La Metallurgia Italiana
International Journal of the Italian Association for Metallurgy

DOI 10.36146/2026_10_25

Chemical milling assistito da microonde per la finitura superficiale di componenti in Ti6Al4V prodotti mediante L-PBF

E. Colombini, M. Cardu, J. Kureta, M. Merlin, P. Veronesi

Il presente lavoro analizza l'impiego del *chemical milling* assistito da microonde per migliorare la finitura superficiale di componenti in Ti6Al4V prodotti mediante Laser Powder Bed Fusion. Campioni cubici allo stato as-built sono stati trattati in soluzione di Kroll, confrontando il processo assistito da microonde con un trattamento chimico convenzionale condotto alla stessa temperatura e per il medesimo tempo di esposizione. L'efficacia dei trattamenti è stata valutata mediante misure gravimetriche e profilometria ottica. È stato inoltre sviluppato un modello numerico predittivo per analizzare la distribuzione del campo elettromagnetico e della densità di potenza dissipata. Rispetto al trattamento convenzionale, l'assistenza mediante microonde ha determinato una maggiore perdita di massa, pari al 10,43 ± 0,49% rispetto al 7,53 ± 1,26%, e un'ulteriore riduzione dei principali parametri di rugosità superficiale. In particolare, Sa, Sq e Sz sono diminuiti rispettivamente di circa l'11%, 10% e 6%. I risultati numerici mostrano una distribuzione non uniforme della potenza dissipata, con valori più elevati in prossimità degli spigoli e delle asperità del campione. Tale comportamento supporta l'ipotesi che l'intensificazione locale del campo elettrico, riconducibile al tip effect, favorisca la dissoluzione preferenziale dei picchi di rugosità. Il *chemical milling* assistito da microonde rappresenta quindi un approccio promettente per migliorare la finitura superficiale di componenti in Ti6Al4V prodotti mediante L-PBF, anche in presenza di geometrie difficilmente accessibili mediante trattamenti meccanici.

PAROLE CHIAVE: FINITURA SUPERFICIALE, RUGOSITÀ SUPERFICIALE, TI-6AL-4V, LASER POWDER BED FUSION (L-PBF).

INTRODUZIONE

Le leghe di titanio, in particolare la Ti6Al4V, sono ampiamente studiate nella fabbricazione additiva grazie alla bassa densità, elevata resistenza specifica, resistenza alla corrosione e biocompatibilità, che le rendono adatte ad applicazioni aerospaziali, biomedicali, meccanico e automobilisitico (Shafiee et al., 2023). Tra i processi AM, il Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) è una delle tecnologie più consolidate per la produzione di componenti in Ti6Al4V, permettendo la realizzazione di geometrie complesse, canali interni, pareti sottili e componenti near-net-shape difficilmente ottenibili con tecniche convenzionali (Dumbre et al., 2024).

Tuttavia, l'impiego diretto dei componenti in Ti6Al4V prodotti mediante L-PBF in applicazioni strutturali è ancora limitato dalla presenza di difetti legati al processo. Oltre a porosità e difetti di mancata fusione, tali componenti presentano generalmente un'elevata rugosità superfi-

Elena Colombini, Paolo Veronesi
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", via Vivarelli 10/1, Modena (MO)

Marco Cardu, Joana Kureta
Tetra Pak Packaging Solutions S.P.A.
Via Antonio Delfini 1, 41123 Modena MO

Mattia Merlin
Università di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Via Saragat 1, 44122, Ferrara - Italy

ciale, particelle di polvere parzialmente fuse o aderenti e irregolarità geometriche, che possono comprometterne le prestazioni meccaniche (Lu et al., 2023; Manco et al., 2024; Shafiee et al., 2023). Queste caratteristiche superficiali risultano particolarmente critiche in presenza di carichi ciclici, poiché favoriscono la concentrazione locale delle tensioni e possono agire come siti preferenziali per l'innesco delle cricche, riducendo la resistenza a fatica e l'affidabilità a lungo termine dei componenti (Murakami, 2002).

La scarsa qualità superficiale dei componenti prodotti mediante L-PBF è riconducibile a diversi fenomeni caratteristici del processo, tra cui lo *staircase effect*, dovuto alla costruzione strato per strato, le instabilità del bagno fuso, che possono determinare il *balling effect*, e la presenza di particelle di polvere non fuse o parzialmente fuse aderenti alla superficie (Gusarov et al., 2007; Kuntoğlu et al., 2023; Li et al., 2012). Il miglioramento dell'integrità superficiale rappresenta pertanto un requisito fondamentale per estendere l'impiego del Ti6Al4V prodotto mediante L-PBF ad applicazioni strutturali. A tale scopo sono state studiate numerose tecniche di post-processing, tra cui lavorazioni meccaniche e CNC, sabbiatura, shot peening, abrasive flow machining, lucidatura laser o a fascio elettronico e trattamenti chimici ed elettrochimici. Sebbene queste tecniche possano migliorare significativamente la qualità superficiale, la loro efficacia dipende dalla geometria del componente, dall'accessibilità delle superfici e dalla quantità di materiale che può essere rimossa senza compromettere l'accuratezza dimensionale. I trattamenti meccanici risultano spesso difficili da applicare a componenti caratterizzati da geometrie complesse, canali interni o superfici scarsamente accessibili, mentre le tecniche laser o a fascio elettronico richiedono generalmente un accesso diretto alla zona da trattare. In questo contesto, i processi chimici ed elettrochimici rappresentano alternative particolarmente promettenti, poiché agiscono mediante la dissoluzione controllata del materiale senza richiedere un contatto meccanico diretto e possono quindi raggiungere anche superfici interne o difficilmente accessibili (Lu et al., 2023; Manco et al., 2024). Sebbene i trattamenti termici e l'hot isostatic pressing possano migliorare le proprietà del materiale massivo e ridurre la presenza di difetti interni, non eliminano la necessità di trattamenti specifici per correggere le irregolarità superficiali e i difetti prossimi alla superficie (Manco et al., 2024; Moran et al., 2022). Il ricorso a trattamenti di finitura dedicati è particolarmente importante per i componenti sottoposti a carichi ciclici, poiché la risposta a fatica del Ti6Al4V prodotto mediante additive manufacturing è fortemente influenzata dalla rugosità e dalla presenza di difetti superficiali e subsuperficiali (Manco et al., 2024; Persenot, 2018). Tra i trattamenti chimici, le soluzioni a base di HF–HNO_3 sono ampiamente utilizzate per le leghe di titanio, in quanto consentono una rimozione controllata del materiale e una regolarizzazione della superficie anche in presenza di geometrie complesse; tuttavia, la composizione della soluzione e la durata del trattamento devono essere attentamente ottimizzate per evitare un'eccessiva asportazione di materiale, una dissoluzione non uniforme o una perdita di accuratezza dimensionale (Balyakin et al., 2018; Thenard, 2018). Balyakin et al. hanno studiato il trattamento chimico del Ti6Al4V prodotto mediante L-PBF utilizzando soluzioni HF–HNO_3 a differenti concentrazioni e hanno osservato che l'aggiunta di HNO_3 all'HF migliora l'azione di finitura, stabilizza la soluzione, limita la formazione di idrogeno e favorisce l'ottenimento di superfici più regolari; gli autori hanno inoltre evidenziato che la morfologia iniziale e la presenza di particelle parzialmente fuse influenzano l'efficacia locale dell'attacco, poiché l'accumulo dei prodotti di reazione nelle valli può ostacolare l'omogeneità del trattamento (Balyakin et al., 2018). Lu et al. hanno confrontato sabbiatura, lucidatura elettrolitica, lucidatura chimica e *abrasive flow polishing* su campioni in Ti6Al4V prodotti mediante L-PBF, mostrando che tutte le tecniche migliorano la qualità superficiale attraverso meccanismi differenti e che i processi chimici e a flusso abrasivo possono risultare particolarmente adatti al trattamento di superfici difficilmente accessibili (Lu et al., 2023). Risultati ottenuti su componenti in Ti6Al4V prodotti mediante EBM hanno inoltre mostrato che il trattamento chimico può ridurre la profondità e l'acutezza dei difetti superficiali, migliorando la resistenza a fatica; tuttavia, un'asportazione eccessiva può esporre difetti interni e trasformarli in nuovi siti di innesco delle cricche, evidenziando la necessità di ottimizzare accuratamente la durata e l'intensità del trattamento (Persenot, 2018; Manco et al., 2024). Nonostante i risultati promet-

tenti ottenuti mediante i processi chimici convenzionali, l'impiego delle microonde per intensificare e controllare il *chemical milling* del Ti6Al4V prodotto mediante L-PBF rimane ancora scarsamente esplorato.

MATERIALI E METODI

Nel presente studio sono stati realizzati campioni cubici di Ti6Al4V di dimensioni 10 × 10 × 10 mm mediante Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), utilizzando polvere commerciale Ti-6Al-4V ELI (EOS GmbH Electro Optical Systems) e sistema EOS M290. La polvere presenta una granulometria D90 compresa tra 48 e 51 μm. I principali parametri di processo sono una potenza laser di 340 W, una velocità di scansione di 1250 mm/s, un diametro dello spot laser di 80 μm e uno spessore dello strato di 50 μm. I campioni sono stati analizzati in due differenti condizioni superficiali iniziali, as-built e sabbiata, per valutare l'influenza della finitura iniziale sull'efficacia del successivo trattamento chimico. Il confronto gravimetrico tra il processo convenzionale e quello assistito da microonde è stato condotto sui campioni as-built, le cui masse iniziali erano comprese tra 4,47 ± 0,01 g e 4,52 ± 0,01 g. La caratterizzazione profilometrica ha incluso anche i campioni sabbiati al fine di valutare l'effetto della finitura iniziale. I trattamenti sono stati eseguiti in soluzione di Kroll, preparata con rapporto volumetrico rapporto volumetrico H_2O/ HF/HNO_3 pari a 100:2:6. Per ciascun campione sono stati utilizzati 30 ml di soluzione. In entrambe le configurazioni sono stati effettuati cinque cicli consecutivi da 3 min, per un tempo totale di esposizione pari a 15 min. Al termine di ogni ciclo, i campioni sono stati rimossi dalla soluzione, asciugati e pesati, così da valutare la perdita di massa incrementale e complessiva. Per ciascun campione sono stati impiegati 30 mL di soluzione, contenuti in un becher da 50 mL. Sia per il processo convenzionale sia per quello assistito da microonde sono stati effettuati cinque cicli consecutivi della durata di 3 min ciascuno, per un tempo complessivo di esposizione pari a 15 min. Al termine di ogni ciclo, i campioni sono stati estratti dalla soluzione, asciugati e pesati mediante una bilancia analitica MARK 120A (BEL Engineering Srl), in modo da determinare la perdita di massa incrementale e complessiva. Nel trattamento convenzionale, la soluzione è stata mantenuta a una temperatura di circa 50°C mediante una piastra riscaldante ARE F20500162 (Velp Scientifica Srl). Per il trattamento assistito da microonde, il becher è stato collocato all'interno di un applicatore prismatico a sezione esagonale, avente lato pari a 104 mm e altezza di 600 mm, alimentato mediante una guida d'onda WR340. Il sistema era collegato a un generatore a stato solido Leanfa LEANGEN-2450M-250-E, operante alla frequenza di 2.45 GHz. La potenza incidente è stata inizialmente impostata a 150 W fino al raggiungimento della temperatura target di 50 °C, monitorata mediante un pirometro ottico IKS-T14-09 (Sitel Control Srl). Dopo l'immersione del campione, la potenza incidente è stata ridotta e mantenuta a 80 W, mentre la potenza riflessa è rimasta compresa tra 1 e 3 W. La configurazione sperimentale del sistema è mostrata in figura 1.

Fig.1 - Configurazione sperimentale del sistema di chemical milling assistito da microonde / *Experimental setup for the microwave-assisted chemical milling system.*

Al termine dei trattamenti, la topografia superficiale dei campioni è stata analizzata mediante profilometria ottica a luce strutturata, in accordo con la norma ISO 25178, utilizzando un sistema ConfoCam installato su un microscopio Nikon Eclipse LV150N. Dalle superfici acquisite sono stati determinati i parametri di rugosità areale Sa, Sq, Sz, Sp e Sv. Per supportare l'interpretazione dei risultati sperimentali, è stato sviluppato un modello numerico mediante COMSOL Multiphysics® 3.3a, riproducendo la configurazione reale del sistema di *chemical milling* assistito da microonde. Il modello comprende la cavità esagonale, la guida d'onda WR340 con sezione pari a 86 × 43 mm, il becher, la soluzione di attacco e il campione in Ti6Al4V. Le asperità tipiche della superficie prodotta mediante additive manufacturing sono state rappresentate mediante creste geometriche idealizzate, di altezza pari a 0,25 mm, disposte sui quattro lati del campione. La geometria del modello è riportata in figura 2. Il dominio tridimensionale è stato discretizzato mediante una mesh costituita da 3.483.089 elementi, corrispondenti a 2.428.884 gradi di libertà. La soluzione numerica è stata ottenuta mediante il solver diretto PARDISO, adottando una procedura di *adaptive mesh refinement* per migliorare la discretizzazione in prossimità delle asperità e degli spigoli del campione. Le simulazioni sono state eseguite considerando due orientamenti del campione: una configurazione di riferimento, corrispondente a quella mostrata in figura 2, e una seconda configurazione ottenuta mediante una rotazione di 90° rispetto asse xz. Il confronto è stato utilizzato per valutare l'influenza dell'orientamento del campione sulla distribuzione del campo elettromagnetico e sulla localizzazione della densità di potenza dissipata in prossimità delle asperità superficiali.

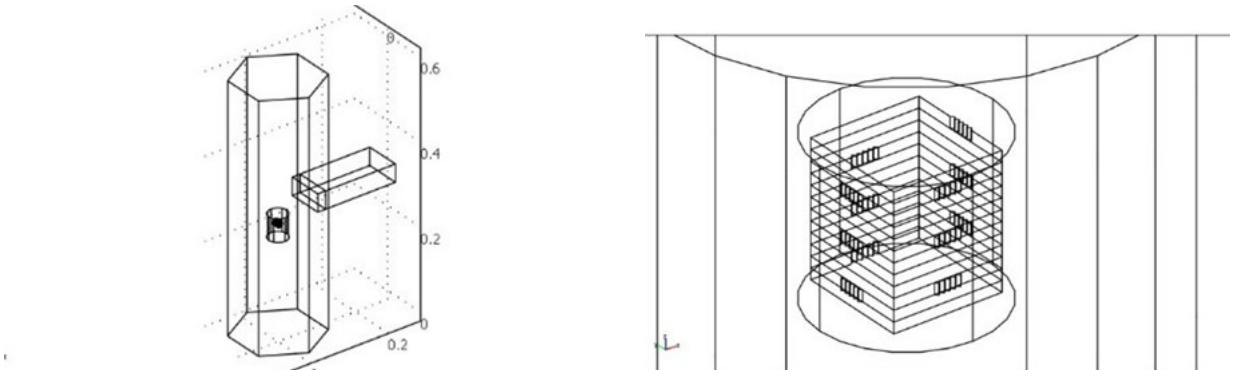

Fig.2 - Modello CAD del sistema per *microwave chemical milling*: cavità esagonale accoppiata alla guida d'onda WR340; dettaglio della schematizzazione della rugosità superficiale del cubetto prodotto mediante manifattura adittiva / *CAD model of the microwave chemical milling system: hexagonal cavity coupled to the WR340 waveguide; detailed schematic of the surface roughness of the cube produced via additive manufacturing.*

RISULTATI

In figura 3 sono riportati i profili della densità volumetrica di potenza dissipata per riscaldamento resistivo, (Qav [W7m]) estratti dal modello numerico lungo le asperità superficiali e rappresentati in funzione della coordinata curvilinea. Nella configurazione di riferimento si osserva una marcata differenza tra i valori calcolati lungo le due direzioni considerate: un profilo presenta valori dell'ordine di 10^5 W/m³, mentre l'altro si mantiene su valori inferiori di oltre un ordine di grandezza. La rotazione del campione di 90° modifica sia l'andamento sia l'intensità dei profili: nella prima parte del percorso i valori risultano dello stesso ordine di grandezza, mentre successivamente uno dei due profili diminuisce progressivamente e l'altro si mantiene su valori più elevati. I risultati evidenziano pertanto che la potenza dissipata nella soluzione non è distribuita uniformemente attorno al campione, ma dipende dall'orientamento delle asperità rispetto al campo elettromagnetico.

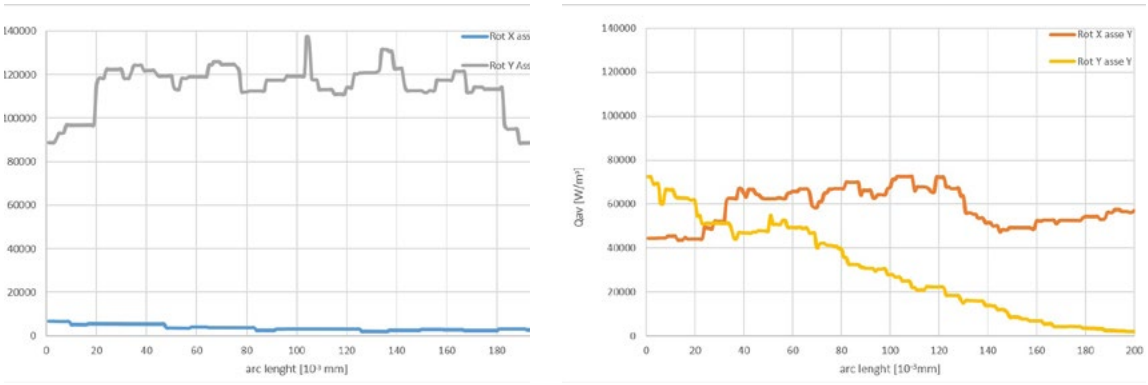

Fig.3 - Variazione della densità di potenza di riscaldamento resistivo, nella soluzione, estratti lungo le asperità superficiali in funzione della coordinata curvilinea: (a) configurazione di riferimento; (b) configurazione con il campione ruotato di 90°. Le curve rappresentano i valori calcolati lungo le due direzioni considerate / *Variation in the resistive heating power density in the solution, extracted along surface asperities as a function of the curvilinear coordinate: (a) reference configuration; (b) configuration with the sample rotated by 90°. The curves represent the calculated values along the two directions considered.*

Le mappe numeriche riportate in figura 4 consentono invece di visualizzare la distribuzione spaziale del campo elettromagnetico e della potenza associata al riscaldamento resistivo all'interno della configurazione simulata. In particolare, il confronto tra la configurazione base e quella ruotata mostra che la distribuzione del campo non è omogenea e che le zone a maggiore intensità risultano localizzate in prossimità del campione e, più specificamente, in corrispondenza delle asperità e degli spigoli del cubetto.

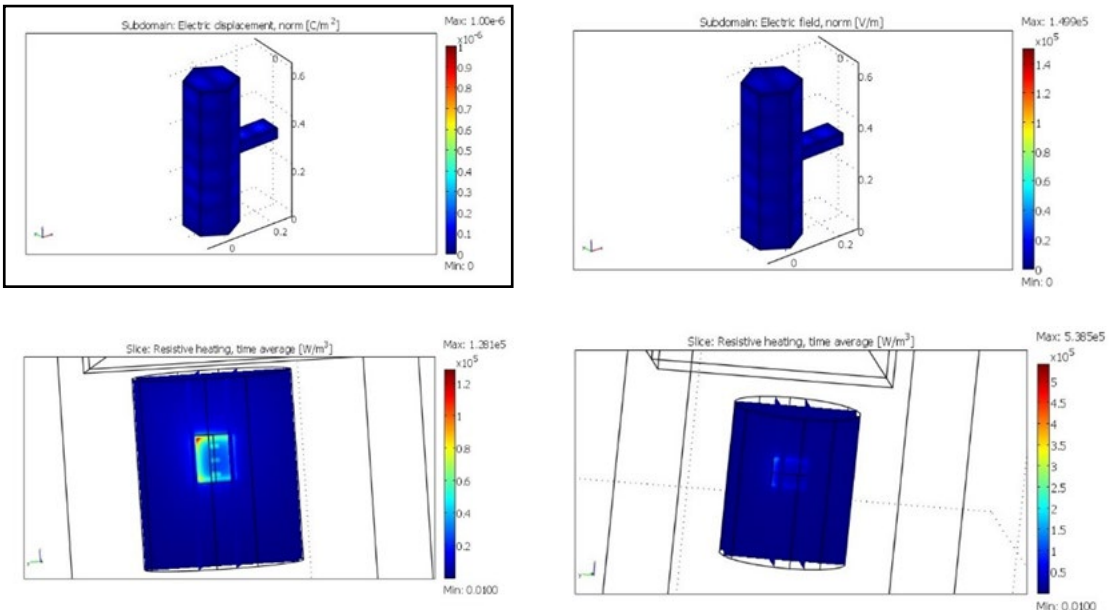

Fig.4 - Distribuzioni numeriche della norma del campo elettrico nella configurazione di riferimento (a) e nella configurazione con il campione ruotato di 90° (b); distribuzioni della densità volumetrica di potenza dissipata per riscaldamento resistivo nella soluzione in prossimità del campione, rispettivamente nella configurazione di riferimento (c) e nella configurazione ruotata (d) / *Numerical distributions of the electric field norm in the reference configuration (a) and in the configuration with the sample rotated by 90° (b); distributions of the volumetric power density dissipated due to resistive heating in the solution near the sample, in the reference configuration (c) and in the rotated configuration (d), respectively.*

Le mappe numeriche riportate in figura 4 mostrano la distribuzione spaziale del campo elettrico e della densità volumetrica di potenza dissipata per riscaldamento resistivo nella configurazione simulata. In entrambe le orientazioni, la distribuzione delle grandezze considerate risulta non uniforme, con variazioni locali in prossimità del campione e delle discontinuità geometriche rappresentate dalle asperità e dagli spigoli. La rotazione del campione di 90° modifica la posizione e l'intensità delle zone caratterizzate da maggiore dissipazione di potenza, evidenziando che l'interazione tra il campo elettromagnetico e la superficie dipende dall'orientamento delle asperità. Questi risultati sono coerenti con gli andamenti mostrati in figura 3 e confermano la necessità di considerare la distribuzione locale del campo nell'interpretazione del trattamento assistito da microonde. L'analisi gravimetrica ha evidenziato una progressiva asportazione di materiale durante entrambi i trattamenti. Al termine dei cinque cicli, corrispondenti a un tempo complessivo di esposizione di 15 min, la perdita di massa è risultata pari al 7,53 ± 1,26% per il *chemical milling* convenzionale e al 10,43 ± 0,49% per il trattamento assistito da microonde. A parità di durata del trattamento e di temperatura media della soluzione, l'assistenza mediante microonde ha quindi determinato una maggiore asportazione complessiva di materiale. In figura 5 sono riportate mappe topografiche rappresentative delle superfici superiore e laterale dei campioni, analizzati nelle condizioni iniziali as-built e sabbiata e dopo i trattamenti di *chemical milling* convenzionale e assistito da microonde. Rispetto alle condizioni iniziali, entrambi i trattamenti determinano una riduzione delle asperità superficiali. I campioni sottoposti al processo assistito da microonde mostrano una topografia generalmente più regolare e una minore presenza di picchi pronunciati rispetto a quelli trattati mediante il processo convenzionale. Tale osservazione qualitativa è approfondita mediante il confronto dei parametri di rugosità riportato in figura 6.

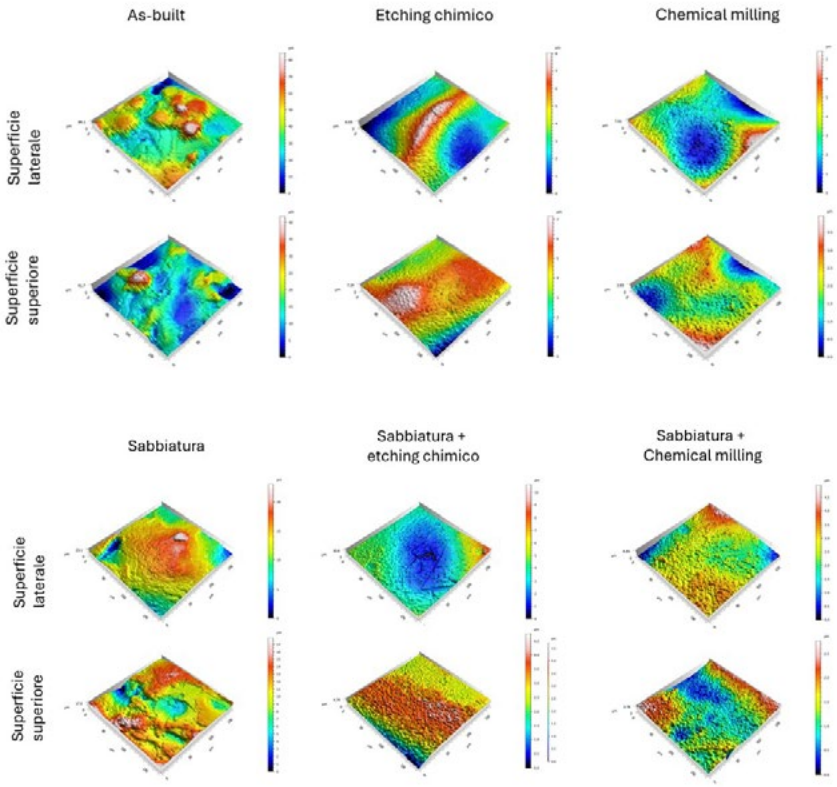

Fig.5 - Mappe topografiche delle superfici dei campioni in Ti6Al4V nelle condizioni as-built, con sabbiatura, dopo trattamento di *chemical milling* convenzionale (CP) e dopo trattamento di chemical milling assistito da microonde (MW-CP) / *Topographic maps of the surfaces of Ti6Al4V samples in their as-built state, after sandblasting, after conventional chemical milling (CP), and after microwave-assisted chemical milling.*

Il confronto dei parametri di rugosità riportati in figura 6 mostra che entrambi i trattamenti chimici determinano una marcata riduzione di Sa, Sq e Sz rispetto alle corrispondenti condizioni iniziali, sia per la superficie superiore sia per quella laterale. Nel confronto complessivo tra i due processi, il trattamento assistito da microonde produce valori medi di Sa, Sq e Sz inferiori rispettivamente di circa l'11%, il 10% e il 6% rispetto al chemical milling convenzionale, condotto alla stessa temperatura media della soluzione. L'entità del miglioramento dipende tuttavia dalla superficie analizzata e dalla condizione iniziale del campione, con differenze più evidenti per Sa e Sq e una maggiore variabilità nel comportamento di Sz.

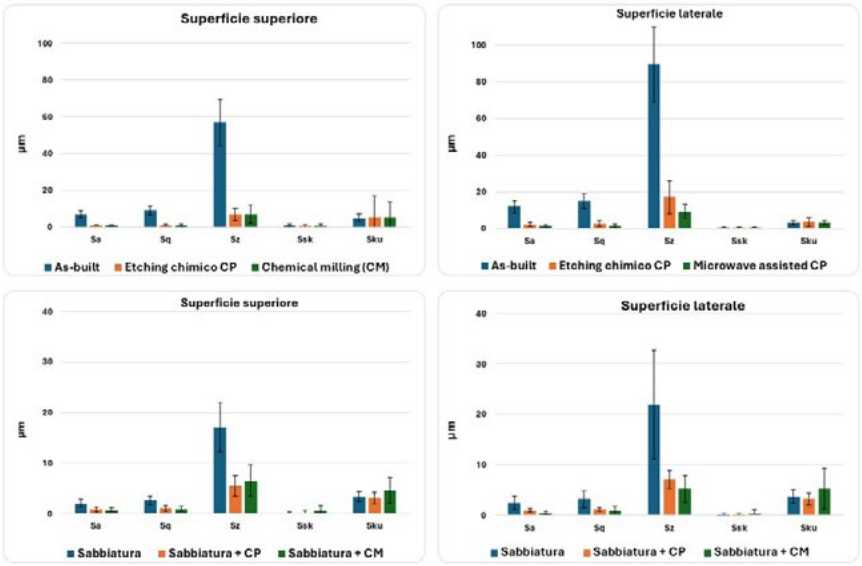

Fig.6 - Effetto del *chemical milling* convenzionale e del *chemical milling* assistito da microonde sui parametri di rugosità areale Sa, Sq, Sz, Ssk e Sku delle superfici superiore e laterale dei campioni in Ti6Al4V, considerando le condizioni iniziali as-built e sabbiata. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard / *Effect of conventional chemical milling and microwave-assisted chemical milling on the areal roughness parameters Sa, Sq, Sz, Ssk, and Sku of the top and side surfaces of Ti6Al4V specimens, considering the as-built and sandblasted initial conditions. The error bars represent the standard deviation.*

Nel complesso, il *chemical milling* assistito da microonde determina una maggiore asportazione di materiale e una più marcata riduzione dei principali parametri di ampiezza della rugosità rispetto al trattamento convenzionale condotto alla stessa temperatura media della soluzione. La perdita di massa passa infatti dal 7,53 ± 1,26% per il processo convenzionale al 10,43 ± 0,49% per quello assistito da microonde, mentre Sa, Sq e Sz presentano una diminuzione aggiuntiva rispettivamente di circa l'11%, il 10% e il 6%. Le mappe topografiche suggeriscono inoltre una riduzione dei picchi superficiali più pronunciati, sebbene l'entità dell'effetto dipenda dalla superficie analizzata e dalla condizione iniziale del campione. Tale comportamento risulta coerente con le simulazioni numeriche, che mostrano una distribuzione non uniforme del campo elettrico e della densità di potenza dissipata nella soluzione, influenzata dall'orientamento del campione e dalla presenza di spigoli e asperità. In corrispondenza di queste discontinuità geometriche, caratterizzate da un ridotto raggio di curvatura, può verificarsi un'intensificazione locale del campo elettrico riconducibile al *tip effect*.

L'accordo tra i risultati profilometrici, gravimetrici e numerici supporta pertanto l'ipotesi che, oltre al riscaldamento complessivo della soluzione, fenomeni locali di intensificazione del campo e della potenza dissipata possano contribuire alla maggiore efficacia del trattamento assistito da microonde.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato l'effetto del chemical milling assistito da microonde sulla finitura superficiale di campioni in Ti6Al4V prodotti mediante L-PBF, confrontandolo con un trattamento chimico convenzionale condotto alla stessa temperatura media della soluzione e per il medesimo tempo di esposizione. L'assistenza mediante microonde ha determinato una maggiore asportazione di materiale, con una perdita di massa complessiva pari al 10,43 ± 0,49%, rispetto al 7,53 ± 1,26% ottenuto mediante il processo convenzionale. È stata inoltre osservata un'ulteriore riduzione dei parametri Sa, Sq e Sz, rispettivamente di circa l'11%, il 10% e il 6%, sebbene l'entità del miglioramento dipenda dalla superficie analizzata e dalla condizione iniziale del campione. Le simulazioni numeriche hanno evidenziato una distribuzione non uniforme del campo elettrico e della densità di potenza dissipata nella soluzione, influenzata dall'orientamento del campione e dalla presenza di spigoli e asperità. La localizzazione di valori più elevati in prossimità delle discontinuità geometriche è compatibile con un'intensificazione locale del campo riconducibile al *tip effect*. Nel complesso, i risultati suggeriscono che la maggiore efficacia del *chemical milling* assistito da microonde non dipenda esclusivamente dal riscaldamento complessivo della soluzione, ma possa essere favorita anche da fenomeni locali di interazione tra il campo elettrico, la soluzione e la superficie metallica. Il processo appare quindi promettente per il miglioramento della finitura superficiale dei componenti in Ti6Al4V prodotti mediante L-PBF; ulteriori studi saranno tuttavia necessari per valutarne l'efficacia a parità di materiale rimosso e verificarne l'applicabilità a geometrie più complesse.

BIBLIOGRAFIA

[1] Balyakin A.V., Shvetcov A.N., Zhuchenko E.I., "Chemical polishing of samples obtained by selective laser melting from titanium alloy Ti6Al4V", MATEC Web of Conferences, vol. 224, EDP Sciences; 2018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401031.

[2] Gusarov A.V., Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I., "Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting", Appl. Surf. Sci., 2007;254:975–9. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.074.

[3] Kuntoğlu M., Salur E., Canli E., Aslan A., Gupta M.K., Waqar S. et al., "A state of the art on surface morphology of selective laser-melted metallic alloys", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2023;127:1103–42. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11534-7.

[4] Li R., Liu J., Shi Y., Wang L., Jiang W., "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2012;59:1025–35. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3566-1.

[5] Lu D., Liu Z., Wei X., Chen C., Wang D., "Effect of post-processing methods on the surface quality of Ti6Al4V fabricated by laser powder bed fusion", Front. Mater. 2023;10. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1126749.

[6] Manco E., Scherillo F., Franchitti S., Borrelli R., "Improving Surface Quality and Fatigue Life of Electron Beam Melted Ti6Al4V by Chemical Machining", J. Mater. Eng. Perform. 2024;33:2552–61. https://doi.org/10.1007/s11665-023-08865-7.

[7] Moran T.P., Carrion P.E., Lee S., Shamsaei N., Phan N., Warner D.H., "Hot Isostatic Pressing for Fatigue Critical Additively Manufactured Ti-6Al-4V", Materials 2022;15. https://doi.org/10.3390/ma15062051.

[8] Murakami Y., Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions, Elsevier Science, 2002.

[9] Persenot T., Fatigue of Ti-6Al-4V thin parts made by Electron Beam Melting, Université de Lyon, 2018.

[10] Shafiee A., Ghasemi-Nanesa H., Habibnejad-Korayem M., Bocher P., "Alternative Reagent for Revealing the Entire Microstructure of Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy", Metallography, Microstructure, and Analysis 2023;12:1047–54. https://doi.org/10.1007/s13632-023-01016-3.

[11] Thenard T., Influence de la rugosité de surfaces Ti-6Al-4V obtenues par fabrication additive SLM sur l'ostéointégration: Évaluation in vitro et in silico, HESAM Université, 2018.

La Metallurgia Italiana
International Journal of the Italian Association for Metallurgy

Microwave-assisted chemical milling for the surface finishing of L-PBF Ti6Al4V components

This study investigates the use of microwave-assisted chemical milling to improve the surface finish of Ti6Al4V components produced by Laser Powder Bed Fusion. As-built cubic samples were treated in Kroll's solution, comparing the microwave-assisted process with conventional chemical milling performed at the same average solution temperature and for the same exposure time. Treatment effectiveness was evaluated through gravimetric measurements and optical profilometry. A numerical model of the entire experimental system was also developed to analyze the distributions of the electromagnetic field and the power density dissipated. Compared with the conventional treatment, microwave assistance resulted in greater mass loss, amounting to 10.43 ± 0.49% versus 7.53 ± 1.26%, as well as a further reduction in the main surface roughness parameters. In particular, Sa, Sq, and Sz decreased by approximately 11%, 10%, and 6%, respectively. The numerical results show a non-uniform distribution of the dissipated power density, with higher values near the edges and surface asperities of the sample. This behaviour supports the hypothesis that local electric-field intensification, attributable to the tip effect, promotes the preferential dissolution of roughness peaks. Microwave-assisted chemical milling therefore represents a promising approach for improving the surface finish of L-PBF Ti6Al4V components and may be particularly suitable for components with geometries that are difficult to access using mechanical finishing processes.

KEYWORDS: SURFACE FINISHING; SURFACE ROUGHNESS; TI-6AL-4V; LASER POWDER BED FUSION (L-PBF).

TORNA ALL'INDICE >