

Microforatura laser di titanio: studio del processo e valutazione del suo effetto sulla microstruttura del materiale

C.A. Biffi, N. Lecis, B. Previtali, M. Vedani, G. Vimercati

Le microlavorazioni effettuate mediante laser di potenza si stanno sviluppando a livello industriale grazie alla tecnologia in continua evoluzione di sorgenti laser innovative. Il conseguente effetto di tipo termico sul materiale risulta essere un aspetto fondamentale sul risultato della lavorazione in questione. Per questo motivo, sorgenti laser che consentono la riduzione del calore introdotto durante la lavorazione risultano essere notevolmente interessanti da studiare per favorire la loro applicazione a livello industriale. In questo contesto si mettono in evidenza l'introduzione dei laser in fibra pulsati per microlavorazioni. Queste sono sorgenti laser innovative che risultano essere estremamente interessanti per lavorazioni di precisione e su piccole dimensioni, grazie alla elevata qualità del fascio laser, l'elevata focalizzabilità ed anche l'elevata produttività. In questo lavoro è proposto uno studio riguardante l'effetto della lavorazione laser, effettuata mediante un laser in fibra, nel processo di microforatura di titanio commercialmente puro. La sorgente utilizzata è un laser in fibra pulsata da 50W, che consente la generazione di impulsi laser di durata nell'ordine dei nanosecondi. Nella prima parte del lavoro è stata identificata una zona di fattibilità tecnologica per la realizzazione di fori ed all'interno della quale sono proposti dei modelli di regressione che legano i parametri di processo agli attributi di qualità dei fori. Successivamente sono identificate due condizioni di processo limite, ovvero quella più energetica e quella meno energetica, sulle quali è stata effettuata un'analisi relativa al danneggiamento termico del materiale a seguito della lavorazione laser. Tale valutazione è stata effettuata mediante misure di nanodurezza, che consentono di valutare variazioni di durezza in zone estremamente contenute nell'ordine di qualche micron sia nelle zone di ingresso e di uscita dei fori sia nella loro sezione trasversale. Il risultato raggiunto indica che la lavorazione laser provoca una variazione sulla durezza del materiale ed è possibile stimare la dimensione della zona termicamente alterata attraverso il profilo di nanodurezza.

PAROLE CHIAVE:

titanio e leghe, solidificazione, microforatura laser, metallografia, tecnologie

INTRODUZIONE

È ben noto che il titanio e le sue leghe vengono sempre più utilizzati in diversi settori, quali l'aerospaziale, il chimico, il biomedicale, l'alimentare ed il marino. Tuttavia, tale diffusione è parzialmente frenata dal costo del titanio e dalle difficoltà che insorgono nei processi di lavorazione, quali i processi primari di fusione, la deformazione plastica e la lavorazione alle macchine utensili. Il titanio, infatti, è chimicamente molto reattivo e tende a saldarsi all'utensile, provocandone il prematuro danneggiamento per quanto riguarda i processi tradizionali di asportazione di truciolo. Inoltre, la sua ridotta conducibilità termica porta le temperature nell'interfaccia utensile-pezzo a valori molto elevati, che di conseguenza riducono la vita utile dell'utensile stesso. Infine, anche l'elevata resistenza meccanica unita al basso modulo elastico riducono la lavorabilità alle macchine utensili, causando usura, vibrazioni ed il fenomeno del ri-

torno elastico [1].

A causa delle difficoltà che si riscontrano nella lavorazione del titanio mediante processi tradizionali, lavorazioni non convenzionali quali quelle laser possono trovare un utilizzo vantaggioso in differenti applicazioni quale il taglio di lamiera [2], la foratura [3-5] e la modifica superficiale [6-10] di componenti in titanio.

La foratura laser e la microforatura laser sono processi di particolare importanza per un gran numero di applicazioni quali ad esempio il settore dell'orologeria, delle pale di turbine e dei circuiti stampati. Negli ultimi anni, numerosi studi sono stati condotti per definire il legame che intercorre tra la qualità dei fori (sia da un punto di vista geometrico che metallurgico) ed i fattori legati al materiale ed al processo di lavorazione [4,5,11-16].

Da studi sperimentali, eseguiti da Bandyopadhyay et al. [11] sul processo di foratura laser delle leghe di Inconel IN718 e di titanio Ti-6Al-4V mediante sorgente laser Nd:YAG, si dimostra che la posizione del fuoco, l'energia e la durata dell'impulso laser sono i parametri di processo che influenzano maggiormente la qualità dei fori. Inoltre fissando tali parametri al livello più basso tra quelli investigati si ottengono fori con pareti pressoché verticali.

Yilbas [4] in un lavoro anch'esso sperimentale mostra il con-

C.A. Biffi

CNR IENI, C.so Promessi Sposi, 29, Lecco

N. Lecis, B. Previtali, M. Vedani, G. Vimercati
Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica,
Via La Masa, Milano

fronto in termini di prestazioni del processo di foratura tra tre diverse leghe: titanio, nickel ed acciaio inossidabile. I risultati evidenziano chiaramente che sul titanio si ottengono fori di minor qualità, in quanto presentano un effetto “a barile” lungo la sezione trasversale. Ciò è causato dalla ridotta diffusività termica del titanio, che riduce lo scambio di calore per conduzione e di conseguenza incrementa la quantità di energia disponibile per la rimozione del materiale dalla cavità.

Dalla letteratura è inoltre ben noto che un certo numero di difetti metallurgici sono associati al processo di foratura laser e solo un’attenta e ben mirata ottimizzazione dei parametri di processo può migliorare la qualità dei fori. Tra i difetti tipici, che si possono riscontrare, il principale è costituito dalla bava, ovvero materiale fuso che si è risolidificato senza essere stato allontanato in modo efficace dalla zona di lavoro. Un ulteriore difetto è costituito dal materiale fuso e risolidificato all’interno delle pareti del foro. Le condizioni di rapida solidificazione di questo strato di materiale risolidificato provocano la formazione di cricche ed irregolarità morfologiche che danneggiano le proprietà del materiale base. Infine, si osserva anche la presenza di una zona termicamente alterata (ZTA), ovvero di quello strato di materiale che, pur non essendo fuso, è stato soggetto a severi cicli termici durante il processo di microforatura laser [5,11] e che presenta una struttura diversa da quella del materiale base.

Tuttavia, in letteratura scarseggiano informazioni circa la microstruttura e le proprietà del titanio nelle zone che hanno subito un cambiamento a seguito del processo di microforatura laser. Alcuni spunti si possono trarre da studi simili riguardanti la modifica superficiale del titanio mediante lavorazione laser. In uno studio che analizza la microstruttura ed il comportamento a corrosione dello strato fuso di campioni di titanio CP modificato superficialmente mediante tecnologia laser, Sun et al. [7] hanno identificato chiaramente la formazione di martensite aciculare fine dovuta ad una velocità di raffreddamento significativamente elevata nella zona fusa.

Questo cambiamento di fase corrisponde ad un incremento di durezza a partire da 170 HV nel materiale base sino a 280 HV nello strato fuso anche se, come è noto, alla martensite aciculare con struttura esagonale compatta del titanio corrisponde bassa duttilità e tenacità [17].

Inoltre, dalle microanalisi della composizione degli elementi sia nella bava sia nello strato fuso di fori realizzati laser, si osserva l’effetto del gas di assistenza, che favorisce la formazione di un sottile strato di TiO₂ o di nitruri sulla superficie [7,11]. Infine, è riconosciuto che campioni di titanio trattati laser hanno eccellenti proprietà di resistenza alla corrosione, grazie alla formazione sulla superficie di strutture solidificate molto rapidamente che incrementano in modo evidente la resistenza alla vaiolatura [6,7].

Le analisi condotte a proposito dell’interazione fascio laser-titanio non comprendono l’ultima novità, che di recente ha rivoluzionato il settore delle sorgenti laser. In questi ultimi anni, infatti, si è assistito alla comparsa di una nuova tipologia di sorgenti laser, i laser in fibra attiva. In questo caso la sorgente del fascio laser è costituita da una fibra di vetro drogata con ioni di terre rare, in particolar modo con ioni di itterbio (Yb). Le potenzialità più evidenti di tali sorgenti laser innovative sono l’elevata qualità del fascio, alta affidabilità, efficienza energetica maggiore ed elevata focalizzabilità, che comporta l’ottenimento di fasci laser di ridotta dimensione e densità di potenza superiori alle sorgenti laser tradizionali e quindi ad un aumento di produttività del processo laser.

Si può disporre pertanto di una sorgente laser con ottime potenzialità per essere utilizzata nell’esecuzione di microlavorazioni ed in particolare di microforatura, riducendo la produzione

di materiale fuso ed i conseguenti danneggiamenti del materiale base. I primi studi, condotti utilizzando sorgenti laser in fibra continue [18] o modulate ma con impulsi lunghi [19] confermano le potenzialità delle nuove sorgenti laser in fibra, anche se mettono in evidenza la necessità di operare in regimi pulsati corti. E’ ben noto, infatti, che la durata dell’impulso laser è proporzionale al danneggiamento termico prodotto nel materiale [20], in quanto regola la conduzione di calore all’interno del pezzo stesso e di conseguenza la fusione e l’alterazione termica delle zone limitrofe alla zona di lavorazione.

Successivamente Biffi et al. [15,16] hanno applicato una sorgente laser in fibra pulsata nel processo di microforatura laser di titanio, mostrando come tale materiale producesse una rilevante quantità di bava, nonostante la qualità del fascio laser, anche se la produttività di tale sorgente fosse estremamente interessante per applicazioni a livello industriale.

In questo lavoro si presenta lo studio delle caratteristiche geometriche e microstrutturali di fori ottenuti mediante il processo di microforatura a percussione con sorgente laser in fibra pulsata di lamine di titanio commercialmente puro di 0.5 mm di spessore. Inizialmente vengono ricavati dei modelli regressivi con lo scopo di legare i parametri di processo investigati (frequenza di ripetizione degli impulsi ed energia dell’impulso) agli attributi di qualità dei fori (diametri, circolarità ed area della bava in ingresso). Sono poi sono ricavate delle sezioni trasversali dei fori, che sono stati realizzati in due condizioni di processo estreme rispetto al campo di lavoro, con lo scopo di valutare la forma della parete interna dei fori stessi ed il danneggiamento termico attraverso la riduzione della dimensione del grano. Infine si propone una stima della dimensione della zona danneggiata dal calore fornito dal fascio laser attraverso misure di nanodurezza localizzate in prossimità della zona lavorata laser.

PROGETTAZIONE DELLA SPERIMENTAZIONE

Materiale investigato

Il processo di microforatura è stato eseguito su lamine di titanio commercialmente puro (CP) di grado 2 (ASTM grado 2) di spessore pari a 0.5 mm. Le lamine sono state ottenute da piatti di spessore 10 mm, ricotti prima della laminazione a 750° C, e successivamente laminati a temperatura ambiente con passate successive (riduzione di spessore per ogni passata di laminazione pari a 0.5 mm). La composizione chimica del materiale investigato è riportata in Tabella 1, mentre la Figura 1 mostra la tipica struttura a grani equiassici del materiale base.

Sistema laser utilizzato e progettazione degli esperimenti

Il laser utilizzato per lo studio sulla microforatura di titanio è una sorgente laser in fibra attiva YLR 50 di IPG Photonics. La sorgente in fibra utilizzata è caratterizzata da una potenza media nominale pari a 50W. Essa opera a regime pulsato ed in particolare gli impulsi laser generati sono nell’ordine dei nanosecondi (100-160 ns) e sono emessi con frequenze di ripetizione degli impulsi nell’ordine dei kHz (20-80 kHz). L’energia massima per impulso laser è pari a 1.2 mJ mentre la lunghezza d’onda di emissione del fascio laser è uguale a quella di una sorgente più tradizionale, quale il Nd:Yag (1064 nm). La qualità del

N	C	O	Fe	Ni	Ti
0.054	0.004	0.639	0.045	0.011	bal.

TAB. 1 *Composizione chimica delle lamine di Ti CP investigato (% in massa).*

Chemical composition of the investigated Ti CP sheets (weight %).

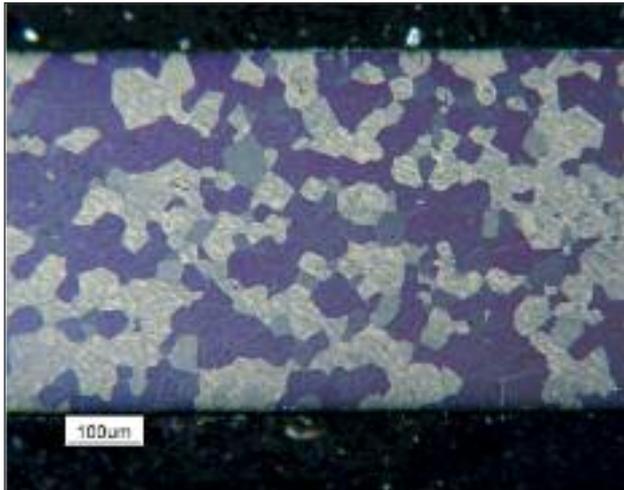


FIG. 1 *Microstruttura del materiale investigato ottenuta da una sezione ortogonale alla direzione di laminazione.*

Microstructure of the investigated material in the transversal section, orthogonal to the rolling direction.

fascio laser emesso è buona ed il fattore di qualità del fascio M2 di tale sorgente, che è un classico indicatore della qualità del fascio laser in termini di vicinanza alla distribuzione di potenza gaussiana, è pari a 1.7. Il sistema laser è completato da una testa da foratura LaserMech, caratterizzata da una lente di focalizzazione da 60 mm e da un ugello per l'adduzione del gas di assistenza, e da un sistema di movimentazione Aerotech a 2 assi cartesiani. In tale configurazione è possibile ottenere un diametro del fascio nella posizione di fuoco di circa 23 μm, aspetto estremamente interessante per la realizzazione di particolari di piccole dimensioni.

Il processo di microforatura laser investigato in questo lavoro è quello che avviene in modalità a percussione, in cui la lavorazione avviene a seguito di un treno di impulsi laser. Ciascun impulso asporta una porzione di materiale, che deve essere rimosso per la realizzazione del foro. Infatti, il fascio laser viene focalizzato sulla superficie del campione e ciascun impulso riscalda, fonde e vaporizza parzialmente il materiale sottostante. Nella lavorazione presa in esame, inoltre, è impiegato un gas di assistenza, che favorisce la fuoriuscita del materiale fuso dalla superficie inferiore e la realizzazione del foro passante, oltre alla protezione delle ottiche nei confronti di eventuali schizzi di materiale fuso.

La campagna sperimentale è stata progettata con lo scopo di studiare l'effetto dell'energia dell'impulso E (0.5-0.6-0.9-1-1.2 mJ) e della frequenza di ripetizione degli impulsi F (20-35-50 kHz) sugli attributi di qualità dei fori ed in particolare per determinare i relativi modelli di regressione. È stato eseguito un piano fattoriale completo replicato 5 volte per valutare la ripetibilità della lavorazione laser. I parametri che invece sono stati mante-

nuti fissi nel corso della campagna sperimentale sono descritti nel seguito. Il numero degli impulsi laser è stato fissato pari a 120 per garantire la realizzazione di fori passanti in tutte le condizioni di processo mentre elio a 8 bar è stato impiegato come gas di assistenza; la scelta di un gas inerte è legata alla natura reattiva del titanio. Infine, il fuoco è stato posizionato sulla superficie superiore delle lamine di titanio, mentre la distanza di lavoro, ovvero la distanza che intercorre tra ugello e la superficie del campione è stata fissata pari a 0.5 mm. In Tabella 2 sono stati riassunti i parametri variabili e fissi nel corso della sperimentazione ed i relativi livelli e valori.

Definizione degli attributi di qualità dei fori

Al fine di caratterizzare la geometria e la qualità dei fori realizzati mediante tecnologia laser, sono stati considerati i seguenti attributi di qualità:

- Diametro medio di ingresso (D_{top}) e di uscita (D_{bottom}): valutato come diametro di Feret medio, che viene calcolato come la media di 90 diametri ottenuti ogni 2° e che passano per il centroide.
- Aspetto di ingresso (A_{top}) e di uscita (A_{bottom}): ottenuto come rapporto tra l'asse maggiore e l'asse minore dell'ellisse equivalente. L'aspetto così valutato fornisce un'indicazione della circolarità del foro: tanto più un foro è tondo, tanto più il valore dell'aspetto tende a 1.
- Area della bava ($S_{spatter}$): calcolata come area della bava che è disposta attorno al foro di ingresso a meno dell'area del foro stesso.

L'osservazione e l'acquisizione delle immagini dei fori in ingresso ed uscita è stata effettuata mediante microscopio a scansione elettronica (SEM) per garantire sufficiente risoluzione della misura delle grandezze caratteristiche dei fori stessi.

Poiché la misura del solo diametro può non essere sufficiente per la caratterizzazione della geometria del foro, sono state eseguite delle sezioni del foro secondo un piano parallelo all'asse. In questo modo è possibile visualizzare la geometria interna del foro. Considerata tuttavia la difficoltà e la lunghezza nell'operazione di preparazione delle sezioni metallografiche sono state investigate solo alcune condizioni di processo.

Caratterizzazione delle alterazioni microstrutturali dei fori

L'analisi delle alterazioni microstrutturali in prossimità dei fori realizzati è stata condotta in due condizioni di processo estreme all'area di lavoro investigata. Tali condizioni di processo sono riportate in Tabella 3.

I campioni contenenti i fori ottenuti secondo i parametri di Tabella 3 sono stati sezionati in direzione perpendicolare all'asse del foro ed inglobati in resina. In seguito ad operazioni convenzionali di lucidatura, è stato eseguito un attacco chimico mediante reagente Kroll's (10 ml HF, 5 ml HNO₃, 85 ml H₂O). Il bordo del foro passante è stato osservato mediante microscopio ottico in luce polarizzata.

Inoltre, sono state eseguite misure di nanodurezza Vickers con l'obiettivo di evidenziare le differenze tra il materiale alterato ri-

TAB. 2
Parametri di processo variabili e fissi usati nella sperimentazione.

Variable and fixed process parameters used in the experiments.

Parametri variabili	Energia dell'impulso E	0.5-0.6-0.9-1.0-1.2 mJ
	Frequenza degli impulsi F	20-35-50 kHz
Parametri fissi	Numero degli impulsi	120
	Gas di assistenza	Elio
	Pressione	8 bar
	Distanza focale	0 mm
	Distanza di lavoro	0.5 mm

Condizione	E (mJ)	F(kHz)
1	0.5	20
2	1.2	50

TAB. 3 Condizioni di processo di esecuzione dei fori soggetti ad analisi delle alterazioni microstrutturale.

Process conditions for the microstructural characterization of the holes.

spetto al materiale base sia lungo la sezione trasversale sia sulle superfici di ingresso e di uscita dei fori. E' stato utilizzato un carico molto basso, pari a 10 mN, per mantenere la dimensione dell'impronta il più piccola possibile con il fine di ottenere una buona risoluzione spaziale della durezza in prossimità dei fori.

ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Caratterizzazione della geometria dei fori

In Figura 2 vengono presentati alcuni esempi di come si presentano i fori, eseguiti mediante il processo di foratura laser in 2 condizioni di processo estreme rispetto la finestra tecnologica investigata. Come si può notare, il foro di ingresso è caratterizzato da una certa quantità di bava e di spruzzi di materiale fuso, che si sono depositati sulla superficie superiore della lamina di titanio. Ciò dipende dalla durata degli impulsi laser abbastanza lunga (nell'ordine dei nanosecondi) [20], che consente la conduzione di calore all'interno del pezzo. Il danneggiamento termico in prossimità del particolare realizzato si manifesta sotto forma di una zona fusa e di una zona termicamente alterata. Al contrario, il foro di uscita non presenta materiale fuso e quindi è esente da bava. Nelle Figure 3 e 4 sono riportati gli andamenti rispettivamente dei diametri di ingresso ed uscita dei fori realizzati tramite tecnologia laser al variare dei parametri di processo investigati.

Dall'analisi dei dati si evince che in entrambi i casi, sia il dia-

metro di ingresso del foro D_{top} sia quello di uscita D_{bottom} , sono influenzati sia dall'energia dell'impulso E sia dalla frequenza di ripetizione degli impulsi F in modo logaritmico. I diametri di ingresso variano tra $35 \mu\text{m}$ e $70 \mu\text{m}$ circa mentre quelli di uscita sono compresi tra $10 \mu\text{m}$ e $50 \mu\text{m}$. Ciò indica che i fori realizzati laser sono caratterizzati da un elevato rapporto di forma ma non sono perfettamente cilindrici in quanto il diametro di ingresso è sempre superiore rispetto al diametro di uscita.

I modelli regressivi, che legano le grandezze misurate, in questo caso i diametri di ingresso ed uscita, ai parametri di processo investigati, sono i seguenti:

$$D_{top} [\mu\text{m}] = 35.8 + 21.0 \ln E[\text{mJ}] + 6.29 \ln F[\text{kHz}] \quad \text{Eq. (1)}$$

$$D_{bottom} [\mu\text{m}] = 18.8 + 31.7 \ln E[\text{mJ}] + 6.26 \ln F[\text{kHz}] \quad \text{Eq. (2)}$$

Entrambi i diametri di ingresso e di uscita crescono con i parametri investigati in quanto aumenta la potenza media introdotta all'interno del pezzo e di conseguenza la dimensione della pozza fusa che è legata alla dimensione dei fori. L'andamento logaritmico è legato al fatto che è presente un effetto di saturazione, oltre il quale un ulteriore aumento di potenza da parte del fascio laser non può portare ad un aumento dei diametri.

In Figura 2-3 sono riportati anche i punti sperimentali eseguiti in una fase successiva per la validazione dei modelli regressivi proposti. Si nota, infatti, che tali punti sperimentali risultano essere all'interno della dispersione dei dati sperimentali che sono stati utilizzati per la costruzione dei modelli stessi.

L'effetto di saturazione dei parametri di processo investigati è presente anche nel modello che descrive l'andamento dell'area della bava ingresso ai fori, come mostrato in Figura 5 e dal seguente modello di regressione:

$$S_{spatter} [\mu\text{m}^2] = 3720 + 5411 \ln E[\text{mJ}] + 1267 \ln F[\text{kHz}] \quad \text{Eq. (3)}$$

Si nota dal modello regressivo di Eq.(3) che, riducendo al valore minimo sia l'energia dell'impulso sia la frequenza di ripetizione degli impulsi, è possibile ridurre la quantità di bava che si genera sulla superficie di ingresso dei fori.

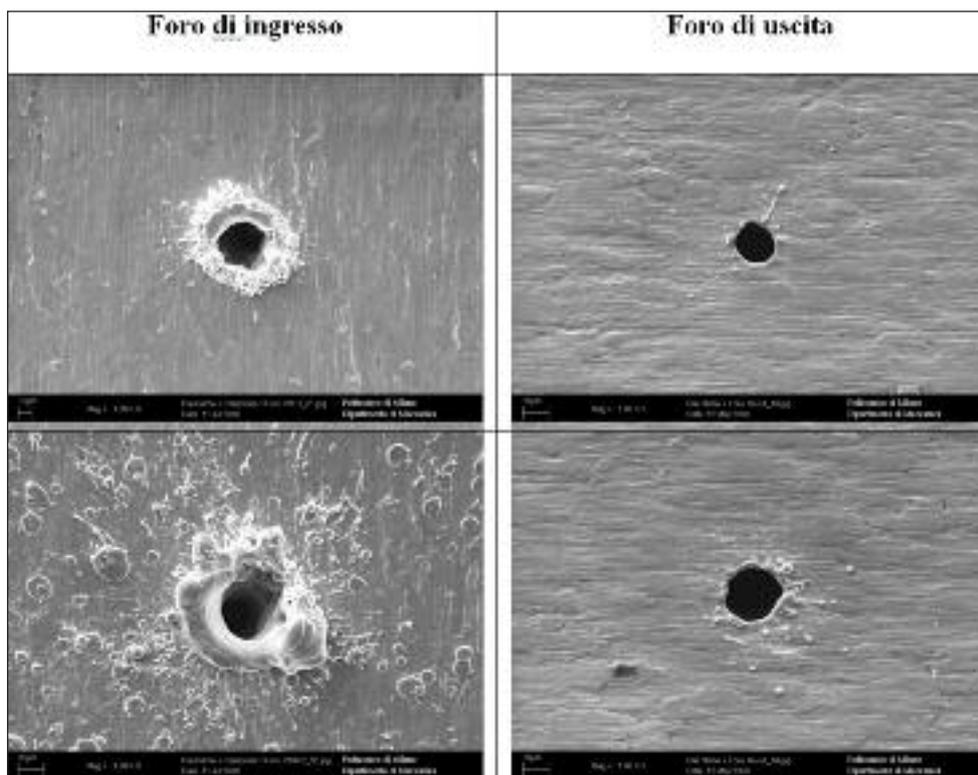


FIG. 2 Esempi di alcuni fori con ingresso ed uscita a diverse condizioni.

Representative entrance and exit holes performed in different process conditions.

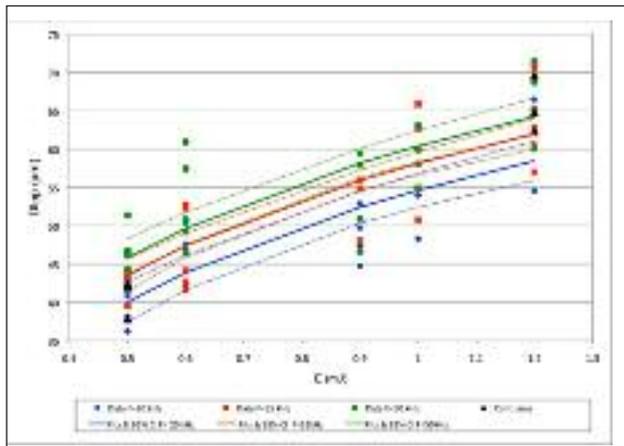


FIG. 3 *Diametro di ingresso al variare dell'energia dell'impulso e della frequenza.*
Trend of the entrance diameter in function of the pulse energy and pulse frequency.

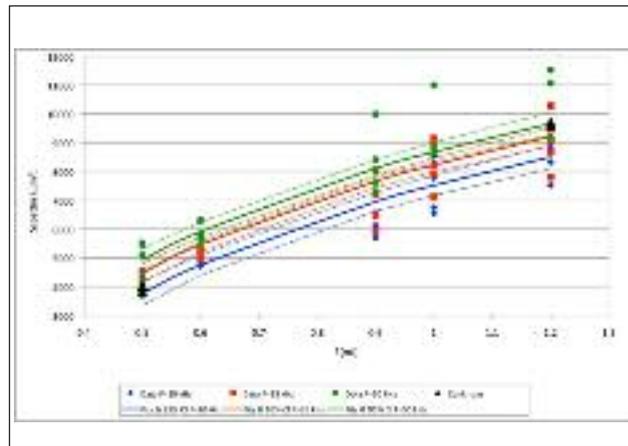


FIG. 5 *Area della bava di ingresso al variare dell'energia dell'impulso e della frequenza.*
Trend of the area of top spatter in function of the pulse energy and pulse frequency.

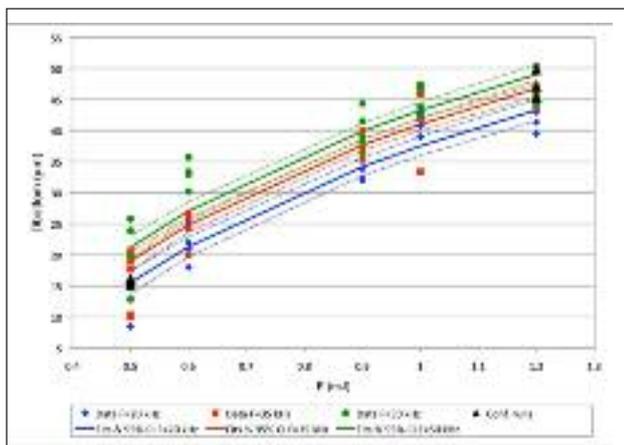


FIG. 4 *Diametro di uscita al variare dell'energia dell'impulso e della frequenza.*
Trend of the exit diameter in function of the pulse energy and pulse frequency.

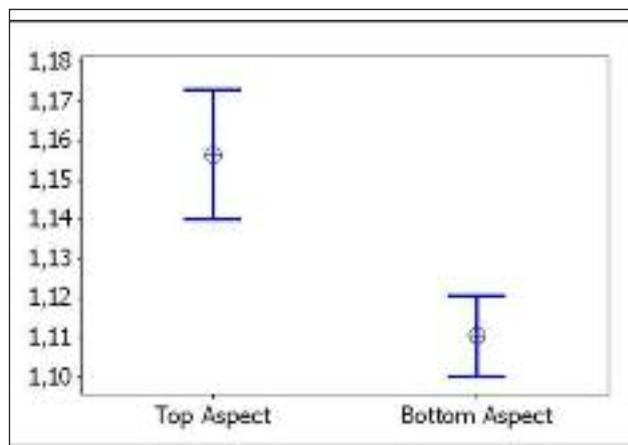


FIG. 6 *Aspetto di ingresso e di uscita dei fori realizzati laser.*
Top and bottom aspects of the laser machined holes.

Un'ulteriore conferma che i fori ottenuti mediante processo di microforatura laser a percussione si discostano dalla forma cilindrica ideale è costituita dall'analisi dell'aspetto di ingresso A_{top} e di uscita A_{bottom} . L'analisi statistica consente di affermare che entrambi gli aspetti dei fori non risultano essere influenzati dai parametri di processo investigati in questo lavoro. Pertanto all'interno del campo esplorato non è possibile migliorare la circolarità dei fori variando i parametri di processo. Inoltre, come mostrato la Figura 6, entrambi gli aspetti sono superiori a 1. Questo significa che i fori non sono perfettamente circolari. In particolare, il foro realizzato sulla superficie superiore, anche a causa della presenza della bava, è più lontano dalla circolarità rispetto al foro di uscita.

Caratterizzazione delle alterazioni microstrutturali dei fori
In questo lavoro gli attributi di qualità dei fori sono stati ulteriormente investigati mediante la valutazione della geometria interna dei fori stessi. Sono state selezionate due differenti condizioni di processo, caratterizzate dalla minima e massima potenza media, oltre che ad essere agli estremi della finestra tecnologica precedentemente investigata. Sono state ricavate le corrispondenti sezioni trasversali dei fori, come mostrato in Fi-

gura 7. I campioni sono stati tagliati mediante troncatrice di precisione con lama diamantata e lucidati con molta attenzione per ottenerne la sezione trasversale lungo l'asse del foro. Infatti, anche piccoli disallineamenti tra l'asse del foro ed il piano in cui giace la sezione del foro stesso porterebbero ad effetti geometrici che porterebbero a deviazioni dalla sezione teorica, come desumibile dalle successive immagini. Tali artefatti geometrici sono stati presi in considerazione durante la valutazione della geometria dei fori.

Dal confronto delle due sezioni dei fori realizzate in Figura 7 è possibile osservare che la parete interna del foro realizzato nella condizione di processo a maggiore energia appare essere maggiormente regolare rispetto al foro realizzato nella condizione meno energetica. Inoltre, è possibile notare come entrambe le sezioni trasversali dei fori presentino una variazione del diametro dei fori lungo la direzione dello spessore della lamina di titanio, causato dalla forma del fascio laser lungo la sua direzione di propagazione.

Nelle Figure 8, 9 e 10 sono riportate le immagini a maggiori ingrandimenti della microstruttura del materiale in prossimità della parete dei fori nelle due condizioni di processo investigate, sia sulla sezione trasversale sia nella zona di ingresso ed uscita

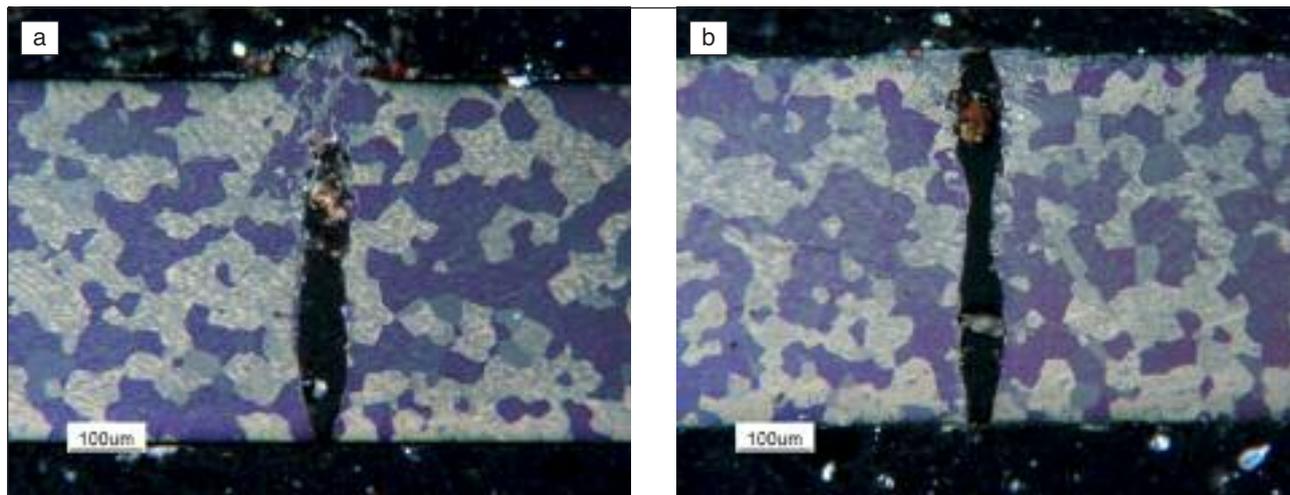


FIG. 7 Sezione trasversale dei fori realizzati nelle condizioni di processo estreme: (a) $F=20$ kHz, $E=0.5$ mJ e (b) $F=50$ kHz, $E=1.2$ mJ.

Transversal sections of the holes performed in the extreme process conditions: (a) $F=20$ kHz, $E=0.5$ mJ e (b) $F=50$ kHz, $E=1.2$ mJ.

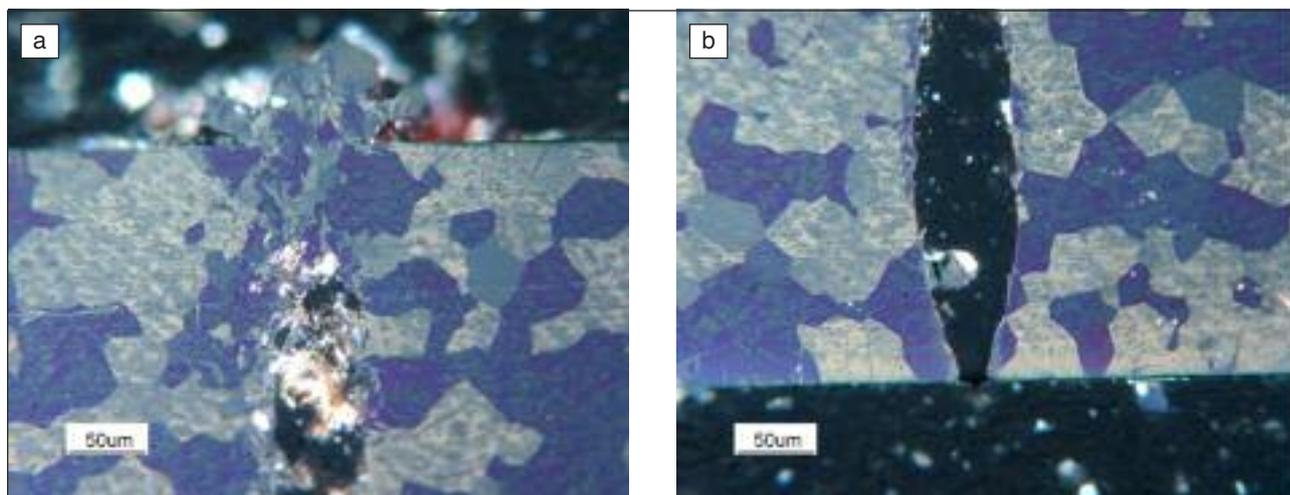


FIG. 8 Ingrandimento della sezione trasversale in corrispondenza della zona di ingresso (a) e di uscita (b) del foro realizzato nella condizione di processo di minima energia ($F= 20$ kHz, $E=0.5$ mJ).

Magnification of the transversal section in correspondence of the entrance (a) and exit (b) regions of the hole performed in the process condition characterized by minimum energy ($F= 20$ kHz, $E=0.5$ mJ).

dei fori. Dalle immagini acquisite al microscopio ottico è possibile ipotizzare che l'estensione della zona termicamente alterata dalla lavorazione laser sia estremamente limitata. Infatti, tale zona è visibile in modo difficoltoso quasi esclusivamente in prossimità della zona di ingresso del foro, dove è rimasta traccia di una maggiore quantità di materiale fuso e risolidificato, a causa di un maggior tempo di esposizione al fascio laser durante la lavorazione. La modifica evidente del materiale consiste in un piccolo volume che si è solidificato rapidamente ed è visibile sottoforma di un sottile strato circolare caratterizzato da grani molto fini, come mostrato in Figura 8(a)-9(a)-10(a), rispetto a quelli del materiale base. L'estensione di tale zona termicamente alterata può essere stimata di circa 20 μ m ma è caratterizzata da una grande variabilità e non è stato possibile determinare una correlazione tra la sua estensione ed i parametri di processo investigati.

Verso la zona di uscita, come mostrato in Figura 8(b)-9(b)-10(b), al contrario non appare visibile una alterazione microstruttu-

rale evidente, probabilmente per il fatto che tale zona è stata soggetta ad un ciclo termico meno violento rispetto alla zona di ingresso dei fori in quanto il tempo di esposizione al fascio laser è stato minore e l'azione del gas di assistenza è stata sicuramente meno efficace in termini di raffreddamento del pezzo.

In Figura 11 è mostrato un ingrandimento di una zona di chiusura di un foro realizzato nella condizione di minore energia lungo la sua sezione trasversale, in cui è evidente la presenza di una modifica della microstruttura a livello della dimensione dei grani. Come già affermato, tale modifica dipende dalla drasticità del ciclo termico imposto dalla sorgente laser e dal successivo rapido raffreddamento del materiale. Inoltre, è osservabile da tale immagine anche la formazione di geminati all'interno dei grani stessi in prossimità della zona di lavorazione.

È ben noto che eventuali modifiche legate allo sviluppo di una sottostruttura non sono osservabili se non mediante analisi in microscopia elettronica a trasmissione (TEM), non svolte nel presente studio. Tuttavia, una indiretta indicazione della modifica

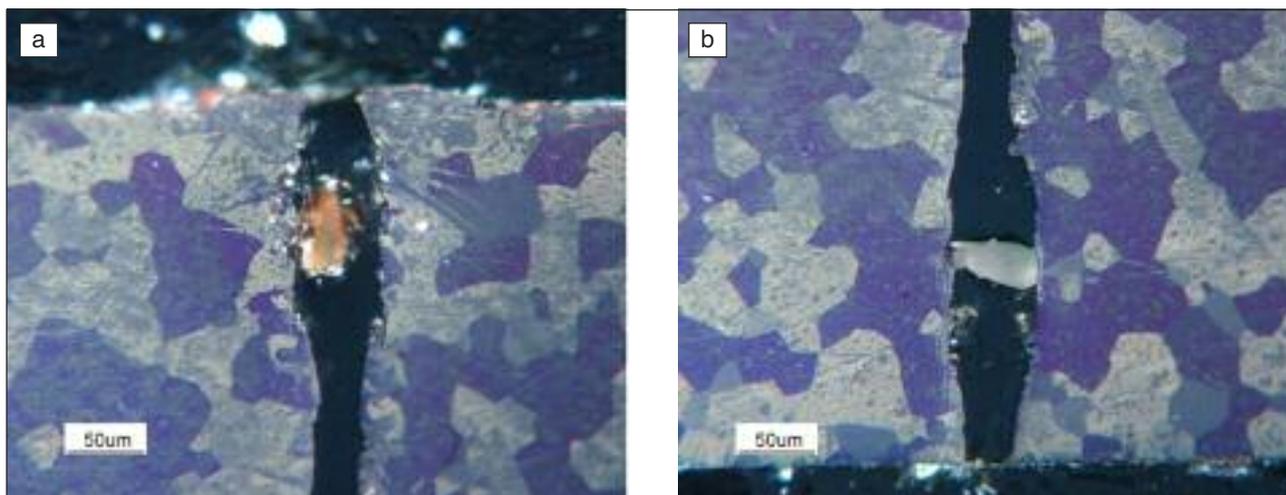


FIG. 9 *Ingrandimento della sezione trasversale in corrispondenza della zona di ingresso (a) e di uscita (b) del foro realizzato nella condizione di processo di massima energia ($F= 50\text{kHz}$, $E=1.2\text{ mJ}$).*

Magnification of the transversal section in correspondence of the entrance (a) and exit (b) regions of the hole performed in the process condition characterized by maximum energy ($F= 50\text{kHz}$, $E=1.2\text{ mJ}$).

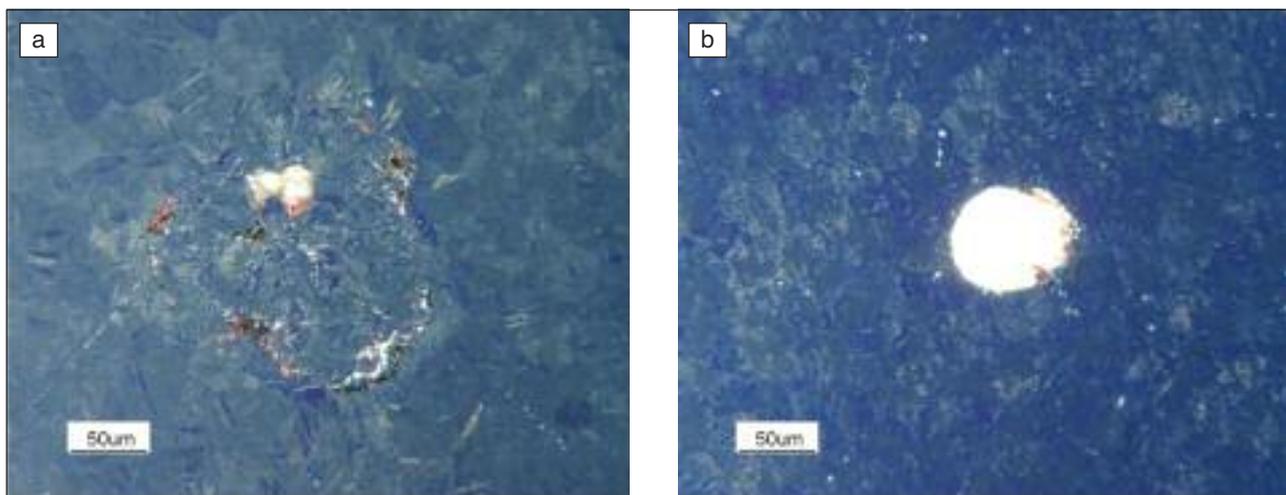
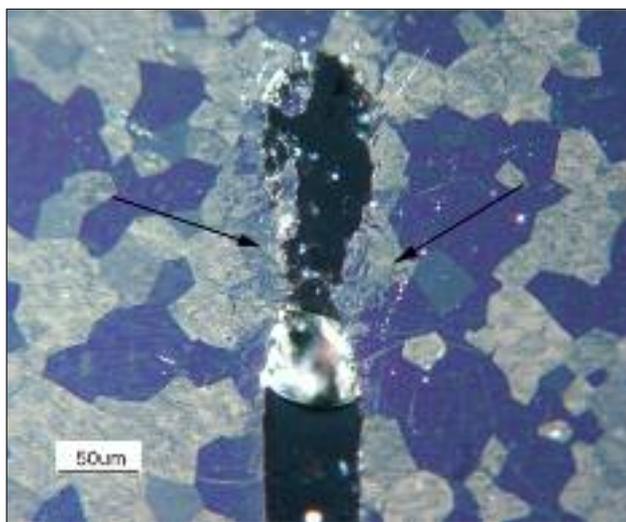


FIG. 10 *Ingrandimento della zona di ingresso (a) e di uscita (b) del foro realizzato nella condizione di processo di massima energia ($F= 50\text{kHz}$, $E=1.2\text{ mJ}$).*

Magnification of the entrance (a) and exit (b) hole performed in the process condition characterized by maximum energy ($F= 50\text{kHz}$, $E=1.2\text{ mJ}$).



della microstruttura del materiale è stata ottenuta effettuando misure di nanodurezza in corrispondenza dei fori sia sulla sezione trasversale sia sulla superficie di ingresso ed uscita. In tal caso, è stato possibile valutare in modo estremamente localizzato il valore di durezza del materiale, in quanto le dimensioni delle impronte realizzate erano molto contenute grazie ai carichi molto ridotti, come mostrato in Figura 12 per le 2 condizioni di processo scelte. Va considerato nell'analisi dei dati che le dimensioni delle impronte sono nettamente minori rispetto alla dimensione dei grani cristallini, quindi il valore di durezza misurato è influenzato anche dalla specifica orientazione cristallografica dei singoli grani.

FIG. 11 *Zona di chiusura di un foro realizzato nella condizione di processo di minima energia ($F= 20\text{kHz}$, $E=0.5\text{ mJ}$).*

Closure region of a hole performed in the process condition characterized by minimum energy ($F= 20\text{kHz}$, $E=0.5\text{ mJ}$).

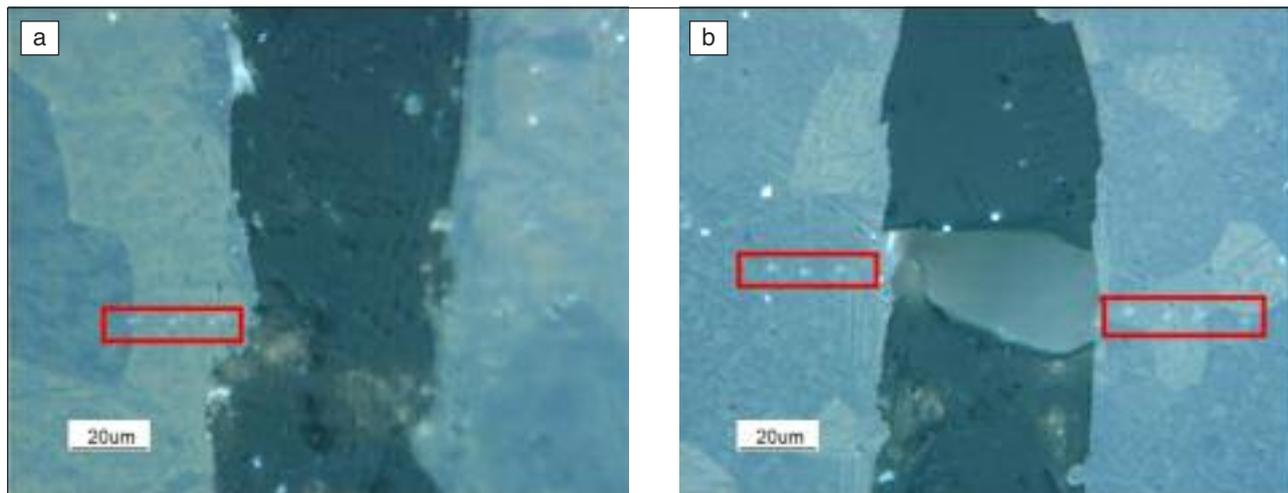


FIG. 12 *Impronte delle misure di nanodurezza sulla sezione trasversale dei fori realizzati nelle condizioni di processo estreme: (a) F=20 kHz, E=0.5 mJ e (b) F=50 kHz, E=1.2 mJ.*

Nanoindentations on the transversal section of the holes performed in the two extreme process conditions: (a) F=20 kHz, E=0.5 mJ and (b) F=50 kHz, E=1.2 mJ.

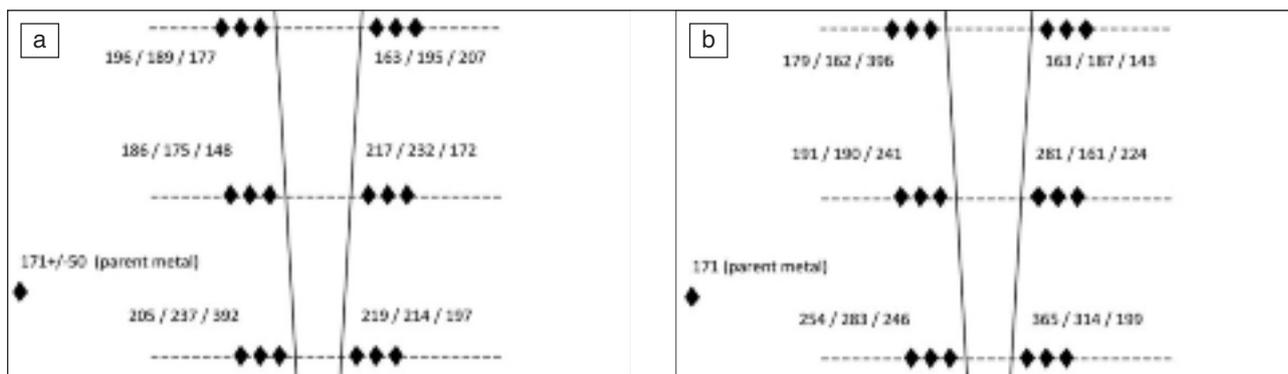


FIG. 13 *Misure di nanodurezza sulla sezione trasversale dei fori realizzati nelle condizioni di processo estreme: (a) F=20 kHz, E=0.5 mJ e (b) F=50 kHz, E=1.2 mJ.*

Nanohardness measurements on the transversal section of the holes performed in the two extreme process conditions: (a) F=20 kHz, E=0.5 mJ and (b) F=50 kHz, E=1.2 mJ.

In Figura 13 sono stati riportati lo schema con cui sono state effettuate le prove di nanodurezza ed i rispettivi valori misurati, espressi in Vickers, sulla sezione trasversale dei fori realizzati nelle condizioni di processo scelte in precedenza, ad una distanza una dall'altra di circa 10 µm. Come era ragionevole attendersi, le misure effettuate di nanodurezza sono caratterizzate da una grande dispersione a causa delle ridotte dimensioni di misura. Poiché non è stato possibile individuare un particolare andamento delle durezze in funzione dei parametri di processo investigati, è possibile affermare che tale dispersione sia maggiore rispetto all'effetto legato alla variazione dei parametri di processo.

Considerando che il materiale base è caratterizzato da una durezza media di circa 170 HV, è evidente come sia presente nella zona in prossimità dei fori caratterizzata da un incremento significativo di durezza a seguito della lavorazione laser e quindi del ciclo termico imposto.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato investigato il processo di microforatura laser, effettuato con una sorgente laser in fibra pulsata ai nanosecondi, su titanio commercialmente puro. È stata data inoltre particolare enfasi allo studio dell'effetto della lavorazione laser

sulla geometria dei fori e sulla microstruttura del materiale. In particolare, i principali risultati ottenuti possono essere riassunti come segue:

- Il laser in fibra pulsato ai nanosecondi è una sorgente laser innovativa per la realizzazione di fori di dimensioni contenute e caratterizzati da un elevato rapporto di forma; i fori mostrano una certa quantità di bava e gocce di materiale fuso nella zona di ingresso mentre l'uscita appare essere esente da bava.
- L'effetto dell'energia e della frequenza di ripetizione degli impulsi laser è stato studiato sulle grandezze di qualità di fori passanti. Sia i diametri dei fori sia l'estensione della bava in ingresso risultano essere influenzate dai parametri di processo investigati con un andamento logaritmico. Al contrario, l'aspetto dei fori sia di ingresso che di uscita non risulta essere influenzato in modo significativo dai parametri studiati.
- Sono state messe in evidenza delle modifiche a livello microstrutturale del materiale in corrispondenza della zona lavorata laser; l'estensione della zona termicamente alterata è nell'ordine di circa 20 µm. Tale modifica strutturale è stata osservata in corrispondenza della zona maggiormente influenzata dall'azione del fascio laser, ovvero l'ingresso dei fori. Ciò significa che la stima della dimensione di tale zona può es-

sere considerata per eccesso.

- Misure di nanodurezza sono state realizzate sulle sezioni trasversali dei fori per confermare la presenza di una zona alterata dall'azione del fascio laser durante la realizzazione dei fori. Tali misure hanno messo in evidenza un significativo aumento della durezza del materiale in prossimità dei fori, indicando quindi la presenza di un ciclo termico di notevole drasticità che ha portato ad una modifica microstrutturale rispetto al materiale base. E' necessario però sottolineare il fatto che tale zona modificata è estremamente limitata e ciò consente di affermare che tale lavorazione laser risulta essere estremamente selettiva apportando alterazioni termiche del tutto trascurabili per la gran parte delle applicazioni ipotizzabili per questi processi.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Dr. S. Farè per la preparazione delle lamine di titanio ed il Sig. F. Pagano per le misure di nanodurezza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E.O. Ezugwu, Z.M. Wang. Titanium alloys and their machinability. *J. Mater. Proc. Techn.* 68 (1997) 262-274.
- [2] I.A. Almeida, W. De Rossi, M.S.F. Lima, J.R. Berretta, G.E.C. Nogueira, N.U. Wetter, N.D. Vieira. Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd:YAG laser parameters. *J. Mater. Proc. Techn.* 179 (2006) 105-110.
- [3] S.S. Kudesia, P. Solana, W.S.O. Rodden, D.P. Hand, J.D.C. Jones. Appropriate regimes of laser drilling models containing melt eject mechanisms. *J. Laser Appl.* 14 (2002) 159-164.
- [4] B.S. Yilbas. Parametric study to improve laser drilling process. *J. Mater. Proc. Techn.* 70 (1997) 264-273.
- [5] S. Badyopadhyay, H. Gokhale, J.K.S. Sundar, S. Sundararajan, S.V. Joshi. A statistical approach to determine process parameter impact in Nd:YAG laser drilling of IN718 and Ti-6Al-4V sheets. *Opt. and Lasers in Engng.* 43 (2005) 163-182.
- [6] Y.S. Tian, C.Z. Chen, S.T. Li, Q.H. Huo. Research progress on laser surface modification of titanium alloys. *Appl. Surf. Sci.* 242, (2005) 177-184.
- [7] Z. Sun, I. Annergren, D. Pan, T.A. Mai. Effect of laser remelting on the corrosion behaviour of commercially pure titanium sheet. *Mater. Sci. Engng.* A345 (2003) 293-300.
- [8] J.H. Klein-Wiele, J. Bekesi, P. Simon. Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses. *Appl. Phys. A* (2004) 775-778.
- [9] C. Hallgren, H. Reimers, D. Chakarov, J. Gold, A. Wennerberg. An in vivo study of bone response to implants topographically modified by laser micromachining. *Biomater.* 24 (2003) 701-710.
- [10] C. Liang, H. Wang, J. Yang, Y. Yang, X. Yang. Surface modification of CP-Ti using femtosecond laser micromachining and the deposition of Ca/P layer. *Mater. Letters* 62 (2008) 3783-3786.
- [11] S. Bandyopadhyay, J.K. Sarin, Sundar, G. Sundararajan, S.V. Joshi. Geometrical features and metallurgical characteristics of Nd:Yag laser drilled holes in thick IN718 and Ti-6Al-4V sheets. *J. Mater. Proc. Techn.* 127 (2002) 83-95.
- [12] S. Bruneau, J. Hermann, G. Dumitru, M. Sentis, E. Axente. Ultrafast laser ablation applied to deep-drilling of metals. *Appl. Surf. Sci.* 248 (2005) 299-303.
- [13] X. Zhu, A.Y. Naumov, D.M. Villeneuve, P.B. Corkum. Influence of laser parameters and material properties on micro drilling with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. A* 69 (1999) s367-s371.
- [14] E. Capello, E. Gariboldi, B. Previtali, P. Bassani, E. Gallus, L. Longoni. Relevant geometric features in the percussion laser microdrilling of different alloys. 7. Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (Esda 2004), Manchester UK, 19-22 July 2004.
- [15] C.A. Biffi, B. Previtali. Characterization of pulsed fiber laser during titanium microdrilling. *Journal of Optoelectronic and Advanced Materials-Symposia*, 2009, 1,4: 650-657.
- [16] C.A. Biffi, B. Previtali. Spatter reduction during titanium microdrilling using pulsed fiber laser. *Proc. Of ICALEO, 27 th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics*, Temecula, California, Usa, 2008, Laser Microprocessing Conference, M106: 27-36.
- [17] ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering, vol. 6 (1993) ASM Int. Publisher.
- [18] M. Baumeister, K. Dickmann, A.P. Hout, Combining high-speed laser performance and cold roll forming for the production of biomedical micro-filtration membranes, *Proceedings of ICALEO* (2005) 249-253.
- [19] J.R. Dilwith, W.R. Harp, J.F. Tu, Feasibility study of laser ablation using long-pulsed, 300W, CW single-mode fiber laser, *Proceedings of ICALEO* (2005) 58-67.
- [20] J. Meijer, K. Du, A. Gilner, D. Hoffmann, V.S. Kovalenko, T. Masuzawa, A. Ostendorf, R. Poprawe, W. Schulz. Laser machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photonics. *CIRP Annals, Manufacturing Technology*. 2002, 51, 2:531-550.

Abstract

Laser microdrilling of titanium: investigation of the process and evaluation of its effect on material microstructure

Key Words:

Titanium and alloys, solidification, laser percussion microdrilling, metallography

Laser micromachining are becoming a relevant topic in industrial applications, mainly thanks to the continuous evolution of the laser sources. The thermal damages on the material, after to be laser processed, is a fundamental aspect as a result of the machining. For this reason, laser sources, which are able to minimize the heat introduced inside the workpiece during the process, are considered very suitable for their applications in industrial cases. In this context the introduction of pulsed fiber lasers, which are applied to perform material microprocessing, have to be put in evidence. These are innovative laser sources, which are very interesting to be applied for high precision machining of small features, thanks to their positive characteristics, such as high beam quality, high focusability, high productivity and reliability. Consequently, the study and the evaluation of their performances in material microprocessing can be considered as a relevant topic of the last years for both academic and industrial researches.

In this work a study on laser percussion microdrilling on 0.5 mm thick commercially-pure titanium sheets with a nanosecond pulsed fiber laser was investigated. The work was aimed at investigating the effect of the main process parameters (pulse energy and pulse frequency) on the quality features of the machined through holes (mean diameters, aspects and area of top spatter) and at evaluating the effects of laser machining on material microstructure by means of nanohardness measurements around the machined holes. Regressive models of the investigated hole quality features and the dimension of the thermal affected zone were proposed. Besides cross sections of the holes performed in two process conditions were considered in order to evaluate the inner shape of the holes and the thermal effect of the laser micromachining process.