione delle deformazioni nel corso del test di trazione uniassiale.

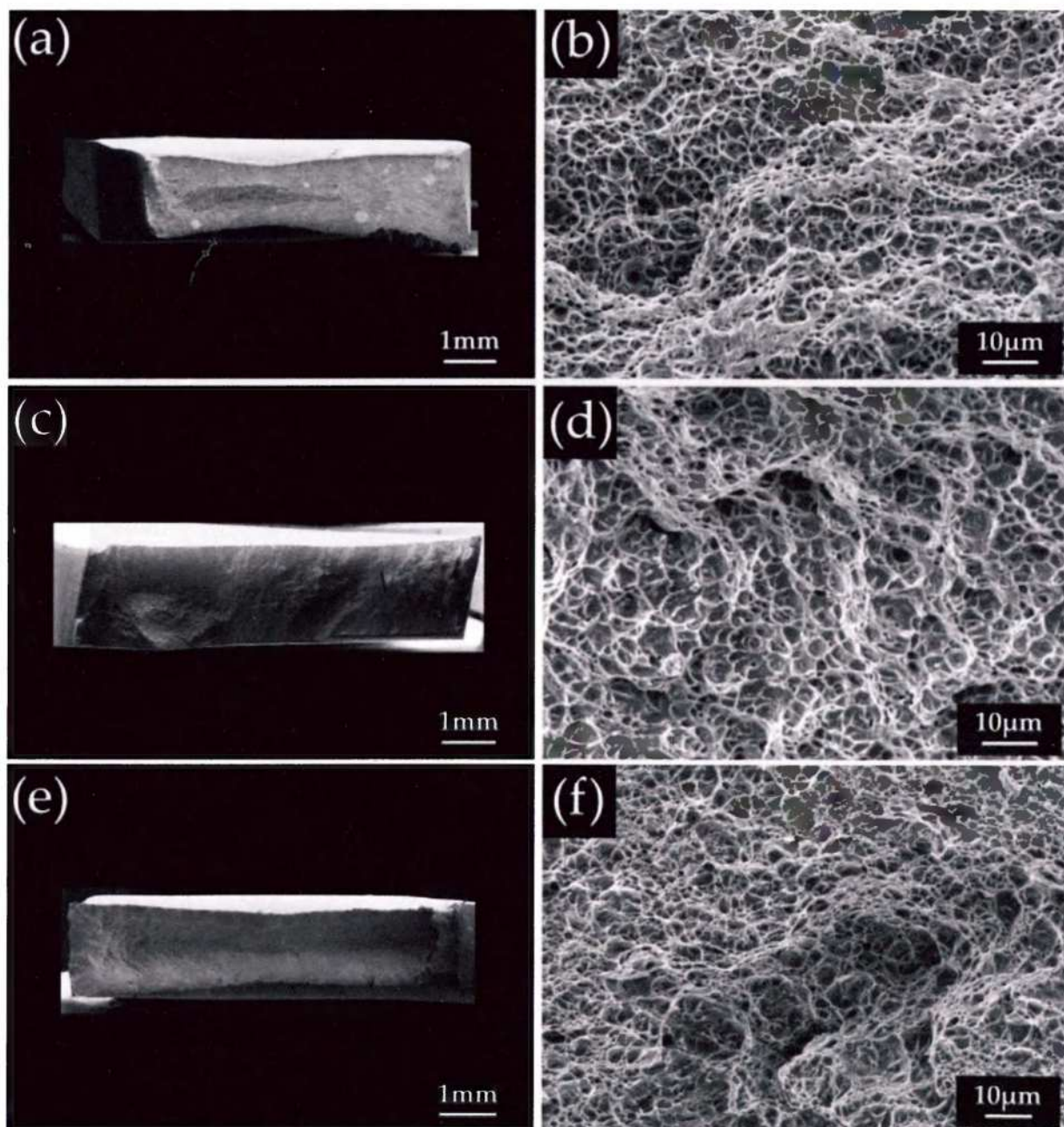


Figura 13 - Micrografie SEM ottenute dall'analisi delle superfici di frattura (a-b) GMAW, (c-d) SMAW e (e-f) GTAW.

Inoltre, si è potuto osservare che la frattura in tutti e tre i casi è avvenuta all'interno della zona fusa, dove sono concentrate le deformazioni, come mostra l'analisi mediante sistema ARAMIS, date le inferiori prestazioni dei consumabili rispetto al materiale base (Figura 12). Si evince inoltre che i giunti saldati non rispettano i requisiti previsti dalla norma EN ISO 15614 [34], pertanto deriva la necessità di sviluppare tipologie di consumabili adatte alla saldatura di acciai a medio tenore di carbonio con tali proprietà meccaniche e composizioni chimiche.

Le immagini SEM delle superfici di frattura, mostrate in Figura 13, evidenziano una tipica frattura coppa-cono caratterizzata dalla presenza di *dimples* che suggeriscono un comportamento duttile dei tre giunti saldati.

#### 4. Conclusioni

- Le saldature prodotte non sono interessate da fenomeni di criccabilità a caldo e a freddo.
- Il processo di saldatura induce tensioni residue di trazione nella zona fusa e di compressione nella zona termicamente alterata in direzione longitudinale (parallela al cordone di saldatura). La zona termicamente alterata è costituita da diverse sotto-regioni con differenti microstrutture: in particolare martensite, martensite+bainite/austenite residua e martensite rinvenuta con precipitati di cementite.
- La porzione di ZTA più prossima alla ZF risponde in maniera differente al trattamento di *austempering* formando delle zone ferritiche a causa della parziale riduzione locale del tenore di carbonio dovuta alla diffusione del medesimo dalla ZTA (alto carbonio) verso la ZF (basso carbonio).
- Il trattamento di *austempering* sul cordone di saldatura, considerato il basso contenuto di carbonio dei consumabili, comporta una preventiva formazione di martensite prima della trasformazione bainitica.
- Nel corso delle prove meccaniche si è osservato che la deformazione è principalmente concentrata nel cordone di saldatura dove si è verificata la frattura.
- Questo studio ha dimostrato l'ottima saldabilità di questa famiglia di acciai con processi e materiali d'apporto di uso industriale. Le criticità messe in luce sono legate alla scelta del materiale d'apporto, sia come chimica, che come resistenza meccanica dopo il trattamento di *austempering*.

#### Acknowledgments

Gli autori desiderano ringraziare per il supporto finanziario il progetto BIRD Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, progetto numero 211403.

#### Riferimenti bibliografici

- [1] Garcia-Mateo C, Caballero F G, Sourmail T, Kuntz M, Cornide J, Smanio V and Elvira R 2012 Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3wt% silicon Mater. Sci. Eng. A 549 185–92.
- [2] Qian L, Zhou Q, Zhang F, Meng J, Zhang M and Tian Y 2012 Microstructure and mechanical properties of a low carbon carbide-free bainitic steel co-alloyed with Al and Si Mater. Des. 39 264–8.
- [3] Bhadeshia H K D H, Load M and Svensson L 2003 Silicon-rich bainitic steel welds Trans. JWRI 43– 52
- [4] Garcia-Mateo C and Caballero F G 2015 Understanding the Mechanical Properties of Nanostructured Bainite Handb. Mech. Nanostructuring 1 35–65.
- [5] Garcia-Mateo C, Sourmail T, Caballero F G, Smanio V, Kuntz M, Ziegler C, Leiro A, Vuorinen E, Elvira R and Teeri T 2014 Nanostructured steel industrialisation: Plausible reality Mater. Sci. Technol. (United Kingdom) 30 1071–8.
- [6] Mousalou H, Yazdani S, Avishan B, Ahmadi N P, Chabok A and Pei Y 2018 Microstructural and mechanical properties of low-carbon ultra-fine bainitic steel produced by multi-step austempering process Mater. Sci. Eng. A 734 329–37.
- [7] Singh K, Kumar A and Singh A 2018 Effect of Prior Austenite Grain Size on the Morphology of Nano-Bainitic Steels Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 49 1348–54.
- [8] Królicka A, Ambroziak A and Zak A 2019 Welding capabilities of nanostructured carbide-free bainite: Review of welding methods, materials, problems, and perspectives Appl. Sci. 9 1–15.
- [9] Kirbiš P, Vuherer T, Irgolič T and Anžel I 2015 Metallographic Analysis of Kinetically Activated Bainite (KAB) Welds Metallogr. Microstruct. Anal. 4 570–8.
- [10] Fang K, Yang J G, Liu X S, Song K J, Fang H Y and Bhadeshia H K D H 2013 Regeneration technique for welding nanostructured bainite Mater. Des. 50 38–43.
- [11] Fang K, Yang J G, Song K J, Liu X S, Wang J J and Fang H Y 2014 Study on tempered zone in nanostructured bainitic steel welded joints with regeneration Sci. Technol. Weld. Join. 19 572–7.
- [12] Fang K, Yang J G, Song K J, Liu X S and Fang H Y 2014 Acceleration of regeneration treatment for nanostructured bainitic steel by rotary impacting trailed welding J. Mater. Process. Technol. 214 2935–40.
- [13] Franceschi M, Bertolini R, Fabrizi A, Dabalà M and Pezzato L 2023 Effect of ausforming temperature on bainite morphology in a 3.2% Si carbide-free bainitic steel Mater. Sci. Eng. A.
- [14] Eres-Castellanos A, Morales-Rivas L, Jimenez J A, Caballero F G and Garcia-Mateo C 2021 Effect of Ausforming on the Macro- and Micro-texture of Bainitic Microstructures Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci. 52 4033–52.
- [15] Garcia-Mateo C, Eres-Castellanos A, Somani M, Porter D, Latz A, Lieven B and Caballero F G 2018 Developing

- Nanostructured Bainite by Means of Ausforming THERMEC 2018.
- [16] Eres-Castellanos A, Morales-Rivas L, Latz A, Caballero F G and Garcia-Mateo C 2018 Effect of ausforming on the anisotropy of low temperature bainitic transformation Mater. Charact. 145 371–80.
- [17] He B, Xu W and Huang M 2017 Effect of boron on bainitic transformation kinetics after ausforming in low carbon steels J. Mater. Sci. Technol. 33 1494–503.
- [18] Song K J, Fang K, Yang J G, Ma R, Liu X S, Wang J J and Fang H Y 2015 Acceleration of regeneration treatment for nanostructured bainitic steel welding by static recrystallisation Mater. Sci. Technol. (United Kingdom) 31 835–42.
- [19] Garcia-Mateo C, Caballero F G and Bhadeshia H K D H 2003 Low Temperature Bainite J. Phys. IV Fr. 112 255–88.
- [20] UNI EN 571-1.
- [21] UNI EN ISO 3452-1.
- [22] Hardness K, Machines T, Hardness K, Machines S, Indenters K, Hardness K, Blocks T, Surfaces C and Uncertainty K H 17AD Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials BT - Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials i 1–27.
- [23] Bertolini R, Lizzul L, Pezzato L, Ghiotti A and Bruschi S 2019 Improving surface integrity and corrosion resistance of additive manufactured Ti6Al4V alloy by cryogenic machining Int. J. Adv. Manuf. Technol. 104 2839–50.
- [24] Em V, Woo W, Seong B S, Mikula P, Joo J, Kang M H and Lee K H 2012 Residual stress determination in thick welded steel plates J. Phys. Conf. Ser. 340.
- [25] Woo W, Em V, Mikula P, An G B and Seong B S 2011 Neutron diffraction measurements of residual stresses in a 50mm thick weld Mater. Sci. Eng. A 528 4120–4.
- [26] Woo W, An G B, Truman C E, Jiang W and Hill M R 2016 Two-dimensional mapping of residual stresses in a thick dissimilar weld using contour method, deep hole drilling, and neutron diffraction J. Mater. Sci. 51 10620–31.
- [27] Woo W, An G B, Em V T, De Wald A T and Hill M R 2014 Through-thickness distributions of residual stresses in an 80 mm thick weld using neutron diffraction and contour method J. Mater. Sci. 50 784–93.
- [28] Ouali N, Khenfer K, Belkessa B, Fajoui J, Cheniti B, Idir B and Branchu S 2019 Effect of Heat Input on Microstructure, Residual Stress, and Corrosion Resistance of UNS 32101 Lean Duplex Stainless Steel Weld Joints J. Mater. Eng. Perform. 28 4252–64.
- [29] Kilgore A B, Koehler M L, Metzler J W and Sturges S R 1993 Welding, brazing, and soldering handbook ASM Int. 6 Chapter 47.
- [30] Guo N, Yin X Q, Liang J and Ma N 2017 Effects of heat input on welding buckling distortion by experimental measurement method Sci. Technol. Weld. Join. 22 381–8.
- [31] Nizam M S H, Marizan S, Zaki S A and Mohd Zamzuri A R 2016 Vision based identification and classification of weld defects in welding environments: A review Indian J. Sci. Technol. 9 1–15.
- [32] Babu S S 2004 The mechanism of acicular ferrite in weld deposits Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 8 267–78.
- [33] Mas F, Tassin C, Valle N, Robaut F, Charlot F, Yescas M, Roch F, Todeschini P and Bréchet Y 2016 Metallurgical characterization of coupled carbon diffusion and precipitation in dissimilar steel welds J. Mater. Sci. 51 4864–79.
- [34] BSI Standards, Adnatsdr I, Standard I, En B S, Iso B S E N, British C, Yen C and Iso B S E N 2013 BSI Standards Publication Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test Part 14 : Laser-arc hybrid welding of steels , nickel and nickel alloys BSI Stand. Ltd. 3.