La Metallurgia Italiana
International Journal of the Italian Association for Metallurgy

DOI 10.36146/2026_10_43

Microstruttura, difetti metallurgici e comportamento elettrochimico dell'Invar 36 prodotto mediante Gas Metal Arc Additive Manufacturing

A. Acquesta, T. Monetta, L. Nele, G. Mattera

La produzione di Invar 36 mediante Gas Metal Arc Additive Manufacturing (GMA-AM) richiede una valutazione congiunta della microstruttura, dei difetti metallurgici e del comportamento a corrosione. Due pareti ottenute in modalità di corto circuito naturale, nelle medesime condizioni nominali, sono state caratterizzate mediante microscopia ottica ed elettronica, diffrazione a raggi X, microdurezza e quantificazione della porosità. Entrambi i depositi presentano una struttura prevalentemente cellulare, la sola fase γ rilevabile mediante XRD e microdurezze medie relativamente vicine, ma differiscono per porosità e presenza di microcricche. Le prove di polarizzazione in NaCl al 3,5% in peso evidenziano densità di corrente di corrosione inferiori sulla sezione XY e superiori sulla sezione XZ. Durante l'immersione, la spettroscopia di impedenza elettrochimica mostra variazioni più contenute dell'impedenza a bassa frequenza tra 7 e 14 giorni nel deposito meno difettoso. I risultati suggeriscono un possibile contributo della difettosità all'evoluzione della risposta elettrochimica, a fronte di caratteristiche microstrutturali e microdurezze medie simili.

PAROLE CHIAVE: INVAR 36; PRODUZIONE ADDITIVA; GAS METAL ARC ADDITIVE MANUFACTURING; DIFETTI METALLURGICI; MICROSTRUTTURA; CORROSIONE.

INTRODUZIONE

L'Invar 36 è una lega Fe-Ni contenente circa il 36% in peso di nichel, caratterizzata da un bassissimo coefficiente di espansione termica, proprietà che ne ha determinato l'ampio impiego in applicazioni a elevata stabilità dimensionale, quali componenti per il settore aerospaziale, criogenico, metrologico e per la realizzazione di stampi di precisione [1]. Nonostante le eccellenti proprietà funzionali, la lavorazione convenzionale della lega risulta complessa a causa della ridotta lavorabilità meccanica, rendendo particolarmente interessante l'impiego delle tecnologie di produzione additiva [2]. Tra queste, il Gas Metal Arc Additive Manufacturing (GMA-AM) rappresenta una soluzione promettente per la produzione di componenti metallici di medio-grandi dimensioni grazie agli elevati tassi di deposizione, ai costi contenuti del materiale d'apporto e alla possibilità di utilizzare impianti derivati dalle tradizionali tecnologie di saldatura [3]. L'applicazione del processo GMA-AM all'Invar 36 presenta tuttavia alcune criticità riconducibili principalmente al particolare comportamento termico della lega. La ridotta conducibilità termica favorisce infatti l'accumulo di calore durante la deposizione, influenzando la stabilità del bagno fuso e

Annalisa Acquesta, Tullio Monetta, Luigi Nele, Giulio Mattera
Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia

le condizioni di solidificazioni. In aggiunta, possono verificarsi condizioni durante il processo tali da determinare difetti quali porosità e cricche, che potrebbero insorgere durante la solidificazione o allo stato solido. Parallelamente, i ripetuti cicli di riscaldamento e raffreddamento tipici della deposizione strato su strato determinano una microstruttura anisotropa, caratterizzata da crescita epitassiale dei grani e dalla formazione di sottostrutture cellulari, con possibili ripercussioni sulle proprietà finali del materiale [4-6]. Sebbene negli ultimi anni siano stati pubblicati alcuni studi sulla produzione additiva dell'Invar 36 mediante processi ad arco [7], l'attenzione è stata rivolta prevalentemente all'ottimizzazione dei parametri di processo e alla caratterizzazione meccanica dei componenti ottenuti. Rimane, invece, meno studiata la variabilità della difettosità e della sua possibile relazione con l'evoluzione elettrochimica. Il presente lavoro esamina la deposizione in modalità di corto circuito naturale mediante una sorgente convenzionale, dopo una preliminare individuazione di una finestra di deposizione stabile, di provini in Invar 36 e integra la caratterizzazione metallurgica con lo studio della risposta elettrochimica in soluzione di NaCl al 3,5%. Il confronto con il filo di partenza e l'analisi di tre sezioni ortogonali consentono di valutare le differenze associate alla deposizione e all'orientazione della superficie esposta. Due pareti prodotte nelle medesime condizioni nominali sono inoltre confrontate per esaminare la variabilità della difettosità e la sua possibile relazione con l'evoluzione della risposta elettrochimica durante l'immersione.

MATERIALI E METODI

Produzione dei campioni

I campioni sono stati realizzati mediante un sistema sperimentale di Gas Metal Arc Additive Manufacturing (GMA-AM) costituito da un robot antropomorfo ABB IRB 2600-ID equipaggiato con una sorgente di saldatura EWM Titan XQ R 350 operante in modalità *short-circuit*. Come materiale d'apporto è stato utilizzato un filo commerciale di Invar 36 del diametro di 1,2 mm, la cui composizione chimica è riportata in tabella 1.

Tab.1 - Composizione chimica (% in peso) del filo di Invar 36 (Ø 1,2 mm) impiegato come materiale d'apporto per la realizzazione dei campioni mediante GMA-AM / *Chemical composition (% by weight) of the Invar 36 wire (Ø 1.2 mm) used as filler material for the fabrication of samples via GMA-AM.*

Elemento	Fe	Ni	Mn	Si	C	S	P	Ti	Pb
% in peso	63	36	0,30	0,12	0,01	0,004	<0,003	<0,003	0,001

Per individuare le condizioni di deposizione più idonee sono state investigate 30 differenti combinazioni di velocità di alimentazione del filo, tensione di saldatura e velocità di deposizione. Le pareti sono state realizzate mediante deposizione multilayer adottando una strategia alternata (A–B–A–B) al fine di limitare l'accumulo di calore tra gli strati consecutivi. Durante la deposizione è stata mantenuta una temperatura interpass di circa 100 °C. È stato utilizzato argon puro. Le diverse condizioni operative sono state valutate considerando la stabilità del processo, la regolarità geometrica dei cordoni e l'assenza di difetti macroscopici, individuando una finestra di deposizione stabile successivamente utilizzata per la produzione dei campioni destinati alla caratterizzazione metallurgica.

Con i parametri riportati in tabella 2 sono state realizzate due pareti, indicate come campione S e campione V. Il loro confronto consente di esaminare la variabilità delle caratteristiche metallurgiche e della risposta elettrochimica a parità di condizioni nominali di deposizione. Una parete rappresentativa è mostrata in figura 1.

Caratterizzazione microstrutturale

Le due pareti, costituite da 30 strati, sono state sezionate nei piani XZ, YZ e XY, con Z coincidente con la direzione di costruzione. I campioni sono stati inglobati in resina, preparati metallograficamente e attaccati con Nital al 5%. Macrostruttura, microstruttura e difetti sono stati esaminati mediante microscopia ottica (VHX 7000, Keyhence, Giappone) ed elettronica a scansione (SEM, Zeiss EVO 10, Germania). La costituzione di fase è stata valutata mediante diffrazione a raggi X (X PW 1729 Philips, Paesi Bassi) con sorgente incidente Mo–Kα, nell'intervallo 2Θ compreso tra 15° e 55°, con un passo di 0,05°. La microdurezza Vickers è stata misurata nella regione centrale applicando un carico di 100 gf per 10s (DuraVista-40°, Struers, Francia).

Caratterizzazione elettrochimica

Il comportamento a corrosione del materiale depositato è stato valutato esponendo un'area di 1 cm^2 a una soluzione acquosa di NaCl al 3,5% in peso, per simulare l'ambiente marino, mediante misure di potenziale a circuito aperto

(OCP) eseguite per 1 ora, prove di polarizzazione potenziodinamica e spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS). Le prove sono state eseguite, utilizzando un potenziostato (Interface 1000 Gamry, USA), confrontando i campioni prodotti mediante GMA-AM con il filo di partenza, utilizzato come materiale di riferimento. Un elettrodo al calomelano saturo (SCE) è stato utilizzato come elettrodo di riferimento e un elettrodo al platino come controelettrodo. Le prove di polarizzazione sono state eseguite applicando una velocità di scansione di 0,166 mV/s, in un intervallo compreso tra -0.5 e 0.1 V vs SCE. Le misure EIS sono state condotte applicando un'ampiezza sinusoidale di tensione pari a 10 mV vs SCE in un intervallo di frequenze compreso fra 10^5 Hz e 0,02 Hz.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Produzione dei campioni

La deposizione dell'Invar 36 mediante GMA-AM ha evidenziato una marcata sensibilità ai parametri di processo. Delle trenta combinazioni investigate, solo una parte ha consentito di ottenere pareti geometricamente stabili e prive di difetti macroscopici. Le principali instabilità osservate sono risultate riconducibili al collasso dei cordoni, alla formazione di humping e a un'eccessiva produzione di spruzzi, fenomeni attribuibili all'elevato accumulo di calore durante la deposizione. Sulla base delle osservazioni sperimentali è stata individuata una finestra operativa stabile, successivamente utilizzata per la produzione dei campioni destinati alla caratterizzazione metallurgica. Le condizioni di deposizione selezionate sono riportate in tabella 2. Tali parametri hanno consentito di ottenere un apporto termico nominale di circa 370 J/mm, corrispondente a un valore effettivo di circa 315 J/mm, assumendo un rendimento del processo pari a 0,85. La riduzione dell'energia introdotta ha contribuito a limitare l'accumulo di calore tra gli strati successivi, favorendo la stabilità della deposizione e riducendo la formazione dei principali difetti metallurgici.

Tab.2 - Condizioni di deposizione adottate per la produzione dei campioni destinati alla caratterizzazione metallurgica / *Deposition conditions used for the production of samples intended for metallurgical characterization.*

Parametro	Valore
Velocità di alimentazione del filo (m/min)	3,8
Tensione di saldatura (V)	20
Velocità di deposizione (mm/s)	4,5
Temperatura interpass (°C)	100
Apporto termico nominale (J/mm)	370

Fig.1 - Parete in Invar 36 prodotta mediante GMA-AM utilizzando le condizioni di deposizione selezionate / *Invar 36 wall produced via GMA-AM using the selected deposition conditions.*

Una volta individuate le condizioni di deposizione più stabili, l'attenzione è stata rivolta alla caratterizzazione metallurgica del materiale ottenuto, al fine di correlare il ciclo termico di deposizione con l'evoluzione microstrutturale e le proprietà finali dell'Invar 36.

Analisi macrostrutturale

La figura 2 mostra la sezione XZ del campione S. La successione regolare delle pozze di fusione evidenzia chiaramente la natura *layer-by-layer* del processo e la buona continuità geometrica tra gli strati successivamente depositati. La geometria delle pozze di fusione mette in evi-

denza la rifusione parziale dello strato precedentemente depositato durante la realizzazione del cordone successivo. Nelle regioni osservate si riconosce una continuità della struttura di solidificazione attraverso le interfacce tra gli strati, mentre la direzione di crescita varia localmente seguendo la geometria delle pozze. Queste caratteristiche sono compatibili con l'evoluzione delle condizioni di estrazione del calore durante la deposizione [4-6].

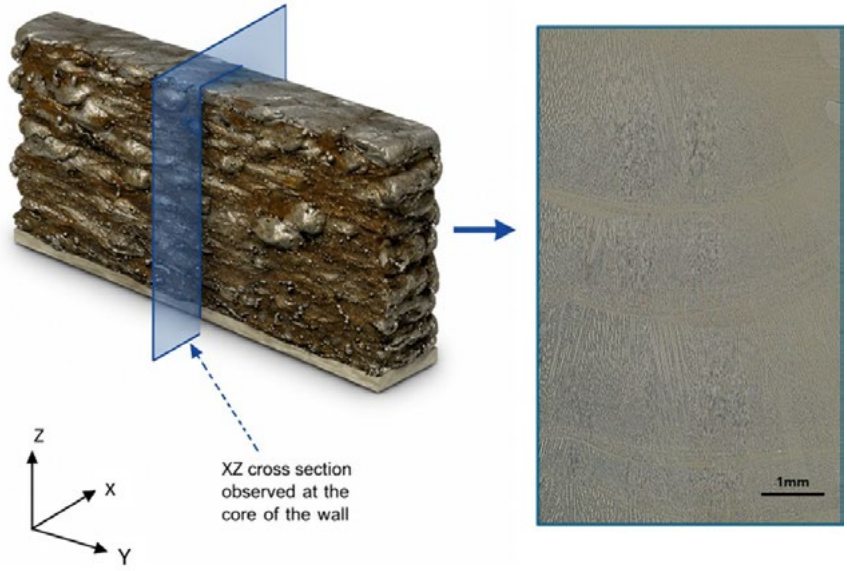

Fig.2 - Sezione XZ del campione S e dettaglio della struttura di solidificazione / *Macroscopic view of the cross-section of sample S.*

Analisi microstrutturale

L'analisi mediante microscopia elettronica a scansione ha consentito di approfondire i meccanismi di solidificazione responsabili della formazione della microstruttura dell'Invar 36 prodotto mediante GMA-AM. L'analisi microstrutturale è stata condotta principalmente sul campione S, ritenuto rappresentativo delle condizioni di deposizione selezionate. Le osservazioni effettuate sul campione V hanno evidenziato caratteristiche microstrutturali analoghe.

Nella sezione XZ, la struttura di solidificazione presenta una crescita direzionale che prosegue attraverso le interfacce tra gli strati (figura 3a), compatibile con un meccanismo di crescita epitassiale favorito dalla rifusione parziale del materiale sottostante [4-6]. A maggiore ingrandimento si osserva una sottostruttura prevalentemente cellulare (figura 3b). Localmente, le strutture appaiono più grossolane e assumono una morfologia più marcatamente dendritica, con porosità prevalentemente localizzate nelle regioni interdendritiche (figura 3c). Le variazioni osservate suggeriscono condizioni locali di solidificazione differenti all'interno del deposito.

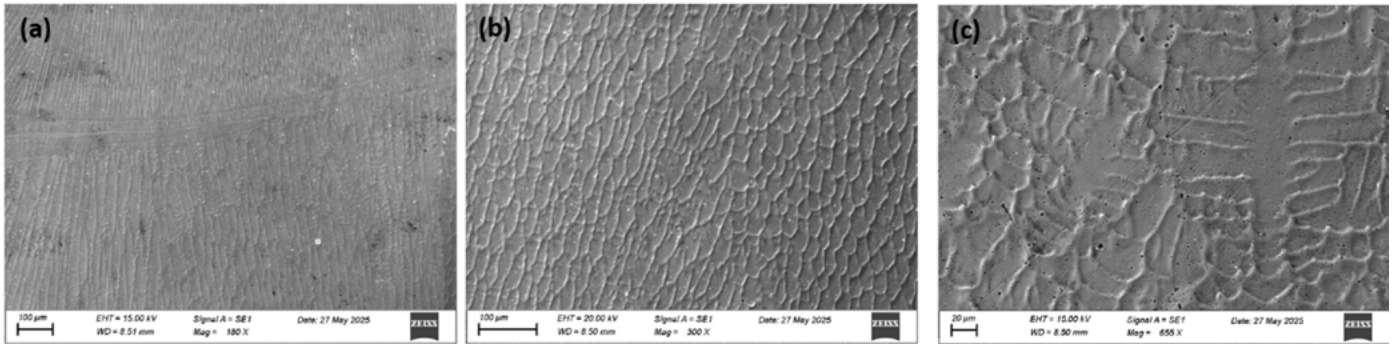

Fig.3 - Micrografia SEM nella sezione XZ del campione S / *SEM micrograph of the XZ section of sample S.*

Il confronto tra le sezioni XZ, YZ e XY è riportato in figura 4. Nei due piani contenenti la direzione di costruzione, XZ e YZ, prevalgono strutture allungate, con interfacce tra strati maggiormente riconoscibili nella sezione YZ. Nel piano XY si osservano regioni con diversa dimensione e morfologia delle celle. Le differenze tra le immagini riflettono sia il piano di intersezione della struttura tridimensionale di solidificazione sia possibili variazioni locali delle condizioni termiche.

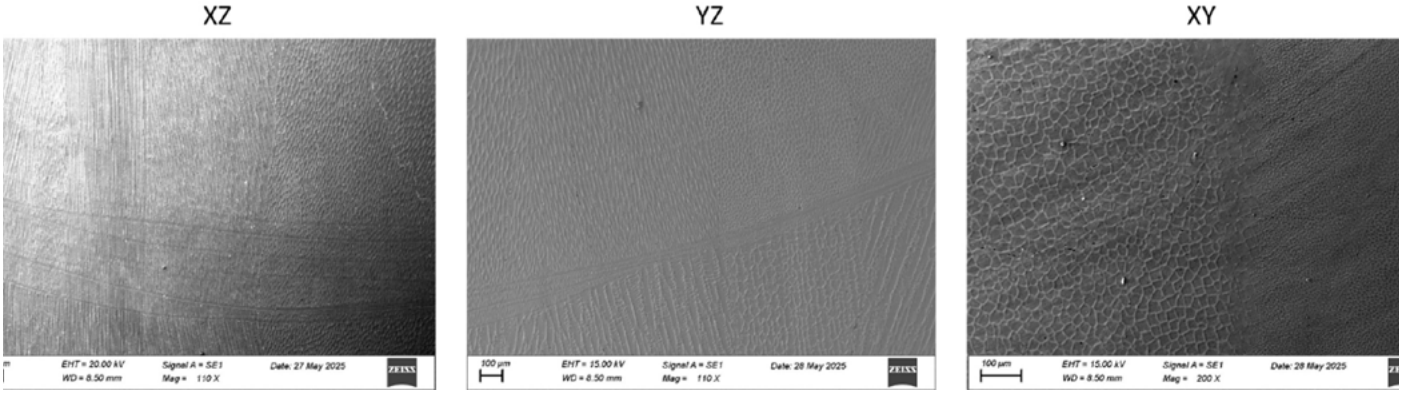

Fig.4 - Micrografia SEM nelle sezioni XZ, YZ e XY del campione S / *SEM micrograph of the XZ, YZ, and XY sections of sample S.*

Analisi di fase e microdurezza

I diffrattogrammi dei campioni S e V (figura 5) mostrano riflessi attribuibili alla fase γ a struttura cubica a facce centrate (FCC), senza evidenza di ulteriori fasi entro i limiti di rilevabilità della misura. Entrambi i depositi presentano quindi una matrice austenitica dopo il processo GMA-AM. Le differenze nelle intensità relative di alcuni riflessi potrebbero dipendere dall'orientazione preferenziale dei grani o dalle condizioni di campionamento della misura, senza implicare una diversa costituzione di fase.

Analisi cristallografica e proprietà meccaniche

L'analisi mediante diffrazione a raggi X è stata eseguita sui campioni prodotti mediante GMA-AM al fine di verificare l'eventuale presenza di trasformazioni di fase indotte dal ciclo termico di deposizione. I diffrattogrammi ottenuti per il campione S e il campione V sono riportati in figura 5.

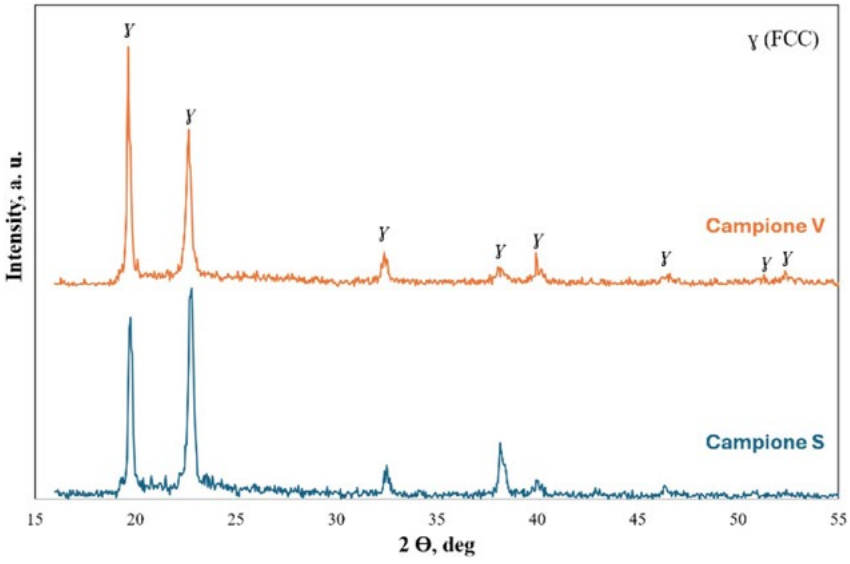

Fig.5 - Diffrattogrammi del campione S e del campione V / *Diffractograms of sample S and sample V.*

Le prove di microdurezza Vickers hanno evidenziato valori medi pari a 140,4 ± 4,5 HV0,1 per il campione S e 133,5 ± 4,5 HV0,1 per il campione V, dove l'incertezza riportata rappresenta la deviazione standard. I due depositi presentano valori medi relativamente vicini e una dispersione analoga delle misure lungo la sezione analizzata. I valori ottenuti risultano coerenti con la stabilità della fase γ evidenziata dall'analisi cristallografica e con la sostanziale omogeneità della matrice osservata mediante le analisi microstrutturali. Inoltre, essi sono confrontabili con quelli riportati in letteratura per componenti in Invar 36 prodotti mediante processi WAAM [8].

Difetti metallurgici

Porosità e microcricche sono state osservate in entrambi i depositi; il confronto tra i campioni S e V è stato condotto mediante osservazioni metallografiche e quantificazione della frazione areale di porosità.

Porosità

Le micrografie riportate in figura 6 mostrano la distribuzione della porosità nei due campioni. In entrambi i casi i pori risultano distribuiti in maniera pressoché uniforme all'interno della microstruttura e presentano una morfologia prevalentemente tondeggiante. Tuttavia, il campione S evidenzia una densità di pori sensibilmente superiore rispetto al campione V, pur in presenza di caratteristiche morfologiche sostanzialmente analoghe.

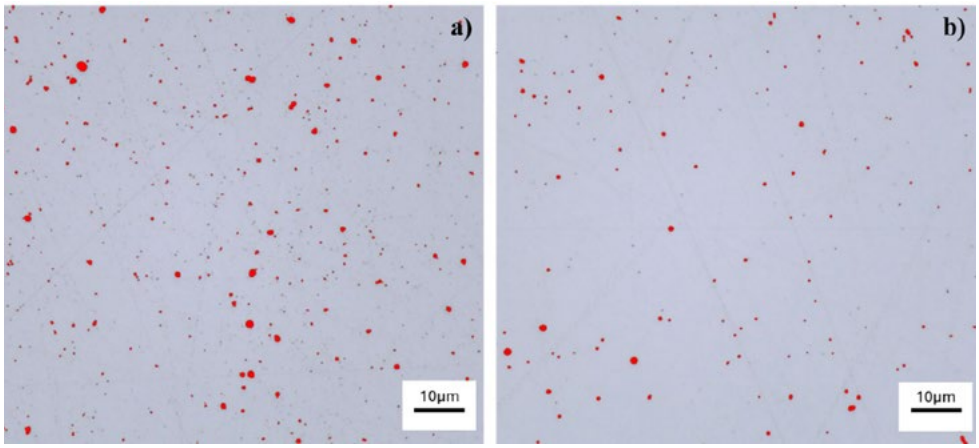

Fig.6 - Confronto della distribuzione della porosità osservata nelle sezioni trasversali del campione S (a) e del campione V (b) / *Comparison of the porosity distribution observed in the cross-sections of sample S (a) and sample V (b).*

L'analisi quantitativa, riportata in tabella 3, conferma tale osservazione. Sebbene l'area media dei pori risulti confrontabile nei due campioni (0,237 e 0,263 µm² rispettivamente), il campione S presenta un numero di pori significativamente maggiore (765 contro 226), determinando una porosità complessiva pari all'1,734%, circa tre volte superiore a quella misurata nel campione V (0,567%).

Tab. 3 - Stima porosità nei campioni analizzati / *Estimated porosity in the analysed samples.*

Parametro	Campione S	Campione V
Area media dei pori (µm²)	0,237	0,263
Area massima (µm²)	3,427	2,253
Area minima (µm²)	0,002	0,001
Numero di pori	765	226
Porosità (%)	1,734	0,567

L'assenza di differenze apprezzabili nelle dimensioni medie dei pori suggerisce che il meccanismo di formazione dei difetti sia sostanzialmente lo stesso nei due campioni. La diversa porosità osservata appare invece riconducibile a una differente frequenza di formazione dei pori durante la deposizione, evidenziando come le fluttuazioni intrinseche del processo GMA-AM possano influenzare significativamente la qualità metallurgica del materiale, pur operando nelle medesime condizioni nominali di processo.

Microcricche

Le osservazioni metallografiche hanno evidenziato microcricche prevalentemente nelle regioni prossime alla superficie delle pareti (figura 7). Nei campi esaminati, tali difetti appaiono più frequenti nel campione S rispetto al campione V, coerentemente con la maggiore frazione areale di porosità misurata in S. La presenza di cricche è compatibile con la suscettibilità dell'Invar 36 alla criccatura durante i cicli termici di deposizione. In particolare, Sood et al. [5] hanno documentato fenomeni di *ductility dip cracking* in materiale prodotto mediante deposizione ad arco. Le osservazioni qui presentate non consentono di distinguere univocamente tale meccanismo dalla criccatura di solidificazione.

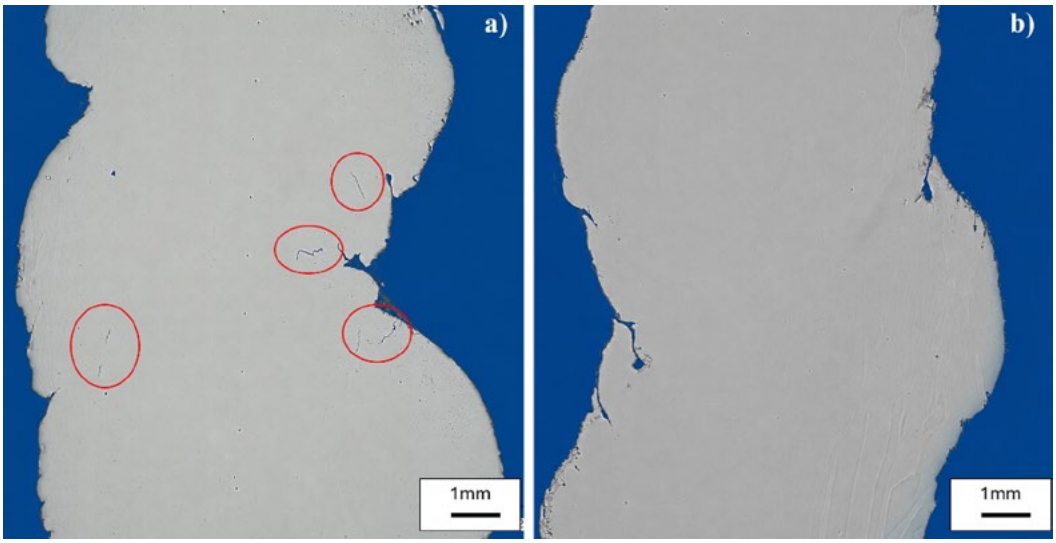

Fig.7 - Micrografie ottiche rappresentative delle microcricche osservate nei campioni prodotti mediante GMA-AM a) campione S e b) campione V. In cerchio rosso, le cricche individuate nel campione S / *Representative optical micrographs of the microcracks observed in samples produced using GMA-AM.*

ANALISI ELETTROCHIMICHE

Le analisi microstrutturali hanno evidenziato come il processo GMA-AM produca un materiale caratterizzato da una matrice completamente austenitica, una limitata presenza di difetti metallurgici e proprietà meccaniche sostanzialmente uniformi. Al fine di valutare l'influenza di tali caratteristiche sul comportamento a corrosione, il materiale depositato è stato confrontato con il filo di Invar 36 utilizzato come materiale di partenza mediante prove elettrochimiche in soluzione di NaCl al 3,5%.

Polarizzazione potenziodinamica

Il comportamento elettrochimico dei due depositi è stato studiato in soluzione di NaCl al 3,5% in peso, mediante polarizzazione potenziodinamica ed EIS. Il confronto con il filo di partenza consente di esaminare le differenze associate alla deposizione, mentre l'analisi delle sezioni XZ, YZ e XY permette di valutare l'influenza dell'orientazione della superficie esposta. La figura 8 confronta le curve di polarizzazione del filo di partenza e dei campioni S e V nella sezione XZ. I risultati relativi alle sezioni YZ e XY sono discussi attraverso i corrispondenti valori di densità di corrente di corrosione.

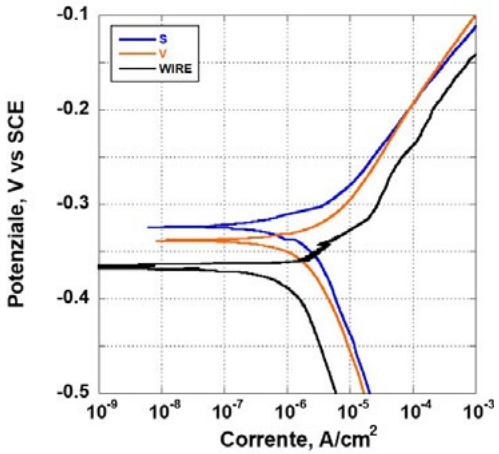

Fig.8 - Confronto delle curve di polarizzazione potenziodinamiche tra il filo utilizzato per la stampa e i campioni S e V, nella sezione XZ / *Comparison of the potentiodynamic polarization curves between the wire used for printing and the S and V samples, in the XZ section.*

Le curve mostrano differenze tra il filo e i depositi, sia nel potenziale di corrosione sia nella risposta dei rami anodico e catodico. Nei due campioni si osserva inoltre un ordinamento comune delle densità di corrente di corrosione: i valori più bassi sono misurati sulla sezione XY, pari a 8,21 × 10^{-7} A/cm² per S e 7,74 × 10^{-7} A/cm² per V; seguono YZ, con 1,53 × 10^{-6} e 1,41 × 10^{-6} A/cm², e XZ, con 2,71 × 10^{-6} e 2,41 × 10^{-6} A/cm². Il campione V presenta valori sistematicamente inferiori a S, con differenze tra depositi più contenute rispetto a quelle tra sezioni. I risultati indicano pertanto una dipendenza della risposta di polarizzazione dal piano esposto.

Spettroscopia di impedenza elettrochimica

Le figure 9 e 10 riportano i diagrammi di Bode dei campioni S e V all'inizio dell'esposizione e dopo 7 e 14 giorni.

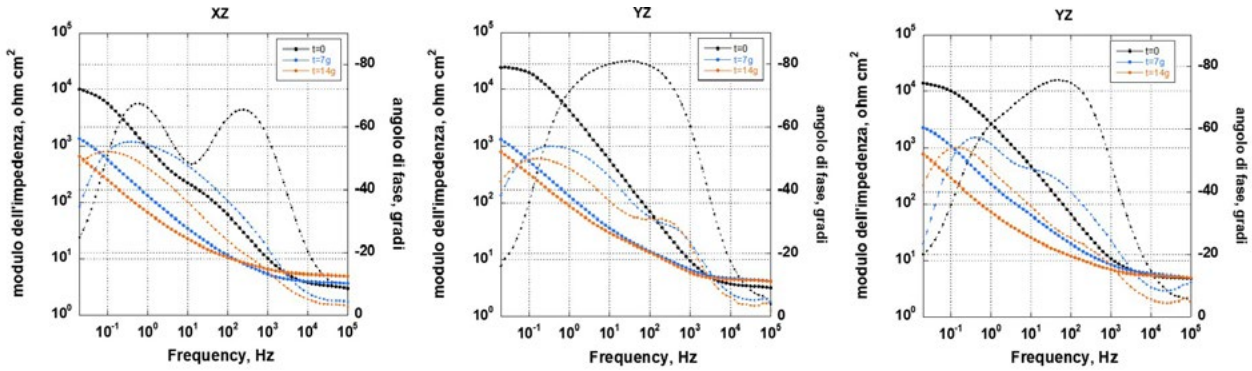

Fig.9 -Diagrammi di Bode ottenuti nelle tre sezioni, XZ, YZ e XY, del campione S / *Bode diagrams obtained in XZ, YZ, and XY sections of sample S.*

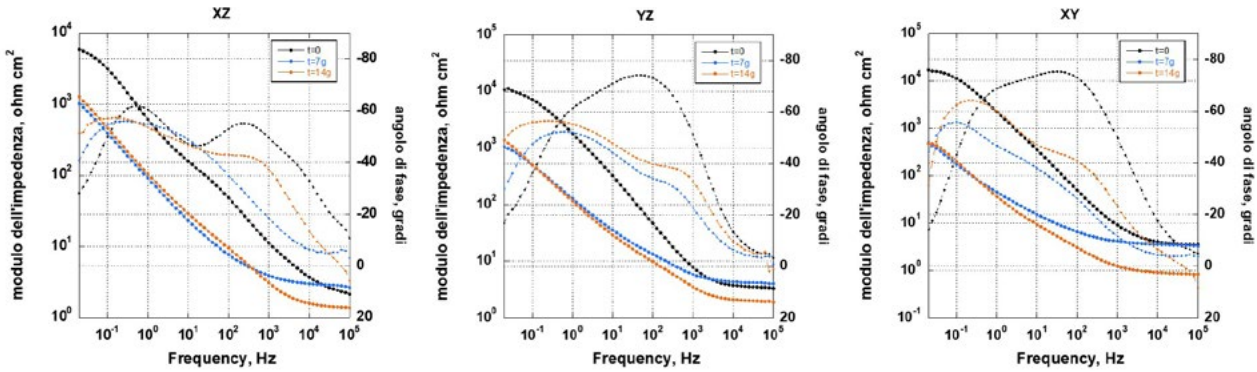

Fig.10 -Diagrammi di Bode ottenuti nelle tre sezioni, XZ, YZ e XY, del campione V / *Bode diagrams obtained in XZ, YZ, and XY sections of sample V.*

In entrambi i depositi, il modulo dell'impedenza alle basse frequenze diminuisce prevalentemente durante la prima settimana. Tra 7 e 14 giorni, S mostra un'ulteriore diminuzione, mentre V presenta variazioni più contenute in questa regione di frequenza. La vicinanza dei valori del modulo in V non corrisponde tuttavia a una completa sovrapposizione degli spettri, poiché persistono variazioni dell'angolo di fase. Gli angoli di fase evidenziano un'evoluzione dell'interfaccia durante l'immersione, con variazioni dell'ampiezza e della posizione in frequenza dei massimi. Rispetto alla condizione iniziale, dopo 7 giorni si osserva una riduzione del massimo in valore assoluto; l'evoluzione successiva non è invece monotona in tutte le sezioni. I due depositi condividono quindi alcune tendenze temporali, pur mostrando differenze nella forma degli spettri.

La minore variazione dell'impedenza a bassa frequenza del campione V tra 7 e 14 giorni si accompagna alla minore difettosità osservata metallograficamente. Tale associazione è compatibile con un ruolo dei difetti nell'evoluzione della risposta elettrochimica, per esempio attraverso l'accesso dell'elettrolita alle discontinuità superficiali. Il confronto disponibile non consente tuttavia di separare questo contributo dagli effetti dello stato superficiale e dei prodotti di corrosione.

CONCLUSIONI

Il processo GMA-AM in modalità di corto circuito naturale ha consentito di realizzare pareti in Invar 36 caratterizzate da una struttura prevalentemente cellulare, con crescita direzionale e continuità attraverso le interfacce tra gli strati. L'analisi XRD ha rilevato la sola fase γ nei due depositi. Le microdurezze medie, pari a 140,4 ± 4,5 HV0,1 per S e 133,5 ± 4,5 HV0,1 per V, risultano relativamente vicine, con dispersione analoga.

A parità di condizioni nominali di deposizione, i campioni hanno mostrato una diversa difettosità: la frazione areale di porosità è risultata pari all'1,734% per S e allo 0,567% per V, che ha inoltre presentato una minore frequenza di microcricche nelle regioni osservate.

Le prove di polarizzazione hanno evidenziato densità di corrente di corrosione inferiori sulla sezione XY e superiori sulla sezione XZ in entrambi i depositi. Durante l'immersione, l'EIS ha mostrato una diminuzione dell'impedenza a bassa frequenza, con variazioni più contenute nel Campione V tra 7 e 14 giorni. Questa diversa evoluzione, associata alla minore difettosità di V, suggerisce un possibile contributo della qualità metallurgica alla risposta elettrochimica. Il confronto evidenzia quindi l'utilità di affiancare alla caratterizzazione microstrutturale e alla microdurezza la valutazione dei difetti e del comportamento durante l'esposizione all'ambiente corrosivo.

BIBLIOGRAFIA

[1] McCain W.S., Maringer R.E., "Mechanical and Physical Properties of Invar and Invar-Type Alloys", DMIC Memorandum 207, Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, USA, 1965.

[2] Khanna N., Gandhi A., Nakum B., Srivastava A., "Optimization and analysis of surface roughness for INVAR-36 in end milling operations", Materials Today: Proceedings 5 (2018) 5281–5288. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.111

[3] Wu B., Pan Z., Ding D., Cuiuri D., Li H., Xu J., Norrish J., "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement", Journal of Manufacturing Processes 35 (2018) 127–139. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001.

[4] Veiga F., Suárez A., Artaza T., Aldalur E., "Effect of the Heat Input on Wire-Arc Additive Manufacturing of Invar 36 Alloy: Microstructure and Mechanical Properties", Welding in the World 66 (2022) 1081–1091. https://doi.org/10.1007/s40194-022-01295-4.

[5] Sood A., Schimmel J., Ferreira V.M., Bosman M., Goulas C., Popovich V., Hermans M.J.M., "Directed energy deposition of Invar 36 alloy using cold wire pulsed gas tungsten arc welding: Effect of heat input on the microstructure and functional behaviour", Journal of Materials Research and Technology 25 (2023) 6183–6197. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.280.

[6] Iturrioz A., Ukar E., Pereira J.C., "Influence of the manufacturing strategy on the microstructure and mechanical properties of Invar 36 alloy parts manufactured by CMT-WAAM", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 136 (2025) 729–744. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14853-5.

[7] Huang G., Peng X., Yang L., He Y., Liu C., Zhu J., Huang K., Liu Y., "Microstructure evolution and corrosion behavior of Invar 36 alloy additively manufactured via laser powder bed fusion", Materials Characterization 217 (2024) 114422. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114422.

Microstructure, Metallurgical Defects and Electrochemical Behavior of Invar 36 Produced by Gas Metal Arc Additive Manufacturing

The production of Invar 36 by Gas Metal Arc Additive Manufacturing (GMA-AM) requires a combined assessment of microstructure, metallurgical defects and corrosion behaviour. Two walls deposited using natural short-circuit transfer under identical nominal conditions were characterised by optical and scanning electron microscopy, X-ray diffraction, microhardness testing and porosity quantification. Both deposits exhibited a predominantly cellular structure, only the γ phase detectable by XRD and relatively similar mean microhardness values but differed in porosity and microcrack occurrence. Polarisation tests in 3.5 wt.% NaCl showed lower corrosion current densities on the XY section and higher values on the XZ section. During immersion, electrochemical impedance spectroscopy revealed smaller changes in low-frequency impedance between 7 and 14 days for the deposit with fewer defects. These findings suggest a possible contribution of defects to the evolution of the electrochemical response, despite similar microstructural features and mean microhardness values.

KEYWORDS: INVAR 36; ADDITIVE MANUFACTURING; GAS METAL ARC ADDITIVE MANUFACTURING; METALLURGICAL DEFECTS; MICROSTRUCTURE; CORROSION.

TORNA ALL'INDICE >