Rivestimenti via Electrospark Deposition in lega A357: microstruttura e difettosità

P. Leo, G. Renna

L'ElectroSpark Deposition (ESD) è un processo di microsaldatura ad arco pulsato che utilizza impulsi elettrici di breve durata, generati dalla scarica di un condensatore, per trasferire il materiale di un elettrodo consumabile ad un substrato metallico. In questo studio sono stati caratterizzati, dal punto di vista microstrutturale e meccanico, rivestimenti in lega d'alluminio A357 realizzati su substrato omologo mediante ESD. In particolare, per realizzare i diversi rivestimenti in lega di alluminio, si sono utilizzate potenze di scarica variabili tra 33 e 438 W. I rivestimenti prodotti mediante il processo ESD sono stati analizzati con indagini in microscopia ottica ed elettronica a scansione. Essi sono di tipo strato su strato (layer by layer), componendosi di diversi strati sovrapposti. La microstruttura di ciascun strato, indipendente dagli specifici parametri di deposizione, esibisce una scala molto fine a causa delle elevate velocità di raffreddamento coinvolte nel processo. In particolare, all'interno del singolo strato si è osservata la presenza di dendriti prevalentemente colonnari accompagnata da evidente segregazione interdendritica. La durezza media dei rivestimenti non cambia in maniera significativa al variare dei parametri di processo considerati. I rivestimenti presentano difettosità diffusa quali vuoti di forma sferica, casuale e laminare. Per tutte le condizioni di deposizione la difettosità percentuale dei rivestimenti (area vuoti/area rivestimento) è inferiore all'8% e risulta prevalentemente distribuita in difettosità di tipo laminare. Tali difetti sono infatti molti più estesi di quelli sferici indipendentemente dai parametri di processo. La loro numerosità percentuale si riduce alle alte potenze di deposizione.

PAROLE CHIAVE: ELECTROSPARK - RIVESTIMENTI - MICROSTRUTTURA - DIFETTOSITÀ

Introduzione

L'esigenza di utilizzare componenti con migliorate caratteristiche superficiali in relazione a severe condizioni di esercizio insieme a quella di ridurre i costi legati alla sostituzione di componenti danneggiati ha portato ad un crescente utilizzo dei processi di rivestimento e di riparazione. I più diffusi processi di deposizione (per esempio da fase vapore o a spruzzo) sono in genere caratterizzati da costi elevati delle apparecchiature e, talvolta, da lunghi tempi di deposizione [1]. Inoltre alcune tecnologie di riparazione caratterizzate da elevato apporto termico come ad esempio la saldatura TIG (Tungsten Inert Gas), PTA (Plasma Transferred Arc), EBW (Electron Beam Welding) e il Laser Cladding [2], non sono idonee a riparare leghe ampiamente usate in applicazioni aerospaziali (ad esempio le leghe di alluminio trattabili termicamente) poiché ne degradano le caratteristiche meccaniche [3, 4, 5]. Nell'ultimo decennio è stata quindi individuata una nuova tecnologia, idonea sia alla realizzazione di rivestimenti che alla riparazione di componenti, in grado di superare i limiti precedentemente esposti essendo caratterizzata da costi limitati dell'apparecchiatura e basso apporto termico di processo: l'ElectroSpark Deposition (ESD) [1, 6-12]. L'ESD è un processo di microsaldatura ad arco pulsato che utilizza impulsi elettrici di breve durata (1-10 μs) generati dalla scarica di un condensatore, per saldare il materiale di un elettrodo rotante (vibrante/oscillante) al substrato [13]. Quando l'energia del condensatore viene rilasciata, l'impulso di corrente elettrica genera un arco al plasma tra la punta dell'elettrodo ed il substrato, avente una temperatura massima che si aggira tra i 5000 ed i 25000 K in funzione della natura del gas di protezione adoperato e dalla corrente condotta dal plasma [14]. L'arco

Paola Leo, Gilda Renna
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione,
Università del Salento, Via per Arnesano,
Lecce 73100, Italy

al plasma fonde il materiale di substrato ed elettrodo. Una piccola quantità di materiale fuso dell'elettrodo è quindi accelerata verso il substrato producendo un riporto con una forte adesione [9]. Basandosi su impulsi elettrici di breve durata, l'apporto termico al substrato è talmente basso che le temperature medie raggiunte dallo stesso sono in genere inferiori agli 80°C [6, 14]. Grazie al basso input di calore, il processo non produce rilevanti distorsioni, ritiri, stress termici interni e soprattutto elimina [11, 12, 15, 16] o riduce a pochi micrometri [17] la zona termicamente alterata (fortemente indesiderata). Pertanto l'ESD risulta particolarmente idoneo al trattamento di substrati metallici sottili o anche sensibili al calore (ad es. leghe di alluminio della serie 2000) [11-16]. Inoltre, le elevate velocità di raffreddamento coinvolte determinano l'ottenimento di una microstruttura particolarmente fine [9, 18]. L'apparecchiatura si compone di un generatore di potenza che consente di impostare i parametri di deposizione e un porta-elettrodo. È leggera, di dimensioni ridotte e si presta ad essere movimentata con facilità garantendo la possibilità di eseguire interventi in loco senza necessità di smontare il componente [19, 20]. Il processo di deposizione può essere manuale o automatizzato.
I depositi realizzati mediante ESD non sono ovviamente esenti da difettosità: i gradienti di temperatura generano l'innesco e l'espansione di cricche interne al deposito. A questi difetti laminari si aggiunge la presenza di difetti sferici, dovuti in gran parte a intrappolamento di gas e a vuoti formati tra punti di deposito adiacenti. Occorrono inoltre difetti a geometria casuale come, ad esempio, i tipici difetti a ponte generati dall'unione di difetti sferici e cricche [8, 11, 12].
La lega di alluminio A357, basata sul sistema Al-Si-Mg, è una lega da fonderia che ha un contenuto di Si di circa 7 wt. % e livelli tipici di Mg di ~0,7 wt. %. Tale lega viene generalmente formata attraverso il processo di colata in sabbia o conchiglia e mediante thixo colata. Le proprietà di questa lega dipendono fortemente dalla distribuzione degli elementi di lega Mg e Si nella matrice e dei precipitati di seconda fase Mg_2Si. È ampiamente utilizzata in campo aerospaziale e dei trasporti grazie all'eccellente colabilità, resistenza alla corrosione ma soprattutto all'elevato rapporto resistenza/peso che la caratterizza e che è ulteriormente migliorabile mediante trattamento termico [21]. In particolare, in ambito automobilistico ha trovato nel corso degli anni svariati impieghi per la produzione di componenti motore come basamenti e teste, collettori d'aspirazione, pinze freno, scatole per la trasmissione, elementi di sospensione e cerchi. Mentre in ambito aerospaziale sono stati realizzati supporti motore negli aerei da combattimento e alettoni. Sfortunatamente, tali componenti sono continuamente sottoposti a danneggiamento durante la loro vita in esercizio (come ad esempio graffi, intagli, tacche, ammaccature, cricche e corrosione) e ad elevata usura. Se fornita nello stato T6 (solubilizzazione e invecchiamento al picco), la lega A357 non è adatta ad essere impiegata in applicazioni o processi che richiedono elevate temperature perché suscettibile di addolcimento da sovrainvecchiamento [23-25]. La riparazione di questa lega mediante tecniche di fusione ad elevato apporto termico è inoltre ostacolata dalla forte tendenza alla formazione di porosità indotte dall'evoluzione di gas durante la solidificazione [26].
Gli indiscutibili vantaggi dell'utilizzo della tecnica ESD per realizzare rivestimenti e riparazioni anche in relazione alle specifiche proprietà e applicazioni della lega A357 hanno motivato l'interesse per questo lavoro in cui sono stati caratterizzati rivestimenti in lega A357 depositati, mediante ESD, su substrato omologo. In particolare è stata investigata la microstruttura e l'effetto dell'utilizzo di potenze crescenti sull'occorrenza di vuoti all'interno dei rivestimenti e sulla loro morfologia.

Materiali e metodi

La macchina ESD utilizzata per realizzare le diverse deposizioni è la "TechnoCoat Micro Depo Model 150". I rivestimenti sono stati eseguiti manualmente a temperatura ambiente su substrato in lega A357-T61. Tale lega, colata in sabbia, è stata sottoposta ad un trattamento termico di solubilizzazione (540°C per 18h, seguito da un raffreddamento in acqua a 20-30°C) ed invecchiamento (200°C per 7h seguito da un raffreddamento in aria). La composizione chimica della lega A357 è riportata in Tabella 1. L'elettrodo consumabile utilizzato, di materiale omologo al substrato, ha diametro pari a 2.3 mm.
Ciascun rivestimento è stato realizzato movimentando l'elettrodo lungo una stessa linea ed effettuando 50 passate consecutive. Il substrato è stato levigato con carta in SiC 800 grit prima della deposizione. Durante le deposizioni, la velocità di rotazione dell'elettrodo è stata mantenuta costante e pari a 1200 rpm. Tutte le deposizioni sono state realizzate in presenza di un flusso di Argon costante e pari a 17 L/min.
Sono state realizzate otto deposizioni (Tabella 2) a potenza crescente, variando l'energia di scarica del condensatore (Es = 1/2 CV^2) [11] e la frequenza di scarica su quattro livelli. La potenza di scarica del processo è stata calcolata come:

$$P_S = \frac{1}{2} C V^2 f$$

dove *V* è la tensione di carica del condensatore in Volt (V), C è la capacità in microFarad (μF) e f è la frequenza di scarica del condensatore in hertz (Hz). La designazione dei depositi in Tabella 2, con pedice crescente da s1 a s8, identifica livelli di potenza crescenti.
I campioni ottenuti sono stati tagliati ortogonalmente alla direzione di avanzamento dell'elettrodo, inglobati e preparati per l'osservazione metallografica. Le sezioni trasversali sono state attaccate usando il reagente Keller (95 mL H2O, 2.5 mL HNO_3, 1.5 mL HCl, 1 mL HF).

L'indagine microstrutturale è stata condotta al microscopio ottico (Nikon Model Epiphot 200) e al microscopio elettronico a scansione (Zeiss Evo) dotato di spettrometro a dispersione di energia (EDS). Per caratterizzare sia la morfologia del rivestimento che le difettosità presenti, si è utilizzato il software per l'analisi dell'immagine NIS Element AR, in dotazione al microscopio ottico. In particolare è stata eseguita un'analisi dei vuoti (difetti) presenti nella sezione trasversale dei depositi, in termini di morfologia e dimensione. La dimensione dei vuoti è stata identificata dal perimetro, diametro equivalente e area. In particolare, il diametro equivalente scelto nell'analisi stereologica dei difetti è il diametro di Feret. Il diametro di Feret è definito come la distanza massima tra le due parallele tangenti al perimetro del difetto. Mentre la morfologia dei vuoti è stata identificata dal fattore di circolarità anche detto fattore di forma (FF) e calcolato come:

$$FF = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Dove P è il perimetro e A è l'area del difetto. Così per un cerchio perfetto (difetto sferico), il fattore di forma sarà uno, mentre per il difetto fortemente allungato e quindi laminare il FF sarà molto vicino allo zero. Sulla base del fattore di forma i difetti individuati sono stati distinti nelle tre seguenti classi:

- Difetti laminari o cricche: $0 < FF \leq 0,4$
- Difetti a geometria casuale: $0,4 < FF \leq 0,7$
- Difetti sferici: $0,7 < FF \leq 1$

La microdurezza è stata misurata nella sezione trasversale dei depositi con un durometro Vickers applicando un carico pari a 300 gr per un tempo di indentazione di 15 s ($HV_{0.3/15}$). In particolare è stata valutata la microdurezza a 100 µm dall'interfaccia substrato/deposito sia nel deposito che nel materiale base, mediante sei indentazioni effettuate a distanza di 100 µm le une dalle altre. Le prove sono state eseguite in accordo con la normativa di riferimento (ASTM E-384).
Lo spessore medio di ciascun rivestimento è stato valutato effettuando una media di cinque misure prese rispettivamente al centro dell'interfaccia substrato deposito e a ± 250 µm e ± 500 µm dallo stesso.

Tab.1 - Composizione chimica (wt %) della lega A357 / Chemical composition of the A357 aluminium alloy (wt.%).

	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Ti	Fe	altri	Al
A357	< 0.05	6.5 - 7.5	< 0.03	0.45-0.6	0.05	< 0.2	< 0.15	< 0.15	Bal.

Tab.2 - Piano sperimentale (Ar = 17 L/min) / Experimental plan (Ar = 17 L/min).

Campione	Tensione [V]	Capacità [µF]	Frequenza [Hz]	Energia [J]	Potenza [W]
s1	100	100	66	0,50	33,0
s2	100	100	90	0,50	45,0
s3	100	150	66	0,75	49,5
s4	100	150	90	0,75	67,5
s5	150	20	390	0,22	87,7
s6	100	100	280	0,50	140,0
s7	100	150	280	0,75	210,0
s8	150	100	390	1,12	438,7

Risultati e discussione

Microstruttura del Materiale Base

La microstruttura della lega A357-T61 (Al-7Si-0,7Mg) è mostrata in Fig. 1. La sigla T61 indica che la lega è fornita nello stato invecchiato al picco dopo solubilizzazione. La lega di composizione ipoeutettica è composta da dendriti di α-alluminio separate da eutettico (Fig. 1a). L'eutettico è costituito da particelle di silicio sferoidizzate dalla fase di solubilizzazione [27] (di colore grigio scuro in Fig. 1b) e da composti intermetallici ricchi di Fe (aciculari, di colore grigio chiaro) (Fig. 1b). Sulla base dello stato dell'arte [27], il ferro risulta combinato in composti ternari con Al e Si o binari Fe-Al mentre il Mg è in genere presente sotto forma di particelle indissolte Mg_2Al_3 e di particelle Mg_2Si (derivanti dalla fase di invecchiamento artificiale della lega). La microdurezza della lega è pari a 106 ± 1 $HV_{0,3/15}$.

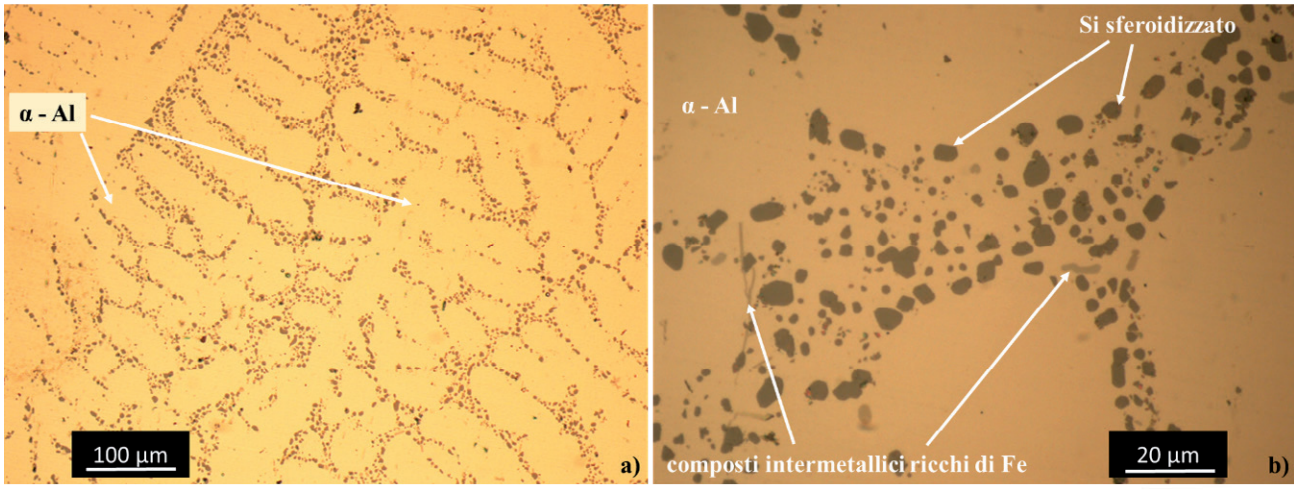

Fig. 1 - Micrografie ottiche (OM) del materiale base (senza attacco chimico) in cui si osservano: a) le dendriti di α-alluminio e b) le particelle di Si eutettico sferoidizzate e i composti aciculari a base di Fe / Optical micrographs (OM) of the base material (without chemical etching) showing: a) dendrites of α-aluminum and b) spheroidized eutectic Si particles and the Fe-based acicular compounds.

Microstruttura dei depositi

Durante l'ESD l'arco elettrico generato tra la punta dell'elettrodo e il substrato è in grado di portare a fusione un piccolo volume di materiale sia del substrato che dell'elettrodo. In particolare, dall'elettrodo si generano piccole gocce di materiale che vengono accelerate dal campo elettrico verso il substrato e schiacciate sullo stesso. Per identificare la singola goccia di materiale dell'elettrodo, schiacciata sul substrato, in letteratura si utilizza il termine "splat" e la conseguente morfologia della superficie del deposito viene perciò definita "a splash".

Durante l'avanzamento dell'elettrodo, le gocce vengono depositate in sequenza sul substrato e il legame tra i singoli splat e tra splat e substrato fuso o parzialmente fuso genera sottili strati di materiale caratterizzati da ben definite interfacce di legame con il materiale precedentemente deposto [13, 17]. La Fig. 2 mostra la microstruttura di solidificazione parallela alla direzione di crescita del rivestimento A357. In particolare, in Fig. 2a viene riportata l'immagine al microscopio ottico (OM) del rivestimento come depositato, mentre la Fig. 2b mostra la morfologia microstrutturale nella regione centrale del rivestimento con attacco chimico.

È possibile chiaramente osservare (Fig. 2a) che il processo ESD è in grado di produrre un rivestimento denso con una buona adesione al substrato. Inoltre non sono presenti difettosità all'interfaccia, a differenza di quanto riscontrato per depositi via ESD in lega 2024 [8, 11, 12]. La microstruttura dei rivestimenti, indipendentemente dai parametri di processo, è caratterizzata da sottili strati sovrapposti (Fig. 2b) e perciò definita microstruttura strato su strato. Un esame mediante microscopia elettronica a scansione ha identificato una morfologia cellulare all'interno di ciascuno strato (Fig. 2c). Mentre, le Fig. 2d e 2e mostrano la zona di interfaccia rivestimento/substrato rispettivamente senza e con attacco chimico. Da tali micrografie si osserva chiaramente come l'interfaccia sia caratterizzata da una zona di mescolamento tra materiale dell'elettrodo e del substrato. Tale mescolamento risulta particolarmente evidente in Fig. 2f, che evidenzia la presenza di particelle di Si eutettico inglobate nella microstruttura cellulare del rivestimento.

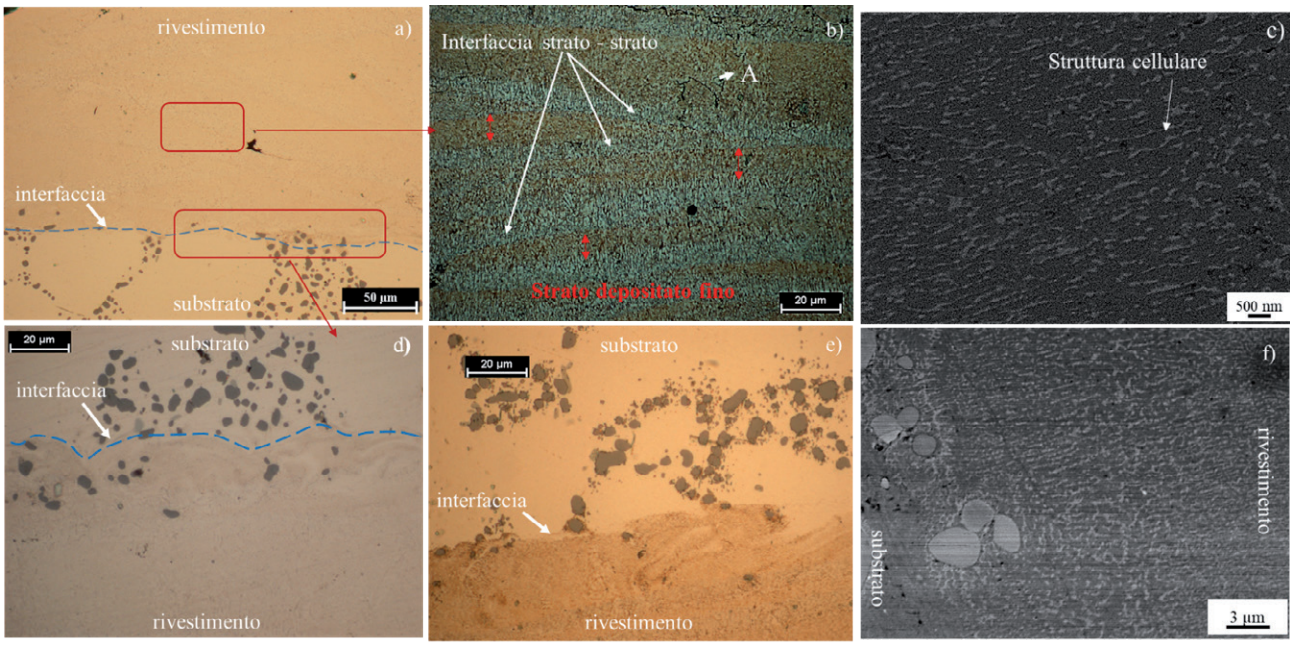

Fig. 2 - Analisi microstrutturale dei rivestimenti: a) micrografia ottica (OM) della sezione trasversale del rivestimento senza attacco chimico, b) OM della regione centrale della sezione trasversale del rivestimento dopo attacco chimico che mostra la tipica microstruttura strato su strato, c) micrografia SEM che evidenzia la morfologia di tipo cellulare all'interno di ciascuno strato (ingrandimento del punto A), d) OM della regione di interfaccia substrato/rivestimento senza attacco chimico, e) OM della regione di interfaccia substrato/rivestimento a seguito dell'attacco chimico e f) ingrandimento (micrografia SEM) della regione di interfaccia substrato/rivestimento / Microstructural analysis of the coatings: a) optical micrograph (OM) of the coating cross-section without chemical etching, b) OM of the central region of the coating cross-section after chemical etching showing the typical layer by layer microstructure, c) SEM micrograph showing the cell type morphology within each layer (magnification of point A), d) OM of the substrate/coating interface region without chemical etching, e) OM of the substrate/coating interface region after chemical etching and f) magnification (SEM micrograph) of the substrate/coating interface region.

La durezza del substrato a 100 µm dall'interfaccia (Tabella 3) non esibisce significativi scostamenti da quella della lega come ricevuta confermando (come mostrato in Fig. 2e) che il ridotto apporto termico del processo non deteriora microstruttura e proprietà meccaniche della zona di contatto.

Tab. 3 - Durezza del substrato a 100 µm dall'interfaccia ($HV_{0.3/15}$) / Substrate average hardness value at 100 µm far from the interface substrate/coating ($HV_{0.3/15}$)

Campione	*s1*	*s2*	*s3*	*s4*	*s5*	*s6*	*s7*	*s8*
HV a 100 µm dall'interfaccia	104 ± 2	105 ± 1	107 ± 1	104 ± 3	107 ± 1	105 ± 2	105 ± 2	105 ± 1

Difettosità, durezza e spessore dei depositi

I depositi sono affetti dalla presenza di difettosità (Fig. 3). Le principali difettosità riscontrate nei rivestimenti analizzati si presentano come vuoti di differente morfologia (sferica o casuale rispettivamente n°1 e n°2 in Fig. 3b) e difetti laminari che si estendono sia perpendicolarmente all'interfaccia substrato/rivestimento che parallelamente ad essa.

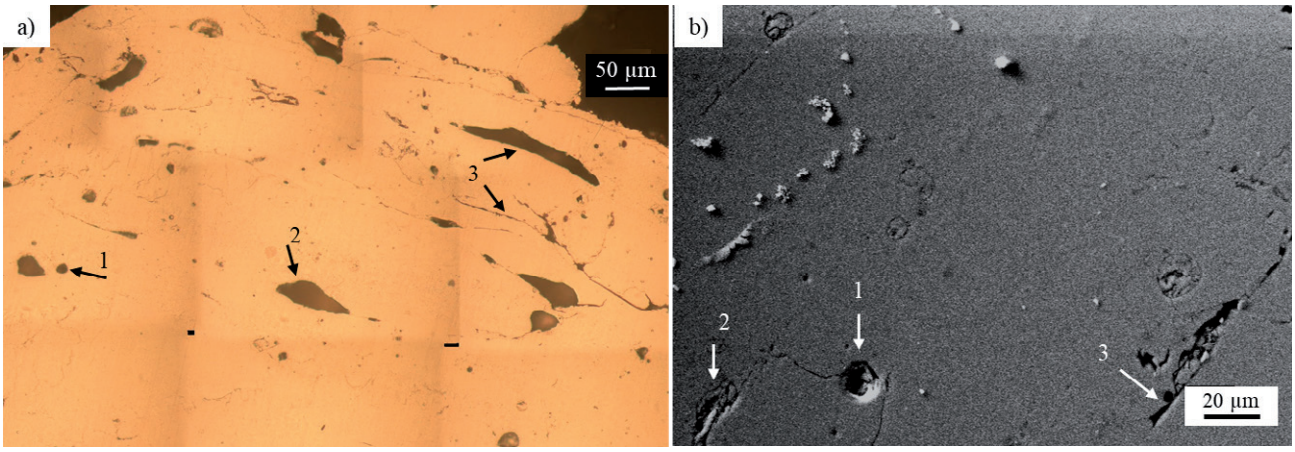

Fig. 3 - Difetti presenti all'interno dei rivestimenti: a) micrografia ottica e b) micrografia SEM che mostrano i difetti tipici del rivestimento: piccoli vuoti sferici (n° 1), vuoti di grandi dimensioni a forma casuale (n° 2) e porosità laminare (n° 3) / Defects within the coatings: a) optical micrograph and b) SEM micrograph showing the typical voids of the coating: small spherical voids (n°1), large, random shaped voids (n°2) and laminar porosity (n°3).

Nella Tabella 4 è riportata la difettosità percentuale nella sezione trasversale dei rivestimenti espressa come il rapporto tra l'area dei vuoti presenti e l'area del rivestimento.

Tab. 4 - Percentuale di area occupata dai difetti della sezione trasversale dei rivestimenti / Area percentage occupied by defects in the coatings cross-section.

Campioni	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8
% Area Tot Difetti	3.3 ±1.5	3.7±1.5	3.1±1.5	4.0±1.5	2.2±1.5	1.9±1.5	7.8±1.5	2.8±1.5

Si osserva che l'area complessiva dei vuoti è contenuta (inferiore all'8% della superficie dei depositi) e non varia in maniera significativa con la potenza.
La dispersione dei diametri equivalenti dei difetti in funzione del fattore di forma per potenze di valore estremo, rispettivamente 33 e 437 W (s1 e s8) è riportata in Fig. 4. Essa evidenzia che i difetti laminari sono caratterizzati dalla massima estensione e quelli sferici dalla minima. Inoltre la dimensione dei difetti sferici risulta contenuta e inferiore ai 30 µm, sia per la minima che per la massima potenza, mentre quella dei difetti casuali e laminari esibisce una maggiore variabilità.
La numerosità percentuale dei difetti per ogni classe di fattore di forma (laminare, casuale e sferica), espressa come il numero di difetti in percentuale del numero di difetti totale in ciascun coating è riportato in Fig. 5.

I grafici indicano che l'utilizzo di potenze di deposizione superiori ai 100 W comporta un evidente aumento della numerosità percentuale dei difetti a morfologia sferica e una riduzione di quelli a morfologia laminare.

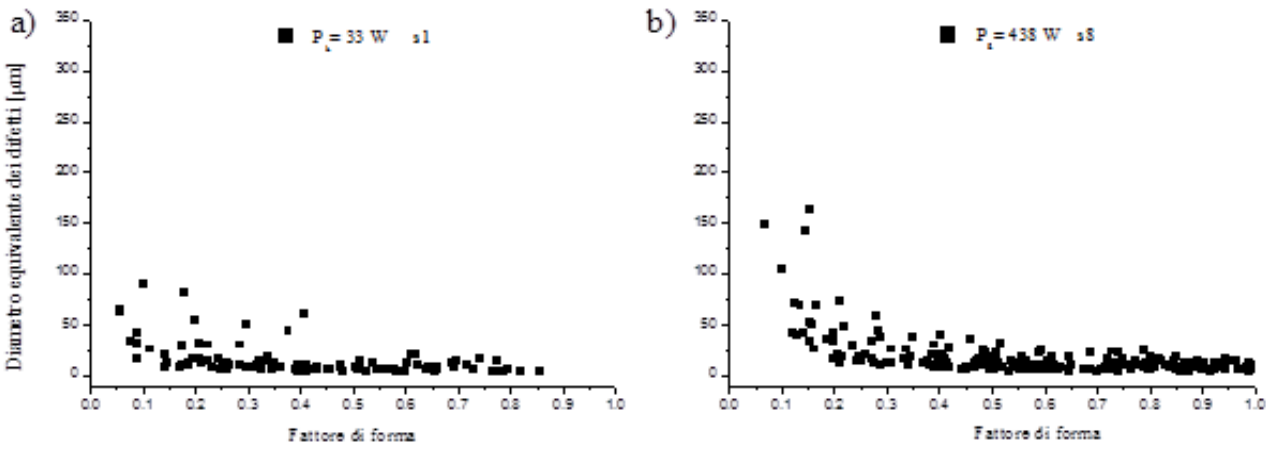

Fig. 4 - Distribuzione del diametro equivalente dei difetti in funzione del fattore di forma (FF) per: a) la minima (s1) e b) massima potenza di deposizione (s8) / Equivalent diameter distribution of defects as a function of shape factor (FF) for: a) lowest (s1) and b) highest deposition power (s8).

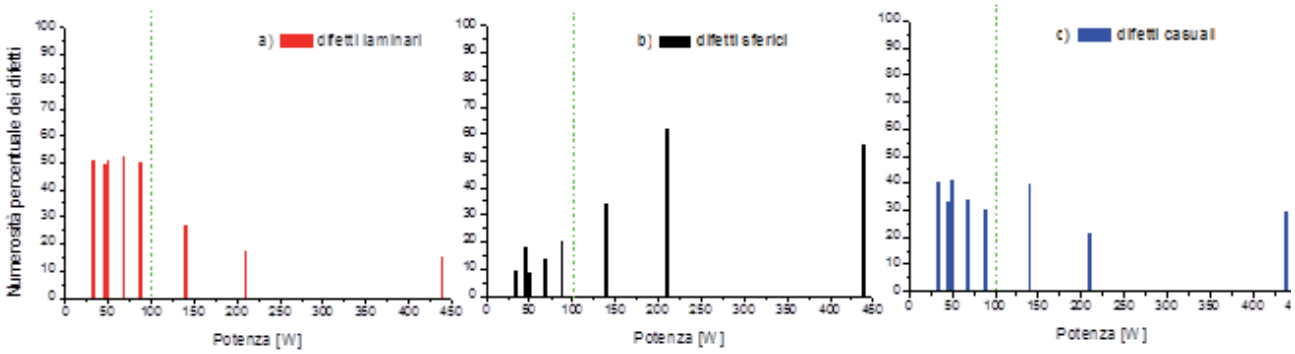

Fig. 5 - Numerosità dei difetti (in percentuale del numero totale) per classi di fattore di forma al variare della potenza: a) difetti laminari, b) difetti sferici e c) difetti casuali / Defects numerosity (as a percentage of the total number) as a function of shape factor (FF) at different process power: a) laminar defects, b) spherical defects and c) random shaped voids

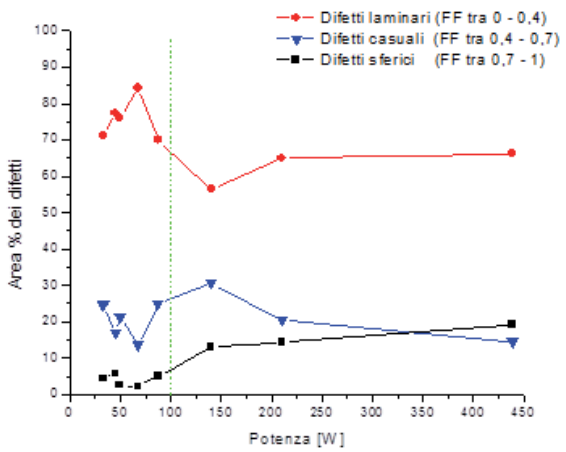

Fig. 6 - Area occupata da difetti per classi di FF (in percentuale dell'area totale dei difetti) al variare della potenza di deposizione (P_s) / Area occupied by defects for classes of shape factor (FF) (as a percentage of the defects total area) Vs the deposition power (P_s).

L'area dei difetti per ogni classe di fattore di forma in percentuale dell'area totale degli stessi è riportata in funzione delle potenze di processo in Fig. 6. Si osserva che, per ogni deposito, la massima area occupata da difetti è dovuta alla presenza di difetti laminari e la minima alla presenza di quelli sferici. L'area percentuale impegnata dai difetti sferici è contenuta e piuttosto costante per i campioni processati a potenze inferiori ai 100W ed aumenta negli altri campioni. Al contrario, i massimi valori dell'area occupata da difetti a morfologia laminare si riscontrano invece nei campioni processati a basse potenze. La presenza di difetti laminari è insita nel processo di deposizione ESD che, essendo un processo ad elevata densità di energia e basso apporto termico, induce la formazione di cricche sia parallele (anche note come cricche di delaminazione) che perpendicolari all'interfaccia (vedi Fig. 3). Le prime sono più propriamente imputabili a scarso miscelamento del materiale dell'elettrodo con quello del substrato o strato precedentemente deposto, le seconde sono da attribuirsi più in generale agli elevati gradienti termici [28]. La numerosità percentuale dei difetti laminari tende a ridursi con la potenza (Fig. 6). Alle più elevate potenze di processo, si ha infatti un maggior volume di materiale dell'elettrodo che viene fuso ed anche una maggiore rifusione del materiale del substrato. Ciò comporta un miglior miscelamento/adesione del materiale fuso con quello rifuso che potrebbe contribuire alla riduzione delle delaminazioni. Inoltre, con la potenza di processo aumenta anche la temperatura del substrato e degli strati precedentemente deposti con la conseguente riduzione dei gradienti termici [9] che risultano quindi meno critici per l'innesco delle cricche. Nel caso in studio la riduzione delle difettosità laminari diviene significativa per potenze superiori ai 100 W (Fig. 5b) e, nonostante la maggiore variabilità della dimensione di tali difetti (Fig. 4), anche l'area percentuale da essi impegnata risulta inferiore rispetto ai valori assunti alle basse potenze di processo (Fig. 6). La numerosità e l'area percentuale dei difetti sferici tende invece ad aumentare con la potenza (Fig. 5b e 6). Tale tipo di difettosità è associata in letteratura sia alla generazione e successiva chiusura di asperità superficiali indotte dal processo di deposizione [29] che a porosità da gas. In genere, le asperità della superficie depositata aumentano in numero e divengono più pronunciate con la frequenza di scarica (f) [9]. Infatti, la superficie di ciascuno splat presenta ondulazioni imputabili all'azione delle forze del campo elettrico responsabili della spinta e schiacciamento dello splat sul substrato. Il numero di asperità risulta quindi legato al numero degli splat depositati nell'unità di tempo. Inoltre, all'aumentare della frequenza di scarica anche l'entità delle asperità aumenta perché è favorita la sovrapposizione tra le gocce deposte [9].

I valori dell'energia di scarica influenzano anch'essi le asperità superficiali. In particolare un aumento di Es, genera un aumento del volume di materiale fuso sia dell'elettrodo che del substrato contribuendo quindi ad introdurre nuove asperità o accrescere l'entità delle stesse [29]. Complessivamente quindi si osserva un aumento di numerosità dei difetti sferici e dell'area percentuale da essi impegnata al crescere della potenza.

I valori medi di microdurezza dei depositi realizzati ai diversi parametri di processo, sono indicati in Tabella 5. Non si osservano significative variazioni di durezza al variare dei parametri di processo. Inoltre, la microdurezza del deposito è sempre inferiore a quella del substrato indipendentemente dai parametri di deposizione utilizzati. Essendo la microstruttura dei depositi estremamente fine, la minore durezza riscontrata potrebbe essere attribuita alla presenza di difettosità diffusa all'interno degli stessi.

Tab. 5 - Durezza media (HV300/15) dei rivestimenti / Average hardness value (HV300/15) of coatings.

Campioni	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8
$HV_{0.3/15}$	95 ± 5	92 ± 5	91 ± 1	94 ± 4	92 ± 6	98 ± 4	92 ± 6	93 ± 6

Lo spessore del rivestimento aumenta con la potenza di spark (P_s) (Fig. 7). All'aumentare della potenza infatti, una maggiore quantità di materiale dell'elettrodo viene fuso e deposto. Fa eccezione il campione s5 che, processato a P_s= 87,7W esibisce invece uno spessore inferiore al campione s4 processato a P_s= 67,5 W. Per processare il campione s5 si è utilizzata la più bassa energia di scarica pari a 0,22 J mentre per il campione s4 l'energia di scarica è pari a 0,75 J. Il minimo livello dell'energia di processo potrebbe aver determinato, per ogni scarica, l'espulsione di volumi di materiale dell'elettrodo estremamente ridotti [29, 30] e quindi, nonostante la frequenza di scarica elevata, uno spessore del coating inferiore a quello del campione s4.

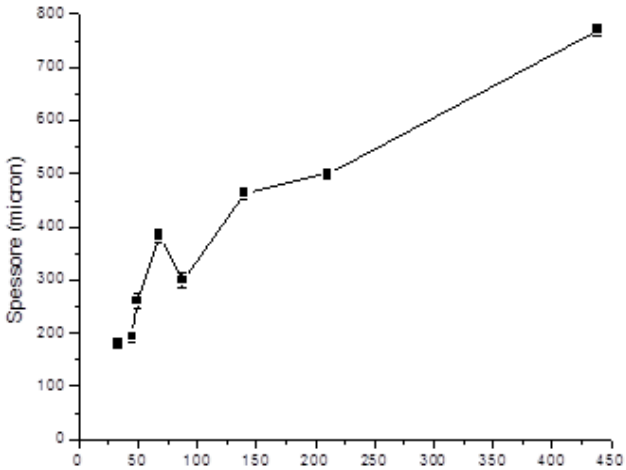

Fig. 7 - Andamento dello spessore medio del rivestimento in funzione della potenza / Average coating thickness trend as a function power (P_s).

Conclusioni

La caratterizzazione microstrutturale e meccanica dei rivestimenti realizzati via ESD sulla lega A357 ha portato alle conclusioni di seguito riassunte:

- Tutti i rivestimenti sono caratterizzati da un buon legame con il substrato ed esibiscono una microstruttura composta da strati sovrapposti di materiale depositato caratterizzati da ben definite interfacce. La morfologia microstrutturale degli strati è principalmente cellulare e la scala della microstruttura è fine grazie alle elevate velocità di raffreddamento indotte dall'ESD. Il substrato, per ogni condizione di deposizione, non esibisce zona termicamente alterata né difettosità all'interfaccia.

- Tutti i rivestimenti sono caratterizzati dalla presenza di vuoti di forma sferica, casuale e laminare. L'area massima impegnata dai vuoti in percentuale dell'area depositata è pari all'8%.

- Per tutti i parametri di processo, l'area impegnata dai difetti laminari è massima e quella impegnata dai difetti sferici minima. I difetti laminari hanno dimensione più estesa e maggiormente variabile (diametro equivalente ≤ 200 μm) mentre i difetti sferici sono dimensioni ridotte (diametro equivalente ≤ 30 μm).

- All'aumentare della potenza, l'aumento della temperatura media del deposito e le velocità di raffreddamento più contenute determinano una riduzione della numerosità percentuale dei difetti laminari mentre l'aumento delle ondulazioni superficiali determina un aumento della numerosità percentuale dei difetti sferici.

- La durezza dei rivestimenti risulta indipendente dai parametri di processo settati ed inferiore a quella del substrato nonostante la microstruttura estremamente fine originatasi a seguito della solidificazione rapida. Tale riduzione di durezza nei rivestimenti si ritiene imputabile alla presenza di difettosità diffusa.

Riferimenti bibliografici

[1] Victor Verbitchi, Cristian Ciuca, Radu Cojocaru, Nonconventional Technologies Review – no. 1/2011

[2] P. Vuoristo, J. Tuominen, J. Nurminen, Conference proceedings: ITSC, 2005

[3] Milan Brandt. Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications. Woodhead Publishing, 2016

[4] Davis, J.R. ASM specialty handbook: Aluminum and Aluminum Alloy. ASM International; 1993

[5] H. Paydas, A. Mertens, R. Carrus, J. Lecomte-Beckers, J. Tchoufang Tchuindjang, Materials and Design 85 (2015) 497–510

[6] S. Frangini, A. Masci, Surface & Coatings Technology, 204 (2010) 2613–2623

[7] A. Carofalo, V. Dattoma, R. Nobile, F. W. Panella, G. Alfeo, A. Scialpi, G. P. Zanon. Procedia Engineering 109 (2015) 312-319

[8] P. Leo, G. Renna, P. Perulli, G. P. Zanon, G. Alfeo. 36° Conferenza Nazionale AIM, 2016

[9] M. Fakoori Hasanabadi, F. Malek Ghaini, M. Ebrahimnia, H.R. Shahverdi, Surface & Coatings Technology, 270 (2015) 95–101

[10] N. Price, AESF/EPA Conference for Environmental and Process Excellence, Lake Buena Vista, FL, (2004), p.323.

[11] Paola Leo, Gilda Renna and Giuseppe Casalino, Appl. Sci. 2017, 7, 945

[12] G. Renna, P. Leo, G. Casalino and E. Cerri, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2018:1-11

[13] Y.J. Xie, M. C. Wang, Surface and Coating Technology, 201 (2006) 691-698.

[14] S. Frangini, A. Masci, A. Di Bartolomeo, Surface and Coatings Technology 149 (2002) 279–286

[15] Champagne V., Pepi M., Edwards B., Army Research Laboratory: Adelphi, MD, USA, 2006. [16] R.N. Johnson, G.L. Sheldon, J. Vac., Sci. Technol. 4 (6) (1986) 2740–2746.

[17] Wei-Fu Wang, Mao-Cai Wang, Feng-Jiu Sun, Yu-Gui Zheng, Jian-Min Jiao, Surface & Coatings Technology 202 (2008) 5116–5121

[18] M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, D. W. Heard, The Open Surface Science Journal, (2011), 3,105-114

[19] Siu Kei Tang, Waterloo, Ontario, Canada, (2009)

[20] E. Cerri, G. Renna, P. Leo, G.P. Zanon, G. Alfeo, 35° Conferenza Nazionale AIM, 2014

[21] Q. G. Wang, Metallurgical and Materials Transactions A (2003) 34, Issue 12, pp 2887–2899

[22] G. Sala, L. Di Landro, A. Airoldi, P. Bettini, tecnologie e materiali aerospaziali, "Tecniche di riparazione" cap. 60.

[23] I.J. Polmear, Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals, Butterworth Heinemann, 1995

[24] Davis, J.R. ASM specialty handbook: Aluminum and Aluminum Alloy. ASM International; 1993.

[25] Engler-pinto Jr, C.C., et al., A comparative investigation on the high temperature fatigue of three cast aluminum alloys. SAE Transactions, 2004. Paper # 2004-01-1029.

[26] W.R. Oates (Ed), AWS Welding Handbook, vol. 3, 8th ed.

[27] P. Cavaliere, E. Cerri, P. Leo, Journal of Materials Science, volume 39, issue 5, year 2004, pp. 1653 – 1658

[28] M.H. Staia, A. Fragiel, M. Cruz, E. Carrasquero, B. Campillo, R. Perez, M. Constantino , T.S. Sudarshan, Wear 251 (2001) 1051–1060

[29] Cadney, S. and M. Brochu, (2008), Intermetallics, Vol. 16, pp. 518-523.

[30] J. Tušek, L. Kosec, A. Lešnjak, T. Muhič, Metalurgija 51 (2012) 1, 17-20