

La microforatura laser del titanio

C. A. Biffi, B. Previtali

In questo articolo si riportano alcuni tra i principali risultati relativi al processo di foratura laser di titanio. A seguito dello stato dell'arte relativo a questa tematica, sono stati definiti tre argomenti di approfondimento. Nella prima parte si riporta uno studio riguardo il processo di foratura laser di titanio commercialmente puro con sorgente laser ai nanosecondi per identificare le principali caratteristiche del processo e del danneggiamento termico del materiale; nel secondo caso si mettono invece a confronto due tipologie di titanio, sottoposti a diversi processi di laminazione, per mostrare come differenti microstrutture iniziali possano essere danneggiate termicamente, mostrando variazioni microstrutturali e meccaniche dipendenti sia dal processo termico sia dello stato del materiale iniziale. Infine, vengono riportati alcuni risultati relativi alla foratura laser con impulsi ultracorti, che consentono di ridurre i danneggiamenti termici, oltre che di aumentare il livello di precisione della lavorazione.

PAROLE CHIAVE: FORATURA LASER - TITANIO - CARATTERIZZAZIONE

INTRODUZIONE

È ben noto che il titanio e le sue leghe, caratterizzati da bassa rigidità, buona resistenza alla corrosione e elevata biocompatibilità, 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 ritorno elastico [1].

Carlo Alberto Biffi

*Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Istituto per l'Energetica e le Interfasi,
Unità di Lecco, C.so Promessi Sposi 29, 23900 Lecco*

Barbara Previtali

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica,
Via La Masa 1, 20156 Milano*

In collaborazione con Aitem- Promozione L@ser

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 lamiere [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].

Il processo di foratura laser su materiali metallici è un processo di tipo termico, generato dall'interazione tra il fascio laser ed il materiale che deve essere lavorato. L'energia del fascio laser concentrata su spot laser molto piccoli raggiunge valori di irradianza (densità di potenza per unità di superficie) tali per cui il materiale colpito dal fascio laser viene riscaldato, fuso e vaporizzato.

Il processo di foratura avviene con laser che operano principalmente a regimi pulsati mentre dal punto di vista del metodo esistono diverse modalità di foratura (vedi Figura 1):

- Foratura diretta attraverso uno o più impulsi laser: la dimensione del foro dipende dall'energia in ingresso e dalla posizione del fuoco (si parla rispettivamente di foratura al volo oppure per percussione). Generalmente, per ottenere un foro con un unico impulso, l'energia in gioco deve essere elevatissima. Per ottenere un foro profondo è più facile utilizzare una serie di impulsi relativamente poco energetici invece di un unico impulso molto energetico; così facendo l'inclinazione delle pareti del foro sarà molto più limitata. Per entrambe le modalità non c'è moto relativo tra pezzo e fascio laser.
- Tecnica di trapanatura convenzionale (trepanning) per ottenere fori di dimensione più grande dei precedenti: il processo

è molto simile ad un taglio in quanto compare un moto relativo tra fascio laser e materiale da processare. La traiettoria parte dal centro del foro e poi si allarga verso la circonferenza del foro da realizzare. In genere la profondità del foro è minore rispetto a quella ottenibile con i metodi precedenti. In questo caso è possibile ottenere fori con una geometria qualsiasi e non solo circolare come nelle due modalità precedenti, in quanto la forma del foro dipende dal percorso fornito al fascio laser.

I vantaggi di tale tecnica sono una buona qualità dimensionale e metallurgica (ridotto strato di materiale risolidificato) e un facile controllo della dimensione: il foro infatti risulta essere cilindrico e la sua dimensione controllata dalla traiettoria relativa tra fascio laser e pezzo.

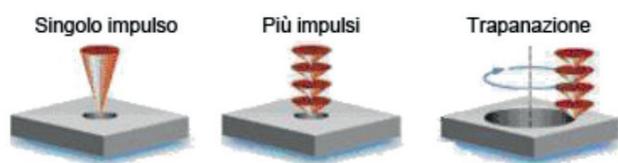


Fig. 1 - Tecniche di foratura mediante la tecnologia laser
Different methods in laser drilling process.

I vantaggi della foratura laser sono i seguenti:

- assenza di contatto tra l'utensile e il pezzo, quindi non è presente usura e rottura dell'utensile come avviene nelle forature tradizionali
- posizionamento dei fori molto più preciso con un allineamento ottico
- realizzazione di fori con elevato rapporto profondità/diametro
- lavorazione di una grande quantità di materiali ad elevata durezza
- breve durata del tempo di foratura
- realizzazione di fori con particolari angoli di ingresso
- bassi costi operativi
- automazione favorita dalla flessibilità del processo

Gli svantaggi sono i seguenti:

- costo elevato del sistema laser
- rischio di un'inclinazione delle pareti del foro dovuta allo spessore
- difficile ottenimento di un foro cieco con una precisa profondità
- limite massimo di spessore forabile
- asportazione, al termine della foratura, del materiale risolidificato

Le caratteristiche di qualità di un foro sono le seguenti (vedi Figura 2):

- diametro e profondità: il limite sul rapporto di forma di un foro dipende dalle caratteristiche ottiche del fascio laser e dalle proprietà ottiche e termiche del materiale; fasci ben focalizzati, con un piccolo angolo di convergenza, presentano un'elevata profondità di campo, quindi si possono produrre fori con un elevato rapporto di forma. Esiste una limitazione

sulla profondità del foro al crescere del diametro del foro stesso. La profondità del foro è influenzata dall'effetto di riflessioni del fascio laser all'interno della cavità che si sta generando.

- Inclinazione delle pareti del foro e cilindricità: l'inclinazione è un risultato dell'erosione causata dall'espulsione di materiale fuso e vaporizzato dal foro. In genere l'inclinazione decresce al crescere dello spessore da forare, ma tale andamento può essere controllato con la durata dell'impulso, con l'energia e il numero di impulsi. In genere, più corto è l'impulso, maggiore è l'inclinazione della parete del foro. L'inclinazione è misurata come variazione dei diametri e rapportata allo spessore. La cilindricità è generata dall'eiezione di materiale che erode le pareti del foro. Essa può essere ridotta con la diminuzione della pressione del gas e cresce con il crescere dello spessore, a causa della pressione che si genera.
- Strato risolidificato e microcricche: il materiale fuso o vaporizzato che non è stato del tutto allontanato dalla zona di lavorazione si solidifica e generalmente è presente nella zona di ingresso del foro. Ovviamente è un danno di tipo termico che modifica le proprietà del materiale base, portando eventualmente alla formazione di microcricche. Lo strato risolidificato può essere ridotto scegliendo opportunamente le energie in gioco in modo da favorire l'allontanamento del materiale fuso e vaporizzato. Le microcricche possono essere ridotte utilizzando durate degli impulsi brevi e frequenze ridotte che diminuiscono il surriscaldamento locale del materiale.
- Angolo di ingresso: è possibile forare, utilizzando la tecnologia laser, con angoli di ingresso differenti senza alcun tipo di problema, mentre con le tecnologie tradizionali questa operazione è molto difficoltosa. Nel caso in cui si effettuasse la foratura laser con un angolo diverso dall'inclinazione verticale del fascio si dovrebbe incrementare la potenza o migliorare la qualità del fascio, in quanto la densità energetica diminuirebbe a causa di un'area di contatto maggiore.
- Tempo di foratura: legato alla velocità di processo ha una diretta ricaduta sull'economia della lavorazione. L'impiego di impulsi più energetici porta ad incrementare la velocità di foratura.

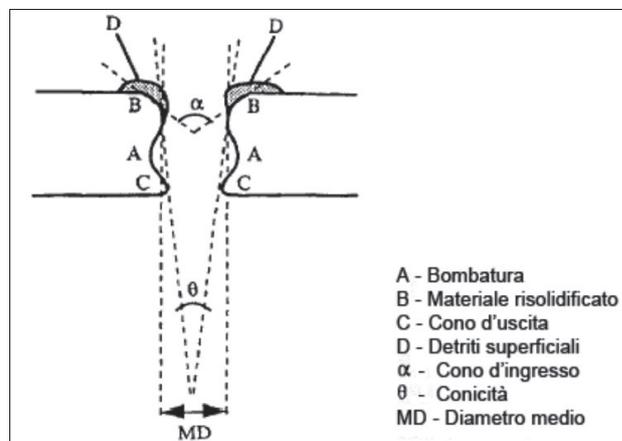


Fig. 2 - Caratteristiche di un foro eseguito con la tecnologia laser.
Main characteristics of a laser drilled hole

La letteratura sulla microforatura laser di titanio

La microforatura laser su titanio è stata investigata in diversi lavori con lunghezze degli impulsi laser lunghe (regime dei millisecondi) corte (dai micro ai picosecondi) e ultracorte (regime dei femtosecondi). Molti di questi lavori utilizzano un approccio sperimentale allo scopo di identificare l'effetto dell'ampiezza dell'impulso sulle caratteristiche di qualità dei fori realizzati, come ad esempio il diametro, la circolarità e la quantità di bava prodotta. In aggiunta alla lunghezza dell'impulso è investigata l'influenza della lunghezza d'onda di emissione. Questi lavori sottolineano che l'effetto termico è uno dei fattori più critici: tale aspetto è principalmente legato alla durata dell'impulso laser [17]. La foratura laser di titanio produce un'elevata quantità di fuso e di materiale risolidificato che influiscono negativamente sulla qualità del foro. La quantità di materiale fuso e più in generale il danneggiamento termico sono altamente influenzati dall'ampiezza dell'impulso. Allo scopo di ottenere un'ablazione non termica vengono utilizzate lunghezze d'onda nel campo dell'ultravioletto e impulsi laser ultracorti, nel campo dei femto o picosecondi.

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 confronto 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, 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 [18].

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 TiO_2 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].

Primo caso di discussione: microforatura di titanio con laser ai nanosecondi

In Figura 3 vengono presentati alcuni esempi di come si presentano i fori, eseguiti mediante il processo di foratura laser in 2 condizioni di processo diverse: energia pari a 0.5 mJ a 20 kHz e 1.2 mJ a 50 kHz. Il materiale studiato è titanio grado 2 di spessore pari a 0.5 mm. Data l'elevata reattività del titanio, è stato utilizzato argon come gas di assistenza; la pressione del gas, pari a 5 bar, è stata invece scelta in modo tale da poter allontanare il materiale rimosso dal fascio laser.

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) [17], 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: tale danneggiamento è esemplificato dall'ingrandimento mostrato in Figura 4.

Al contrario, il foro di uscita non presenta materiale fuso e quindi è esente da bava [19-20].

Il vantaggio legato all'uso di impulsi ai nanosecondi è l'elevata produttività di processo: infatti, il singolo foro viene realizzato in meno di 0.005 secondi, nella condizione di processo utilizzata [19-20].

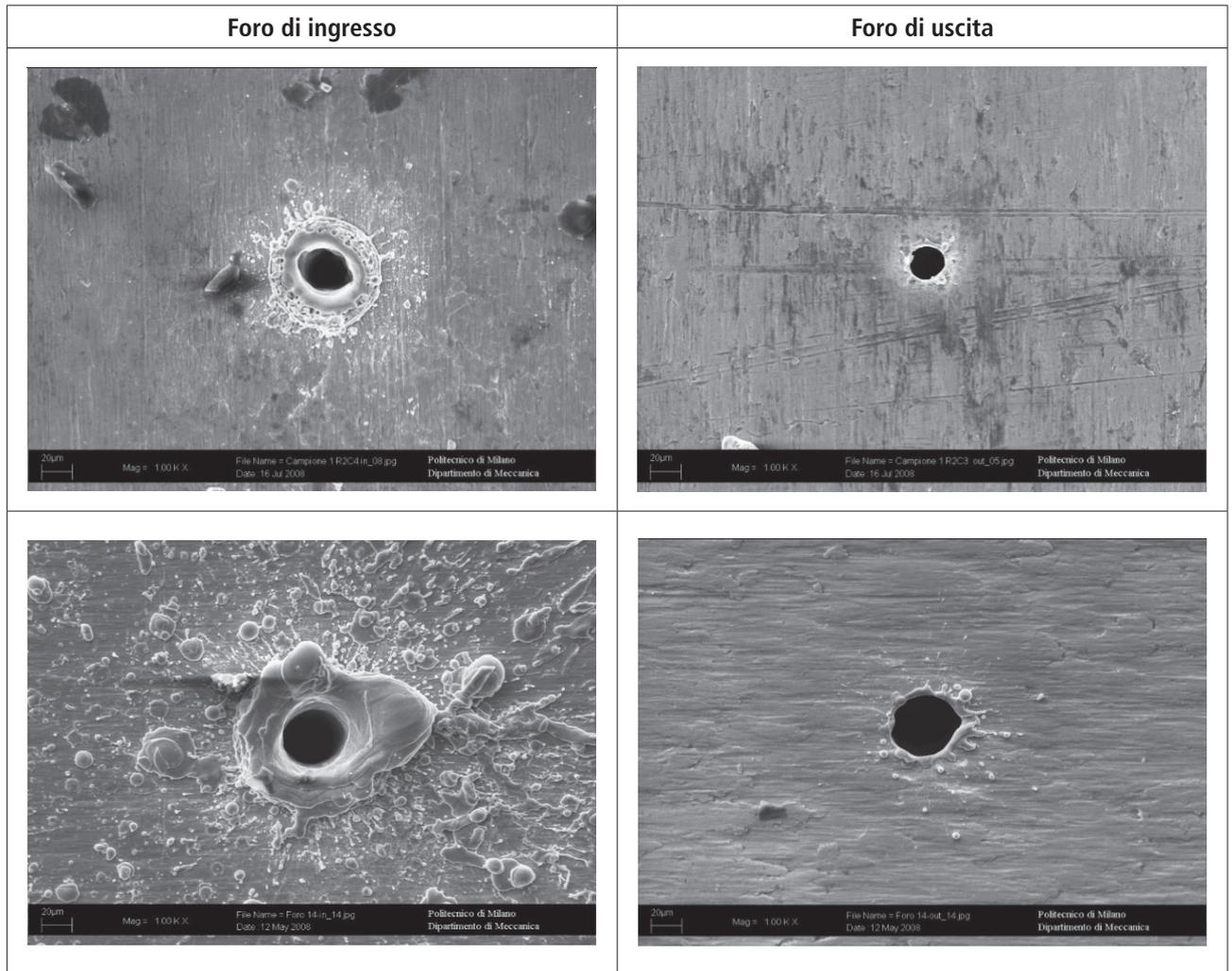


Fig. 3 - Esempi di alcuni fori con ingresso ed uscita a diverse condizioni: bassa energia (prima riga) ed alta energia (seconda riga)
Representative examples of entrance and exit surfaces of laser drilled holes: low energy (first row) and high energy (second row).

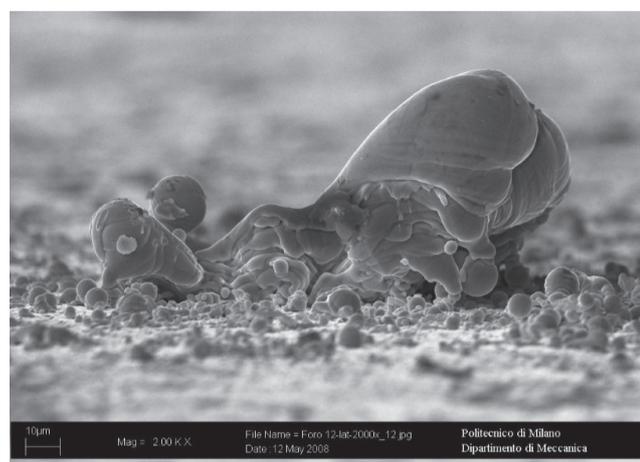


Fig. 4 - Vista laterale del cono di materiale fuso, posizionato sulla superficie di ingresso del foro
Lateral view of the cone of melted materiale deposited, placed on the upper surface

Le analisi successive sono state eseguite su fori laser effettuati in solo argon. Sono state ricavate le corrispondenti sezioni trasversali dei fori, come mostrato in Figura 5. 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. La parete interna del foro realizzato nella condizio-

ne 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 6-7 sono riportate le immagini a maggiori ingrandimenti della microstruttura del materiale in prossimità della parete dei fori nelle due condizioni di processo investigate sulla sezione trasversale dei fori.

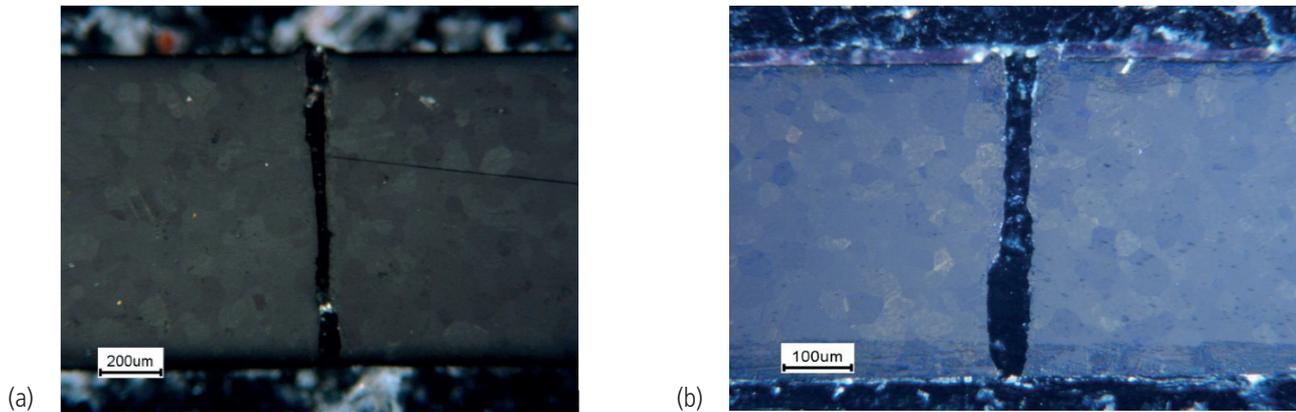


Fig. 5 - Sezione trasversale dei fori realizzati nelle condizioni di processo a bassa (a) ed alta (b) energia
Cross section of the laser drilled holes, performed with low (a) and high (b) energy

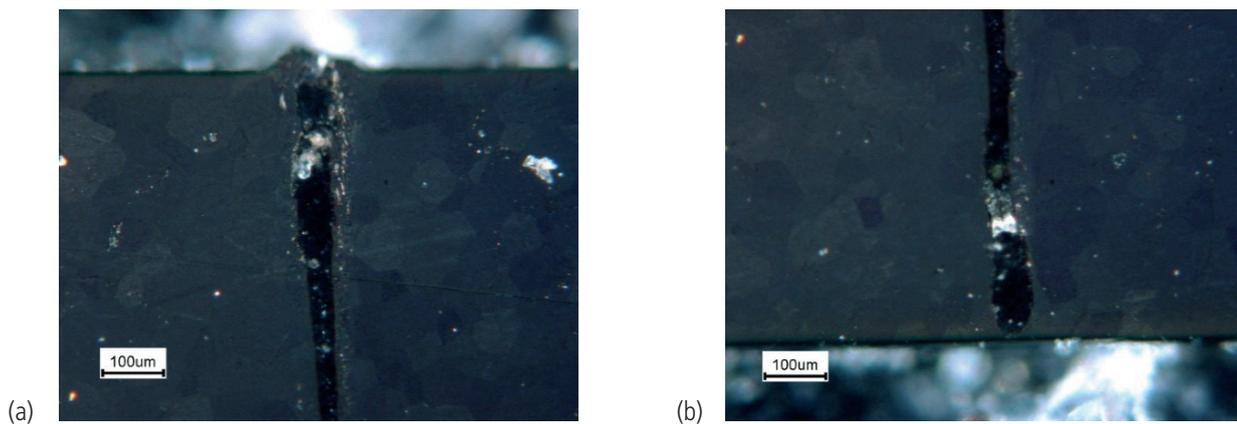


Fig. 6 - Ingrandimento della sezione trasversale in corrispondenza della zona di ingresso (a) e di uscita (b) del foro realizzato nella condizione di processo di minima energia
Magnifications of the cross section in proximity of the entrance (a) and exit (b) section of the hole, performed with low energy

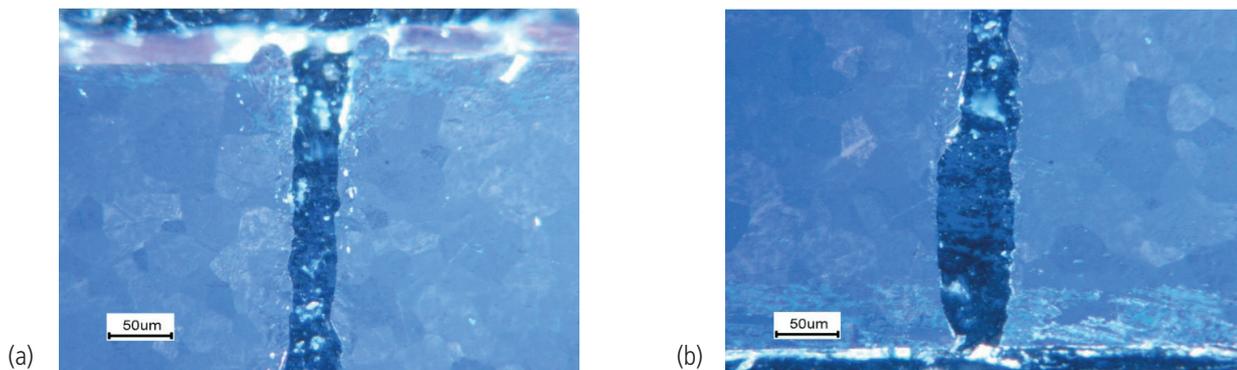


Fig. 7 - Ingrandimento della sezione trasversale in corrispondenza della zona di ingresso (a) e di uscita (b) del foro realizzato nella condizione di processo di massima energia
Magnification of the cross sections in proximity of the entrance (a) and exit (b) section of the hole, performed with high energy

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 6(a)-7(a), rispetto a quelli del materiale base. L'estensione di tale zona termicamente alterata può essere stimata di circa 20 μm 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.

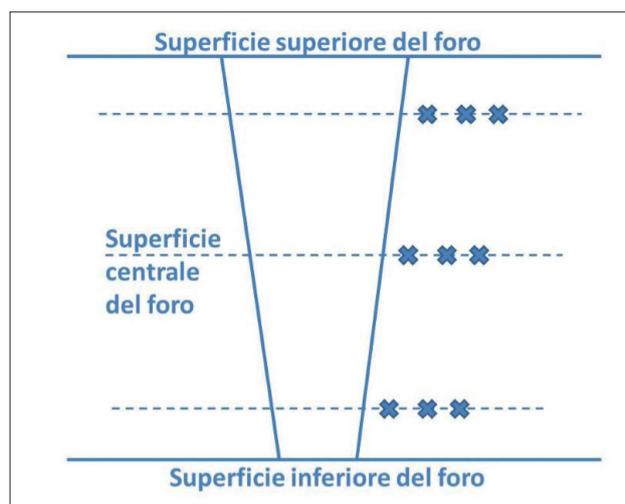
Verso la zona di uscita, come mostrato in Figura 6(b)-7(b), al contrario non appare visibile una alterazione microstrutturale evidente, probabilmente per il fatto che tale zona è stata soggetta ad un ciclo termico meno violento rispetto alla zona di ingresso dei fori in quanto il tempo di esposizione al fascio laser è stato minore e l'azione del gas di assistenza è stata sicuramente meno efficace in termini di raffreddamento del pezzo.

Un'indiretta indicazione della modifica della microstruttura del materiale è stata ottenuta effettuando misure di nanodurezza in corrispondenza dei fori sia sulla sezione trasversale sia sulla

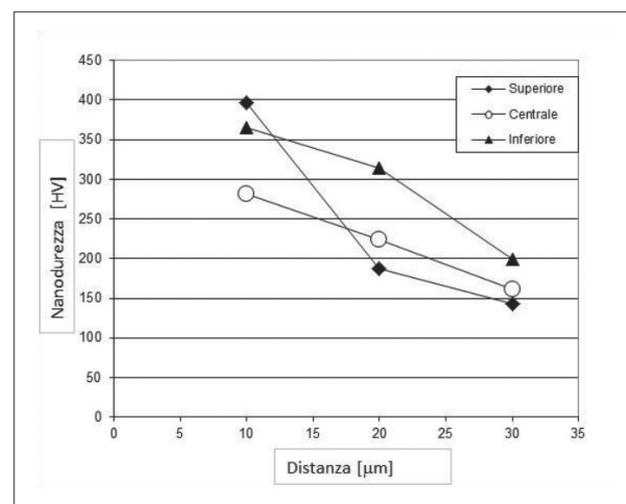
superficie di ingresso ed uscita. In tal caso, è stato possibile valutare in modo estremamente localizzato il valore di durezza del materiale, in quanto le dimensioni delle impronte realizzate erano molto contenute grazie ai carichi molto ridotti, come mostrato in Figura 8. Deve essere considerato nell'analisi 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.

In Figura 8 è riportato lo schema con cui sono state effettuate le prove di nanodurezza con i rispettivi valori misurati, espressi in Vickers, sulla sezione trasversale del foro realizzato con alta energia ad una distanza una dall'altra di circa 20 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.



(a)



(b)

Fig. 8 - 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 values, measured on the cross section of the holes, performed with low (a) and high (b) energy

Secondo caso di discussione: microforatura di titanio nanostrutturato con laser ai nanosecondi

Tali effetti di natura termica diventano maggiormente rilevanti quando aumenta lo spessore da lavorare, in quanto è richiesta un'energia superiore fornita dal fascio laser, e quando si lavorano materiali con microstrutture differenti.

Nella successiva parte sarà illustrato il confronto tra fori realizzati, a parità di parametri di processo, su titanio grado 2 nanostrutturato [21] e l'analogo tradizionale, entrambi di spessore

pari a 0.75 mm [22]: la nanostrutturazione del materiale è stata eseguita mediante un processo di laminazione asimmetrico.

La Figura 9 illustra le immagini dei fori di ingresso e di uscita sulle due tipologie di titanio; sia dal punto dimensionale dei fori sia dal punto di vista della quantità di bava generata all'ingresso dei fori, non si notano differenze sostanziali, quindi si può ipotizzare che i due materiali possono essere forati mediante fascio laser senza dover modificare i parametri di processo e quindi con prestazioni analoghe del processo di foratura laser.

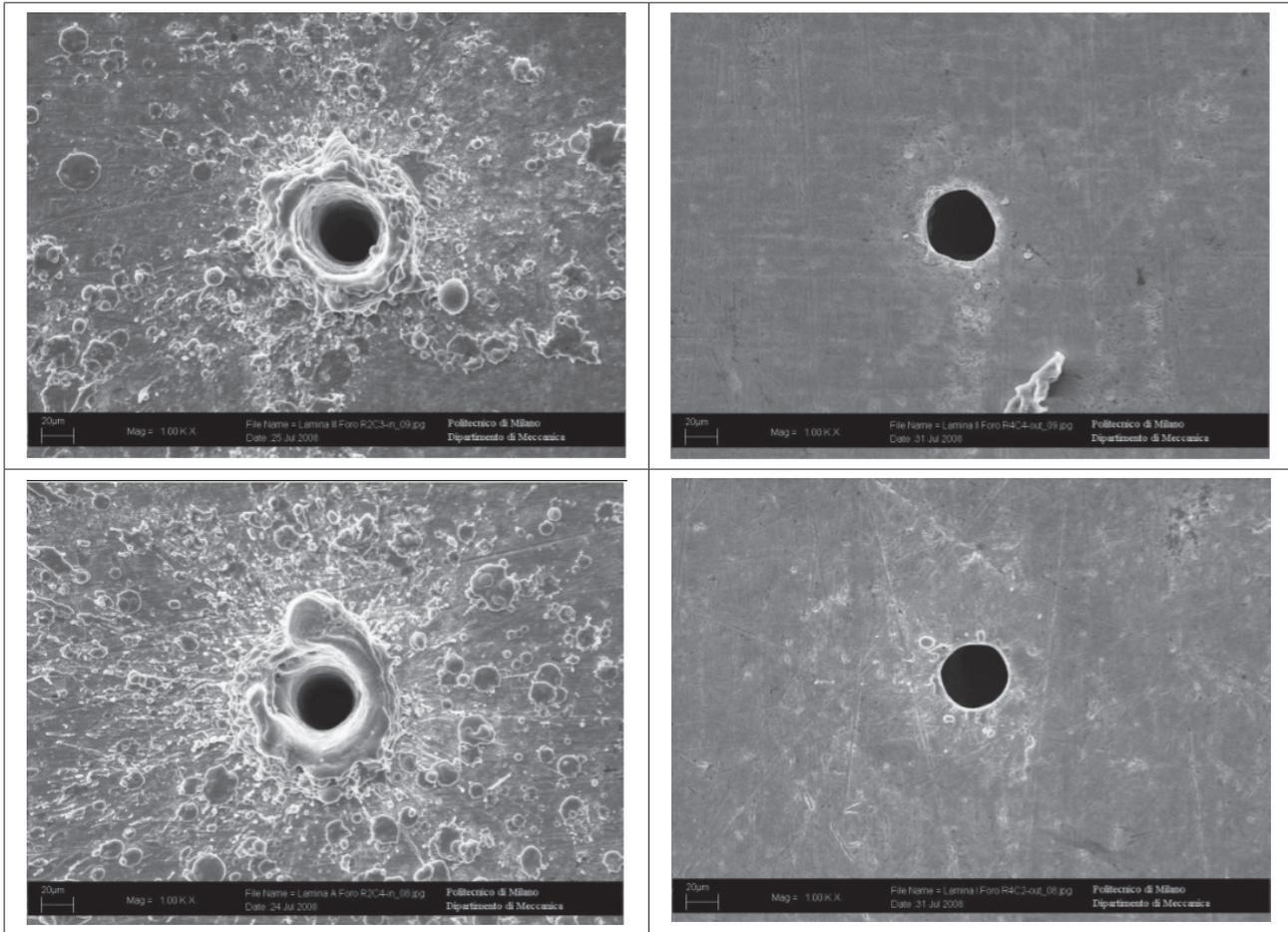


Fig. 9 - Foro di ingresso (dx) e di uscita (sx) su titanio nanostrutturato (prima riga) e tradizionale (seconda riga)
Entrance (on the left) and exit (on the right) hole surfaces machined on nanostructures (first row) and on conventional (second row) titanium

Passando all'analisi metallografica della sezione dei fori di Figura 8, si osservano delle differenze sulla microstruttura. In Figura 10 si osserva la zona dei fori in prossimità dell'ingresso del foro, attraverso il quale tutta l'energia del fascio laser è transitata fino ad attraversare tutto lo spessore della lamiera. Entrambi i campioni di titanio mostrano una microstruttura con grani orientati

lungo la direzione di conduzione di calore in prossimità del foro, dato che l'impulso laser ha portato alla fusione del materiale e quindi la lavorazione porta a modificare termicamente il materiale. La zona fusa di Figura 10(a) mostra una microstruttura con grani apparentemente più grandi rispetto a quelli del materiale base in quanto quest'ultimo è nanostrutturato.

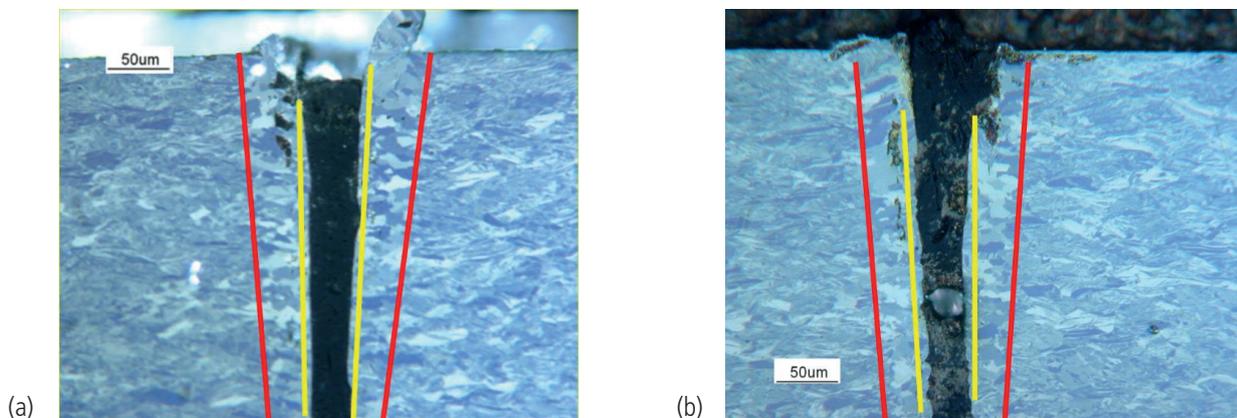


Fig. 10 - Sezione trasversale dei fori con indicazione della ZF (linea gialla) e della ZTA (linea rossa):
 titanio nanostrutturato (a) e titanio tradizionale (b)

*Cross section of the holes, reporting the extensions of the melted zone (yellow line) and of the heat affected zone (red line):
 nanostructured (a) and conventional (b) titanium.*

Tab. 1 - Valori di nanodurezza misurati sulle sezioni dei fori di Figura 10
Nanohardness values measured on the cross sections shown in Figure 10.

Materiale	Regioni	Estensione[μm]	Durezza [HV]
Titanio laminato asimmetrico	Zona fusa	5-10	400
	Zona termicamente alterata	30	170
	Materiale base	-	230
Titanio laminato simmetrico	Zona fusa	5-10	400
	Zona termicamente alterata	20	200
	Materiale base	-	170

Al contrario, la zona fusa nel campione di titanio tradizionale mostra un affinamento del grano cristallino, in quanto il ciclo termico indotto dal fascio laser, rapido per definizione, non porta ad un accrescimento del grano come è invece successo nei trattamenti termici impiegati nel processo di laminazione del materiale di partenza (vedi Figura 10(b)).

Come proposto in precedenza, profili di nanodurezza hanno consentito di stimare l'estensione della ZF e della zona termicamente alterata. I valori di nanodurezza misurati per entrambi i materiali sono riportati in Tabella 1.

Si nota come la zona fusa abbia sia la stessa estensione che lo stesso valore di durezza (circa 400 HV) mentre la zona termicamente alterata risulta essere più estesa per il titanio nanostrutturato (30 μm) rispetto a quello tradizionale (20 μm); questo indica come la conduzione del fronte termico abbia eseguito un trattamento termico indesiderato più intenso sul titanio nanostrutturato. Inoltre, anche il valore di durezza misurato è diverso, in relazione alla microstruttura di partenza.

Questo differente comportamento tra due tipologie diverse di titanio sottolinea come le proprietà del materiale di partenza siano parametri significativi nel modificare la risposta del materiale, quando si deve valutare l'effetto di una lavorazione termica.

Terzo caso di discussione: microforatura di titanio con impulsi laser ultracorti

A seguito di quanto riportato in precedenza, una delle maggiori problematiche riguardanti il processo di foratura laser del titanio, ma in generale dei materiali metallici, è la conduzione di calore che porta al danneggiamento termico e quindi ad una variazione della microstruttura e di tutto ciò che ne consegue.

Dal punto di vista fisico, il problema è limitare la conduzione di calore nel materiale circostante alla zona lavorata dal fascio laser: esistono alcune soluzioni tecniche, tra cui la deposizione di film di materiale polimerico che viene rimosso successivamente

al processo di foratura, asportando così il materiale fuso depositato [23] oppure mediante l'impiego di ugelli progettati ad hoc [24], anche se questo limita la flessibilità del processo laser.

La soluzione identificata maggiormente utilizzabile a livello industriale è quella di utilizzare degli impulsi laser molto corti (così detti ultracorti), che siano più brevi del tempo minimo richiesto per fare avvenire la propagazione dell'onda termica nel materiale. Impulsi laser di durata inferiore a 1 picosecondo, ovvero nell'intervallo dei femtosecondi (1 femtosecondo sono 10^{-15} secondi), consentono di vaporizzare direttamente il materiale, limitando la sua liquefazione: questo fatto dipende dalle elevate potenze di picco raggiungibili in istanti temporali molto brevi.

Il risultato può essere riconducibile fori, come quelli mostrati in Figura 11. In particolare, vengono mostrate due immagini delle superfici di ingresso di fori realizzati con laser ai femtosecondi. Le potenzialità di questa tecnologia sono evidenti: la superficie di ingresso, che è quella critica in foratura laser, è di fatto esente o quasi da materiale fuso: questo fatto dipende dalla vaporizzazione quasi completa del materiale asportato durante la generazione del foro. Questo fatto porta ad una riduzione della zona danneggiata dal calore e quindi una maggior precisione della lavorazione.

Nelle due immagini di Figura 11 si mette in evidenza anche l'effetto della tecnica di foratura. Infatti, il foro mostrato in Figura 11a è stato realizzato mediante la tecnica a percussione, in cui un treno di impulsi asporta il materiale. La circolarità del foro non è di elevata qualità, in quanto dipende dalla forma del fascio laser. Al contrario, il foro di Figura 11b è stato realizzato secondo la tecnica per trepanning, in cui il fascio laser è messo in moto relativo rispetto alla superficie del componente; in questo secondo caso la circolarità è maggiore, oltre il grado di precisione e di pulizia, in quanto la forma del foro dipende maggiormente dalla precisione del sistema di movimentazione rispetto alla forma del fascio laser incidente.

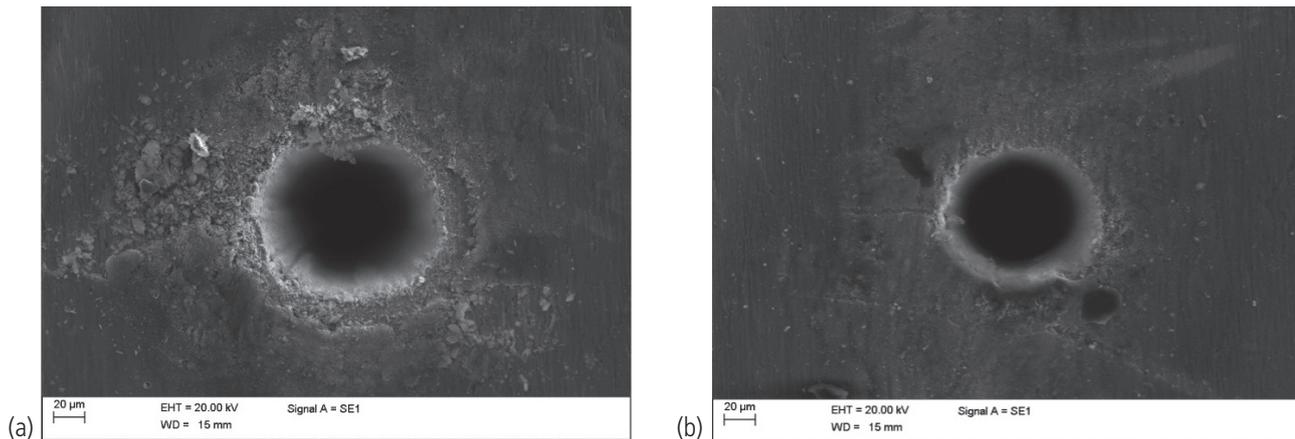


Fig. 11 - Immagini SEM della superficie di ingresso di fori realizzati con impulsi laser ultracorti con due tecniche diverse: foratura a percussione (a) e per trepanning (b)
SEM images of the entrance holes, machined using ultrashort laser pulses by percussion (a) and trepanning (b) drilling.

CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati presentati alcuni risultati significativi relativi al processo di microforatura laser su titanio commercialmente puro ed alla caratterizzazione dell'effetto del fascio laser sul materiale.

Dopo aver il punto della situazione sullo stato dell'arte dell'argomento in questione, sono stati riportati tre casi significativi di foratura laser di titanio, mettendo in evidenza le principali peculiarità di questa tecnica di lavorazione non convenzionale e le più importanti modifiche alla microstruttura del materiale danneggiato dal calore generato nel corso della lavorazione. Tale panoramica ha consentito di mettere in evidenza come siano possibili soluzioni tecniche (ad esempio, sorgenti laser diverse) e condizioni operative (come lo stato iniziale del materiale) ben distinte tra loro, in grado di offrire prestazioni sensibilmente diverse dal punto di vista sia tecnologico che dal punto di vista della risposta del materiale a seguito della lavorazione laser.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare Maurizio Vedani e Nora Lecis del Politecnico di Milano per la collaborazione nell'analisi metallografica dei campioni e Giuseppe D'Amelio e Davide Cravioli di Optoprim srl per la collaborazione nell'esecuzione dei test di microforatura con laser ai femtosecondi.

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. Eng. 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. Ultra-fast 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 Opto-electronic 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, 27th International Congress on Applications of Lasers and Electro-optics*, Temecula, California, Usa, 2008, Laser Microprocessing Conference, M106: 27-36.
- [17] 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.
- [18] *ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering*, vol. 6 (1993) ASM Int. Publisher.
- [19] C.A. Biffi, N. Lecis, B. Previtali, M. Vedani, G. Vimercati, Microforatura laser di titanio: studio del processo e valutazione del suo effetto sulla microstruttura del materiale, *Metallurgia Italiana*, Numero 2, Febbraio, 2011, pp. 11-19.
- [20] C.A. Biffi, N. Lecis, B. Previtali, M. Vedani, G. Vimercati, Fiber laser microdrilling and its effect on material microstructure, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 51, Numbers 9-12, 983-994, DOI: 10.1007/s00170-010-2691-6, 2010.
- [21] C.A. Biffi, B. Previtali, Investigation of the hole shape in pulsed fiber laser microdrilling of nanostructured titanium, *Key Engineering Materials* Vol. 473 (2011) pp 999-1007, © (2011) Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028, ISSN 1013-9826.
- [22] Lecis, Previtali, Vedani, Biffi, Microforatura laser di leghe di titanio dopo laminazione tradizionale e asimmetrica a freddo, *Congresso nazionale AIM*, 7-9 Novembre, Trento, Italia, 2012.
- [23] Low DKY, Li L, Byrd PJ (2003) Spatter prevention during the laser drilling of selected aerospace materials. *J Mater Process Tech* 139:71-76.
- [24] C. A. Biffi, B. Previtali, Spatter reduction in nanosecond fiber laser drilling by means of an innovative nozzle, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: Volume 66, Issue 9 (2013), Page 1231-1245.

Laser drilling of titanium

KEYWORDS: LASER DRILLING - TITANIUM - CHARACTERIZATION

In this work some of the main results dealing with laser drilling of titanium are reported. After the presentation of the state of the art of the present issue, three specific cases were defined and discussed. In the first part the main results concerning the laser drilling using a nanosecond laser source was described, reporting the principal performances of the process as well as the heat damages of the material machined; in the second discussion a comparison among the properties of two titanium plates, having different initial microstructure,

was proposed: it was shown that different initial properties can affect significantly the final performances of the material machined, like the thermal process can do. Finally, the third discussion reports some preliminary results concerning the laser drilling with ultrashort pulses; here, the limitation of the thermal damages can be seen in the sensible reduction in the melted material produced and in improving the hole precision and quality.