

# EFFETTI DEL TAGLIO LASER SULLE PROPRIETÀ MECCANICHE DI LAMIERE IN ALLUMINIO

G. Scavino, S. Guelfo, F. D'Aiuto, M. Rosso

*La continua ricerca e l'impiego di tecnologie sempre più avanzate nel campo aeronautico ha portato all'adozione di metodologie laser per il taglio di pannelli in alluminio per le strutture esterne di aerei in alternativa alla già consolidata tecnica della tranciatura tramite punzonatrice meccanica. In mancanza di specifici riferimenti di questa tecnologia nelle norme e in bibliografia è stata valutata l'effettiva interscambiabilità delle due tecniche in termini di mantenimento delle proprietà meccaniche.*

*Si è pertanto effettuata l'analisi delle proprietà meccaniche statiche (trazione, bearing, microdurezza) di pannelli in lega di alluminio 6061 T6, comunemente impiegati nel settore aeronautico in special modo per i velivoli ultraleggeri. Da tali lastre sono stati ricavati, sia con il taglio laser che con la punzonatrice, i provini necessari ai test meccanici in modo da poter avere un confronto diretto tra le due tecniche. Si è inoltre valutato il comportamento a fatica assiale con  $R=-1$  di provini in lamiera 6082 T6 tagliati al laser e ottenuti tramite tranciatura con punzonatrice.*

*I risultati hanno evidenziato che il taglio laser può essere impiegato per la creazione di profilati metallici per l'impiego in aeromobili avendo però l'accortezza di programmare opportunamente il percorso del raggio laser durante il taglio evitando di iniziare dalle zone critiche della figura da realizzare.*

PAROLE CHIAVE: aluminium alloys plates, laser cutting, mechanical testing, fatigue

## INTRODUCTION

Lo sviluppo dei sistemi laser nel campo industriale negli ultimi anni ha apportato una rivoluzione nella lavorazione dei materiali. L'elevata densità di potenza nel fuoco del raggio laser a fascio riesce a fondere tutti i materiali in tempi ridottissimi senza contatto e trasporto di energia. Questo permette elevate velocità di lavorazione e un minimo apporto di calore sul pezzo.

Il taglio laser dei materiali è la più comune e diffusa applicazione dei laser di potenza. Durante il processo di taglio l'energia assorbita dal materiale nella zona in cui il fascio laser è focalizzato viene trasformata in calore. Questo calore provoca localmente un rapido aumento della temperatura del pezzo. La fusione e/o la vaporizzazione della zona di interazione determinano la formazione di un foro che può essere cieco o passante. Nel primo caso la rimozione del materiale avviene attraverso aspirazione di fumi e vapori prodotti, nel secondo caso, generalmente, l'espulsione del materiale è coadiuvata dall'azione di un gas di processo detto gas di assistenza. Se il

foro è passante la traslazione della sorgente laser rispetto al manufatto in lavorazione, genera la separazione dei pezzi. I maggiori vantaggi dell'impiego del taglio laser risultano essere:

- bordi di taglio stretti e paralleli
- zona termicamente alterata molto ridotta
- capacità di operare su profili complessi e con raggi di curvatura molto ridotti
- nessuna distorsione meccanica del pezzo
- capacità di taglio indipendente dalla durezza del materiale
- possibilità di tagliare materiali già rivestiti superficialmente
- facile integrazione in sistemi automatici capacità di adeguamento a mutate necessità produttive. L'ampiezza del taglio, la qualità delle superfici tagliate e l'aspetto delle pareti interne del taglio, dove si immagazzina la scoria dovuta al taglio stesso, sono determinate dalla scelta del laser, dalla qualità del raggio, dalla potenza erogata e dal tipo di movimentazione impiegata (del raggio, del pezzo da tagliare o combinata). Il riscaldamento, la fusione, e la vaporizzazione del materiale mediante la radiazione del laser dipendono dalla conduttività termica e dal calore specifico del materiale.

La velocità di riscaldamento è inversamente proporzionale al calore specifico per unità di volume, cosicché il fattore importante per il flusso di calore è la diffusività termica del materiale lavorato. Se questa è elevata si avrà eccessiva diffusione del calore all'interno del pezzo quindi ampia zona termica-

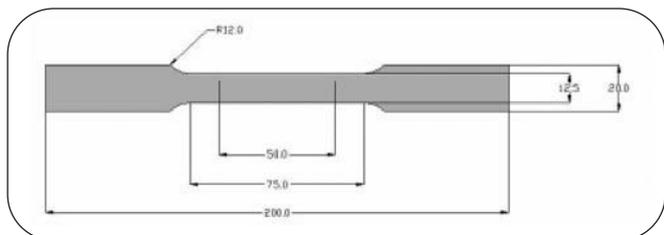
G. Scavino, S. Guelfo,  
F. D'Aiuto, M. Rosso  
Politecnico di Torino

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	altro
<b>6061</b>	0.4-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	0.15
<b>6082</b>	0.7-1.3	0.5 $\delta$	0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1	0.15

▲  
Tab. 1

**Composizione chimica delle leghe 6061 e 6082 secondo Aalco.**

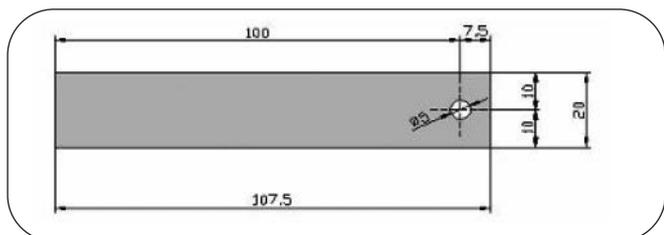
*Chemical composition of 6061 and 6082 aluminium alloys from Aalco data sheets.*



▲  
Fig. 1

**Disegno quotato provino per test di trazione (quote in mm).**

*Tensile test specimen technical drawing (dimensions in mm).*



▲  
Fig. 2

**Disegno quotato provino per test di bearing (quote in mm).**

*Bearing test specimen technical drawing (dimensions in mm).*

mente alterata. La larghezza della zona termicamente alterata è però anche legata alla velocità di taglio: maggiore è la velocità e minore sarà lo spessore della zona. Strettamente connessi con questo aspetto sono la conducibilità termica e il calore latente di fusione; in entrambi i casi è compito dell'operatore gestire in modo opportuno il macchinario di taglio, così da ottenere una lavorazione efficiente.

La stabilità della potenza laser, soprattutto nel breve periodo, ha un ruolo molto importante sulla qualità del taglio, in quanto influenza la levigatezza dei bordi che si possono ottenere.

Altro aspetto da tenere sotto controllo durante la lavorazione è la distanza tra la testa di focalizzazione e il pezzo da tagliare; se necessario, si ricorre a complessi e costosi sistemi automatici di controllo basati su sensori capacitivi [1].

Tale tecnologia è attualmente impiegata anche in campo delle costruzioni aeronautiche. Tuttavia, a causa della recente adozione, le rigide norme aeronautiche (es. MIL [2]) non contemplano ancora manufatti prodotti con l'ausilio del taglio a fascio laser. In particolare, non è ancora stata valutata l'effettiva equivalenza tra taglio meccanico e taglio con fascio laser soprattutto per quanto concerne le proprietà fisico meccaniche dei componenti. Pertanto, in questo lavoro, una serie di campioni di lega di alluminio 6061 T6 e 6082 T6, realizzati con le due metodologie di taglio, sono stati sottoposti a prove di

caratterizzazione morfologico-meccanica al fine di valutare le proprietà dei materiali dopo il riscaldamento indotto dal taglio con fascio laser.

### PARTE SPERIMENTALE

I materiali utilizzati per testare l'efficacia della metodologia laser in sostituzione alla punzonatrice meccanica per il taglio di lamiere di alluminio per applicazioni aeronautiche sono state la lega EN AW-6061 [Al, Mg, Si, Cu] e la lega EN AW-6082 [Al, Si, Mg, Mn] le cui composizioni chimiche rientrano nei limiti riportati in Tab. 1.

Tali leghe sono state sottoposte al trattamento termico T6 e sono state impiegate sotto forma di lamiere i cui spessori sono 0.8, 1.0, 1.2 e 1.6 mm per la 6061 e 3.0 mm per la 6082. La Tab. 2 indica le principali caratteristiche meccaniche riguardanti le lamiere e gli spessori sopra indicati (norma UNI EN 485-2/96).

È stato effettuato un confronto tra l'effetto del taglio termico, condotto con metodologia laser, e l'effetto del taglio meccanico, mediante punzonatrice, sulle stessa tipologia di lamiera. L'attività è stata suddivisa nel seguente modo:

- analisi morfologica delle superficie del taglio
- prove meccaniche statiche (microdurezza, trazione, bearing) su lamiere di lega 6061 T6
- prove a fatica assiale su lamiere di lega 6082 T6

In particolare, l'analisi morfologica, effettuata con l'ausilio di un microscopio ottico e di un microscopio elettronico a scansione è servita a delineare lo stato superficiale dei bordi di taglio e a valutare il danneggiamento provocato dai meccanismi di distacco durante il taglio stesso.

Le prove di microdurezza Vickers sono state eseguite con l'utilizzo di un carico pari a 981 mN.

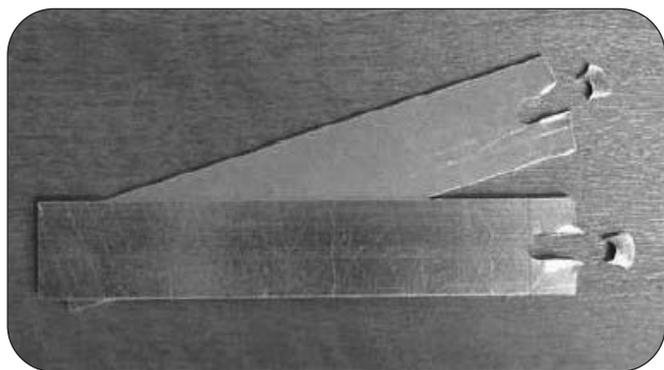
Sono stati testati campioni di forma quadrata (lato 15 mm).

Si è misurata la durezza a partire dal bordo del provino andando verso l'interno di esso per valutare l'estensione della zona di alterazione termica causata dal taglio laser.

La prova a trazione è stata condotta secondo la normativa UNI EN 10002. Seguendo le indicazioni fornite da tale norma per l'intervallo di spessori considerati, il campione deve avere le dimensioni riportate in Fig. 1.

Tale prova è stata condotta mediante l'utilizzo di una macchina di trazione ZWICK / Z100, di tipo elettromeccanico. Tale macchina è dotata di cella di carico con carico massimo pari a 100 kN e estensimetro incrementale di tipo clip-on.

Poiché nelle strutture aeronautiche il meccanismo di giunzione delle lamiere di leghe di alluminio è prevalentemente la rivettatura, particolare importanza riveste l'effetto della presenza dei rivetti sulle modalità di frattura delle lamiere. La presenza di un foro e di un perno costituisce un fattore di intensificazione locale degli sforzi. La prova per valutare tale effetto è quella di bearing che ha come scopo primario la determinazione della deformazione di un foro in funzione di una tensione applicata. Infatti in questa prova il provino consiste in un pezzo di lamiera con un foro accuratamente



▲  
Fig. 3

**Esempi di rottura tipo bearing secondo la normativa.**

*Bearing fractures examples following norm.*

preparato a distanze standard dagli estremi del campione stesso (Fig.2).

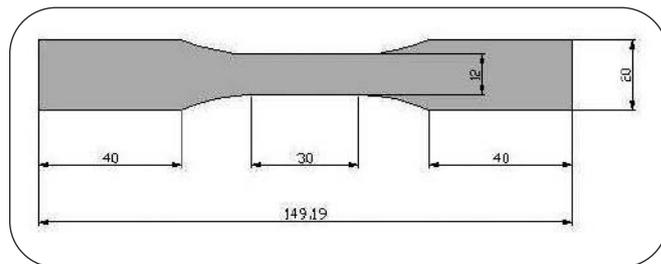
Comunemente i test si conducono impostando un rapporto distanza centro foro-diametro del foro ( $e/D$ ) di 1.5 e 2.0. Durante la prova, un perno viene inserito all'interno del foro mentre l'altra estremità è fissata alla macchina di prova (la stessa impiegata per la prova di trazione) tramite opportuni afferraggi. Viene quindi applicato un carico assiale al provino tramite il perno. La tensione di bearing è calcolata dividendo il carico applicato per l'area di bearing (il diametro del perno per lo spessore del laminato). Questo tipo di prova solitamente fa riferimento alle norme ASTM nello specifico alla E 238-84.

In particolare la rottura deve avvenire in seguito a strappo della lamiera da parte del perno (Fig. 3).

Non deve invece verificarsi un tipo di rottura dovuta alla propagazione di una cricca originatasi in prossimità del foro e avanzata in senso normale rispetto al carico applicato [3].

Poiché si sono trattate lamiere con spessore variabile tra 0,8 e 1,6 mm. la norma impone:

- diametro del foro di 5 o 6 mm;
- larghezza del campione pari a 4 o 8 volte il diametro;
- foro praticato al centro rispetto al lato minore;
- foro a distanza di 1,5 o 2 volte il diametro dal lato minore (rapporto  $e/D$ );



▲  
Fig. 4

**Disegno quotato provino per test di fatica assiale (quote in mm).**

*Axial fatigue test specimen technical drawing (dimensions in mm).*

- lunghezza variabile e dipendente dal sistema di afferraggio e dalle caratteristiche della macchina.

Le prove di fatica sono state eseguite sulla lega 6082. La macchina di prova a fatica, modello TESTRONIC 100KN, realizzata dalla RUMUL, è una macchina destinata alla verifica di campioni sottoposti a prove di fatica ad alta frequenza adattando la frequenza di test a quella di risonanza del materiale esaminato. I test sono stati condotti in condizione di controllo di tensione con un rapporto di carico  $R=-1$  (carico medio zero) e imposizione massima di durata della prova di 107 cicli. La Fig. 4 mostra la tipologia di provino impiegata per eseguire i test. Le dimensioni sono state ottenute facendo riferimento alla norma ASTM E 466 che impone un raggio di curvatura del raccordo tra parte utile e lembi di afferraggio 8 volte maggiori dello spessore del provino, un'area minima della parte utile compresa tra 19.4 e 645 mm<sup>2</sup> e un rapporto tra altezza della parte utile e spessore del provino compresa tra 2 e 6.

## RISULTATI

### Analisi morfologica della superficie di taglio

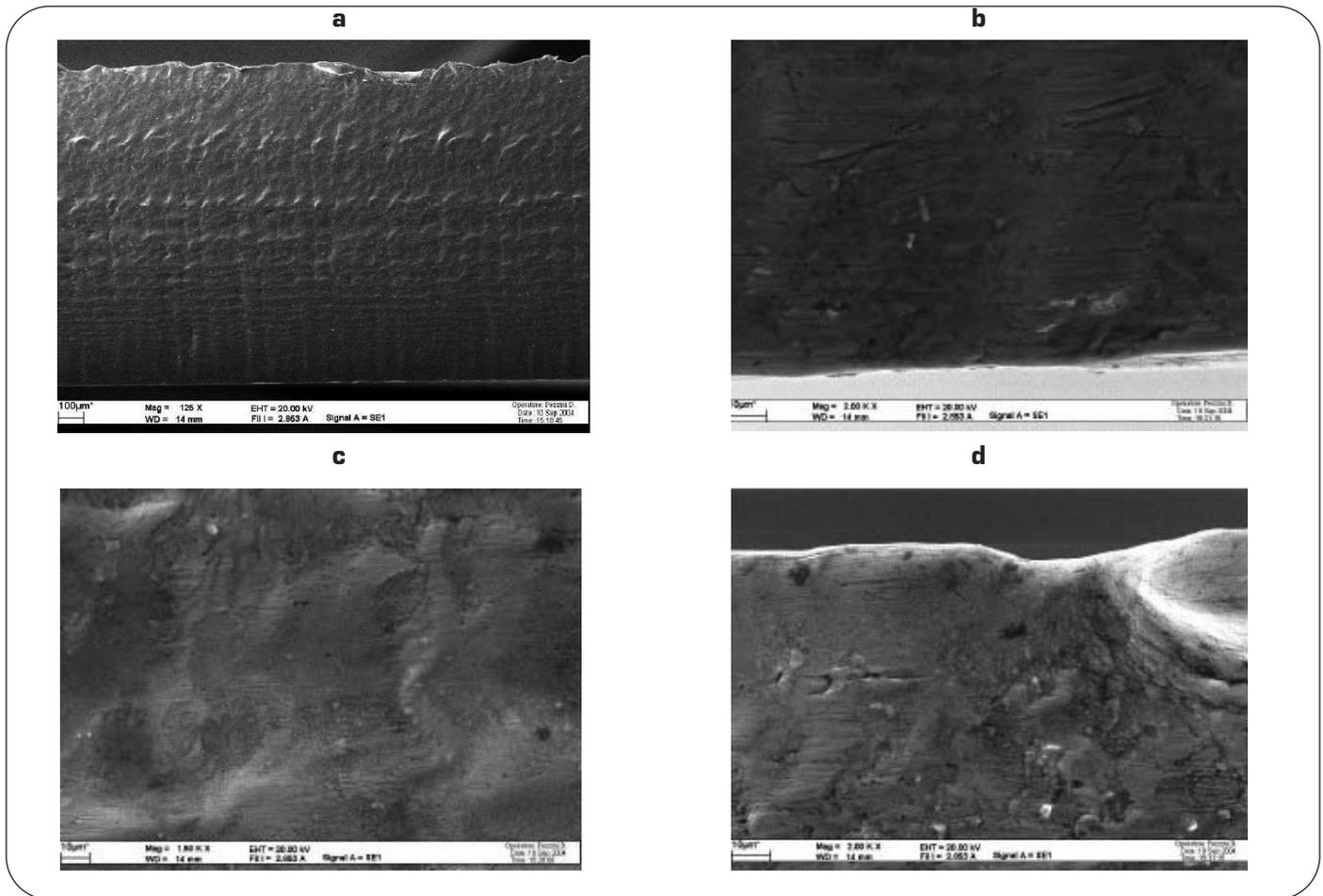
La Fig. 5 riporta la morfologia della superficie del bordo formatosi dopo il taglio con la metodologia laser. Da questa immagine si può osservare la differenza tra i due bordi di taglio. Si nota su un bordo che il fascio laser lascia un

Spessori lamiera	Tecnologia di taglio	Tensione di rottura [MPa]	Tensione di snervamento [MPa]	Allungamento percentuale [%]
0.8 mm	Laser	320.51	244.43	19
	Punzonatrice	324.21	249.48	18
1 mm	Laser	310.82	257.16	15*
	Punzonatrice	325.03	275.40	16
1.2 mm	Laser	326.32	273.77	13*
	Punzonatrice	326.21	280.70	14.5
1.6 mm	Laser	319.82	273.22	19*
	Punzonatrice	323.71	281.01	17

▲  
Tab. 2

**Proprietà meccaniche statiche riferite a diversi spessori di lamiere in lega 6061 e 6082.**

*Static mechanical properties for different thickness of 6061 and 6082 aluminium alloy sheets.*



▲  
Fig. 5

*Taglio al laser; (a) visione d'insieme della sezione tagliata; (b) ingrandimento zona bordo inferiore (rispetto alla micrografia (a) presentata); (c) ingrandimento zona centrale del bordo tagliato; (d) ingrandimento zona bordo superiore (rispetto alla micrografia (a) presentata).*

*Laser cutting; (a) cutting section; (b) magnification of the lower edge (relative to the micrograph (a)); (c) magnification of the middle zone of the cutting edge; (d) magnification of the upper zone of the cutting edge.*

taglio netto e regolare mentre sull'altro, il materiale, fuso durante il taglio, prima di risolidificare (nonostante la velocità di solidificazione sia elevata) tende a "colare" leggermente, lasciando una superficie molto frastagliata da cui la presenza di una sorta di stratificazione, caratteristica di un metallo fuso e risolidificato in tempi diversi. Pertanto vi è una certa rugosità sulla zona del taglio parallelamente alla direzione del fascio laser. Tale andamento probabilmente è chiaramente visibile in Fig. 6.

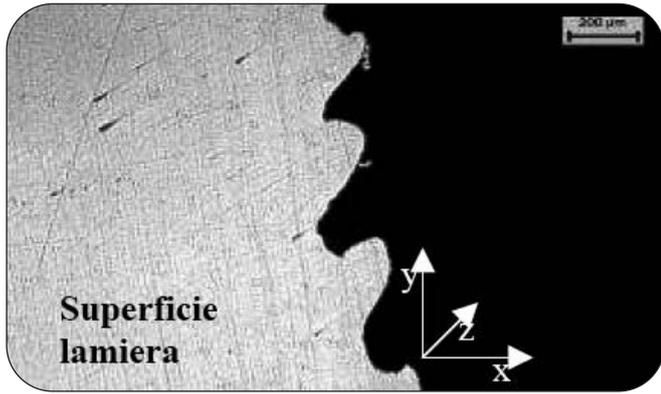
Il taglio con metodologia laser può lasciare facce piane e ben definite, simili a quelle ottenute con i migliori processi meccanici, se i parametri di processo, soprattutto quelli concernenti i gas di copertura, sono stati propriamente selezionati. In tal caso, anche le zone termicamente alterate ai lati del bordo di taglio risultano di estensione ridotta al pari della zona asportata dal taglio stesso. In caso contrario le superfici si presentano striate con formazione di sgocciolature ai lembi inferiori del taglio [4]. Tale fenomeno è dovuto alla presenza di violenti movimenti di materia indotti nella zona fusa dalle forze interagenti con il materiale stesso. Fra le forze in gioco vi sono: i gradienti termici, le forze di gravità, le pressioni fluidodinamiche, le forze viscosive e di tensione superficiale.

La Fig. 7, mostra un profilo del bordo dopo taglio con punzonatrice. L'aspetto di tale bordo risulta essere diverso a quello formatosi dopo taglio laser: nella zona di ingresso della lama (in basso nella figura) quasi fino a metà del bordo, si nota una parte perfettamente liscia seguita da un'altra molto rugosa. Le zone di ingresso ed uscita della lama sono entrambe caratterizzate da un taglio netto e regolare.

La Fig. 7b è un ingrandimento della precedente nell'area intermedia tra la zona liscia e quella rugosa mentre la Fig. 7c illustra più in dettaglio la parte rugosa del provino; tale rugosità è dovuta al fatto che in quella zona, dopo l'azione della lama (superiormente ad essa) il materiale è stato "strappato" via dalla lama stessa. L'analisi della sezione del bordo non ha evidenziato nessuna zona frastagliata simile a quella riportata in Fig. 6.

### Prova di microdurezza

In generale, mediante i test di microdurezza si è notata una notevole diminuzione della durezza sul bordo dopo taglio al laser dovuta al fatto che il fascio di raggio laser, durante il taglio, fonde il materiale nella zona circostante il taglio stesso; tale fusione annulla gli effetti dovuti all'operazione di



▲  
Fig. 6

**Profilo ondulato del taglio visto in sezione (lungo z, spessore lamiera la cui sezione è analizzata in Fig. 5).**  
Section of cutting wavy profile (along z, representing the sheet thickness whose section is analysed in figure 5).

laminazione e al trattamento termico ed inoltre nella zona interessata dalla fusione si verifica un ingrossamento dei grani. Per tutti i campioni della lega 6061 esaminati, la microdurezza varia da un valore di circa 60-70 HV nei pressi del bordo tagliato, fino ad un valore di 116 HV lontano dalla zona influenzata dal taglio laser.

La Fig. 8 riporta l'andamento della microdurezza per le lamiere in lega 6061 a diversi spessori.

**Prova di trazione**

Per quanto riguarda i provini tagliati con fascio laser si nota che i valori di tensione di rottura ricavati rientrano tutti nei limiti imposti dalla norma UNI EN 485-2/96 (Tab. 2). Anche quelli relativi alla tensione di snervamento rientrano in tali limiti. In alcuni casi, però, la rottura è avvenuta al di fuori del tratto utile e non è stato possibile ricavare l'allungamento percentuale a rottura mediando un numero statisticamente accettabile di valori (dati indicati con l'asterisco nella Tab. 3). Anche per quanto riguarda i provini tagliati con punzonatrice, i valori di tensione di rottura e di snervamento rientrano nei limiti imposti dalle norme e, in questo caso, la rottura dei provini è sempre avvenuta all'interno del tratto utile. I valori di tensione dei provini tagliati con punzonatrice sono leggermente superiori rispetto a quelli tagliati con fascio laser. Per un confronto si riporta alla tabella ed ai diagrammi successivi che mostrano quanto detto.

**Prova di bearing**

Per quanto riguarda i provini tagliati con il fascio laser si nota che i valori di tensione di rottura ricavati rientrano tutti nei limiti imposti dalle norme MIL (Tab. 2). In alcuni casi la rottura è avvenuta con strappo laterale del pezzo. I campioni con e/D = 2 presentano un valore di  $\dot{U}R$  decisamente superiore rispetto ai valori riscontrati in quelli con e/D = 1,5. Il risultato è spie-

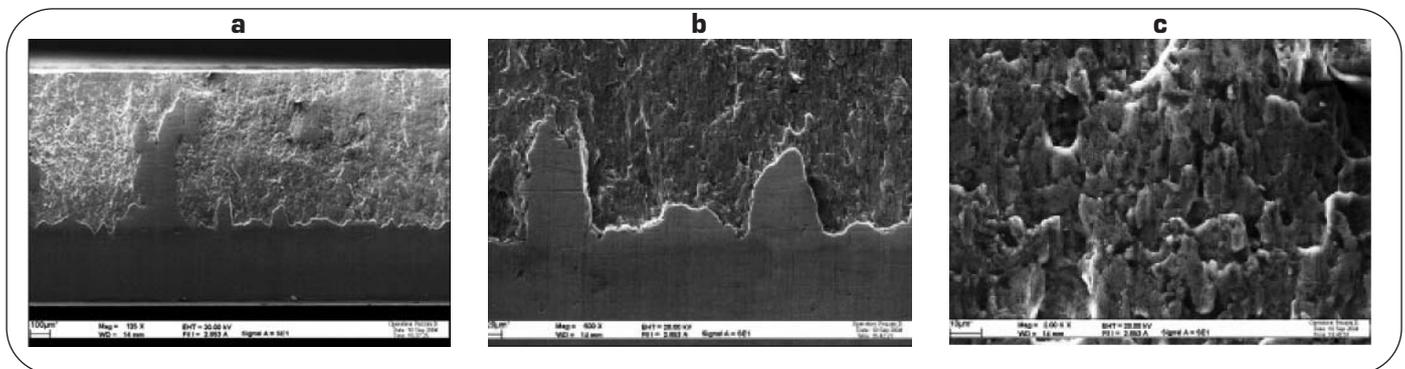
Lamiera	Carico di rottura [MPa]*	Carico di snervamento [MPa]*	Allungamento percentuale [%]	Bearing (e/D=1.5) [MPa]**	Bearing (e/D=2.0) [MPa]**	Durezza HB
<b>6061 T6</b>	290	240	6	462	607	88
<b>6082 T6</b>	310	260	6	-	-	94

\*valori riportati anche nelle norme MIL-HDBK-5H 1998

\*\*valori riportati solo nelle norme MIL-HDBK-5H 1998 che non trattano la lega 6082

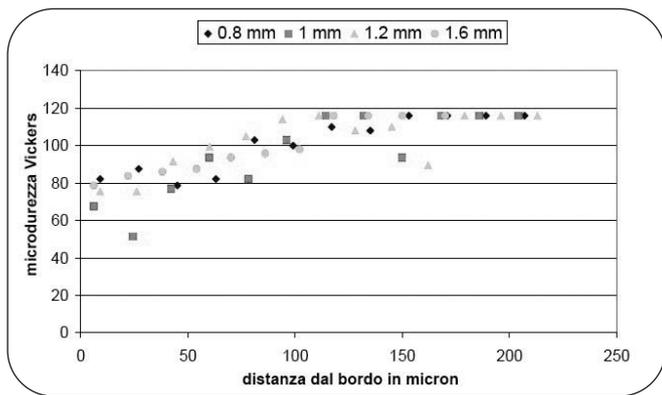
▲  
Tab. 2

**Proprietà meccaniche statiche riferite a diversi spessori di lamiere in lega 6061 e 6082.**  
Static mechanical properties for different thickness of 6061 and 6082 aluminium alloy sheets.



▲  
Fig. 7

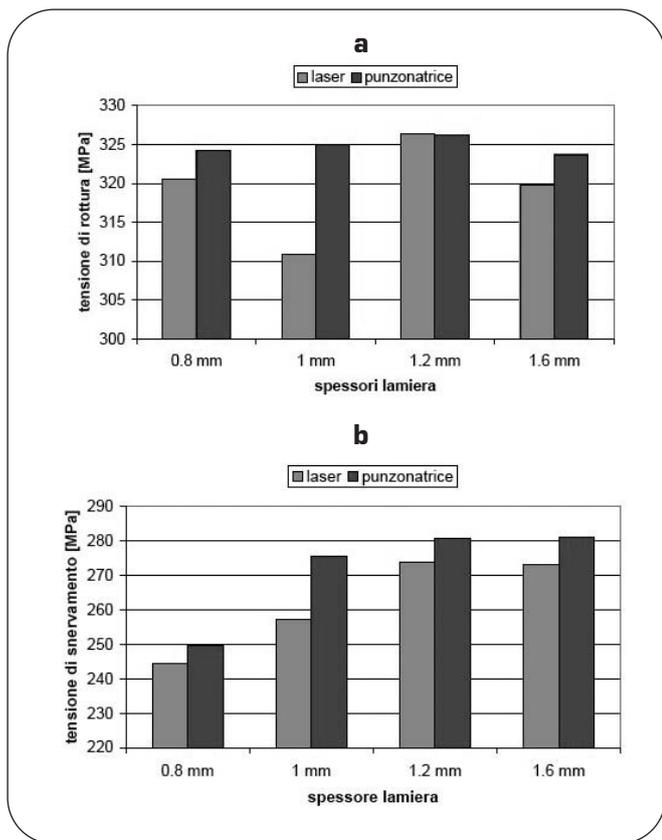
**Taglio con punzonatrice; (a) visione d'insieme della sezione tagliata; (b) zona di passaggio tra superficie liscia e superficie rugosa; (c) dettaglio superficie rugosa.**  
Punching machine cutting; (a) cutting section; (b) intermediate area between rough and smooth surface of the cut; (c) rough surface of the cut.



**Fig. 8** Profilo di microdurezza per lamiere in lega 6061 tagliate al laser.

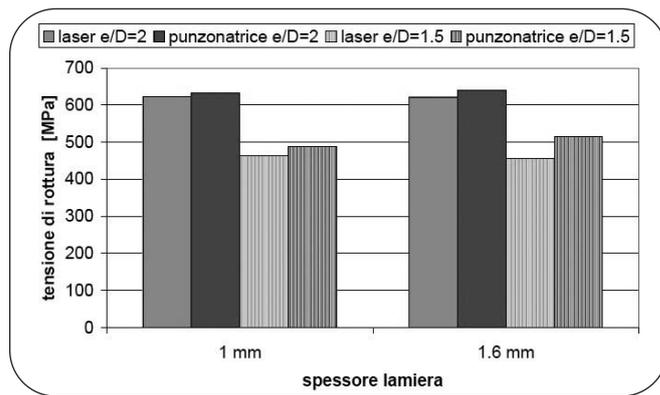
Microhardness profile for laser cutting 6061 aluminium alloy sheets.

gabile considerando che la superficie del tratto utile è maggiore nel caso di  $e/D = 1,5$  da cui deriva una resistenza maggiore (in accordo ai valori minimi riportati dalle norme MIL). Per quanto riguarda i provini tagliati con la punzonatrice e val-



**Fig. 9** Istogrammi comparativi della resistenza a rottura (a) e della resistenza allo snervamento (b) di provini ottenuti con il taglio con fascio laser e con la punzonatrice meccanica.

Tensile comparative histograms of laser and punching machine cut specimens: ultimate tensile strength (a) and yield strength (b).



**Fig. 10** Istogrammi comparativi della resistenza a rottura per bearing in funzione del rapporto  $e/D$  per provini ottenuti con il taglio con fascio laser e con la punzonatrice meccanica.

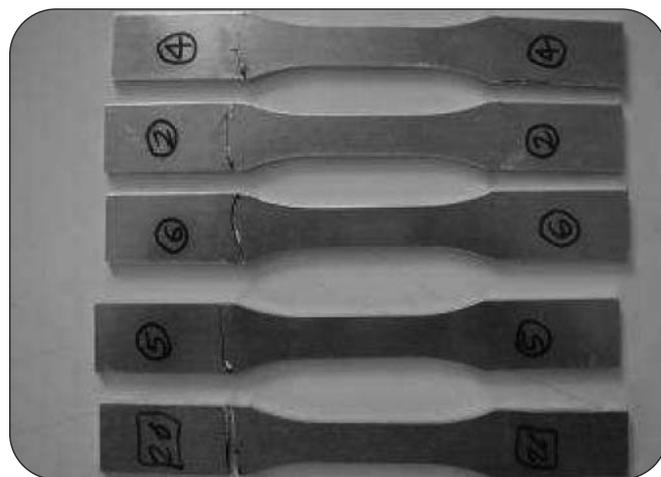
bearing strength comparative histograms in terms of  $e/D$  ratio of laser and punching machine cut specimens.

ori di tensione di rottura rientrano tutti nei limiti imposti dalle norme MIL. Essi sono leggermente superiori a quelli ricavati nel caso di taglio laser, anche perché nel caso con punzonatrice il rapporto  $e/D$  era di poco maggiore ( $e/D = 1,581$ ;  $e/D = 2,051$ ) ed era quindi lecito aspettarsi tensioni più elevate.

La Fig. 10 riassume i dati ottenuti dalla prova di bearing in cui si nota come i valori ottenuti dai provini tagliati con la punzonatrice siano sempre leggermente superiori rispetto al caso di taglio al laser.

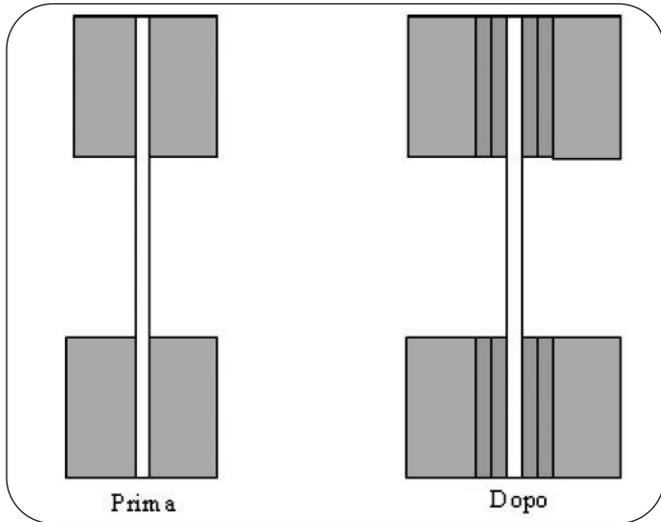
### Prova a fatica

Si è iniziato a testare i campioni tagliati con il laser e si è subito notata una anomalia nel comportamento di innesco della cricca che porta a rottura del provino. Si è riscontrato infatti che, durante il test di fatica assiale, i campioni che andavano a rottura entro i 107 cicli prestabiliti dalla prova presentavano la frattura esterna al tratto utile indicato dalla norma UNI 3964, maggio 1985.



**Fig. 11** Provini tagliati al laser dopo la prova a fatica. È evidente la frattura al di fuori del tratto utile.

Laser cut specimens after axial fatigue test presenting fracture not in the expected area.



▲  
Fig. 12

**Configurazione degli afferraggi alla prima prova e dopo l'aggiunta di spessori per favorire l'ancoraggio.**

*Clamping configuration before and after the increasing of the thickness of the clamp in order to improve the specimen fixing to the fatigue machine.*

Nella Fig. 11 sono presentati alcuni esempi di provini tagliati al laser che presentano la frattura al di fuori del tratto utile (in prossimità degli afferraggi).

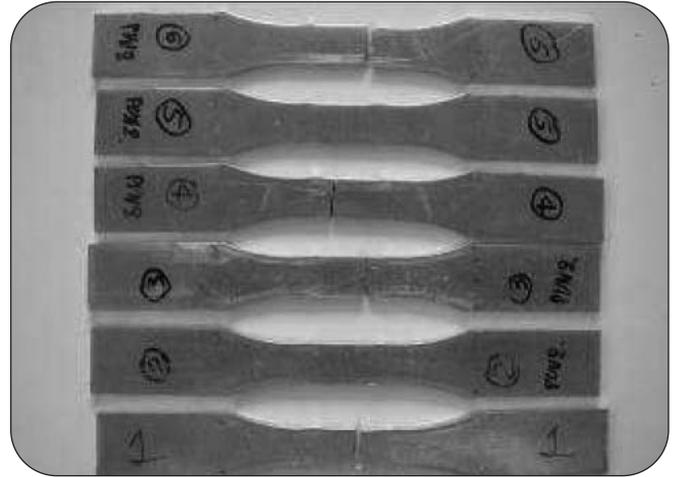
Al fine di evitare eventuali effetti negativi imputabili alla configurazione dell'afferraggio, sono stati impiegati per le prove successive degli spessori aggiuntivi di materiale tenero (in modo tale da evitare effetti di innesco) tra gli afferraggi stessi, come mostrato in Fig. 12.

Nonostante questo accorgimento le fratture riscontrate avvenivano sempre in prossimità di un afferraggio. Per verificare ulteriormente il comportamento a rottura a fatica dei campioni tagliati al laser è stato anche monitorato se il punto di rottura fosse sempre in prossimità di uno o altro afferraggio. Il risultato di questa valutazione è stato quello di asserire l'effettiva casualità del posizionamento della zona di innesco in prossimità dell'afferraggio superiore o di quello inferiore.

Gli inneschi della cricca di fatica per le prove condotte con campioni ottenuti con punzonatrice si sono invece sempre presentati nel tratto utile (Fig.13). E' stato pertanto dimostrato che, a parità di condizioni operative, la modalità di rottura per fatica è indipendente dal macchinario impiegato e, ovviamente, dal materiale in sé ma dipende dal metodo di ottenimento del campione stesso.

Sebbene, si sia riscontrato questo duplice comportamento a rottura tra le due classi di provini (laser e punzonatrice) si è comunque deciso di condurre ulteriori test a fatica per poter avere un maggiore numero di dati a disposizione, pur sapendo che la frattura al di fuori del tratto utile, secondo norma, porterebbe all'invalidazione della prova.

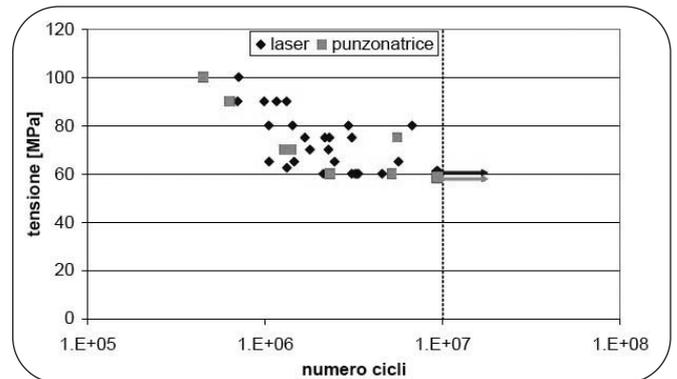
Si è pertanto deciso di condurre prove a diversi livelli di tensione alternata e in Fig. 14 è presentato il grafico ottenuto al termine di tutte le prove e riportante il comportamento a fatica dei provini tagliati con fascio laser e dei provini tagliati con punzonatrice. Sono stati inseriti nel grafico solo i dati riguardanti i test conclusi con una rottura mentre sono stati mediati e rappresentati con punto e una freccia i dati riferenti a campioni che a 107 cicli (fine prova, indicata con una linea



▲  
Fig. 13

**Provini punzonati rotti a fatica con frattura nel tratto utile.**

*Punching machine cutting specimens presenting fracture in the expected area.*



▲  
Fig. 14

**Comportamento a fatica dei provini tagliati con il raggio laser e dei provini tagliati con punzonatrice.**

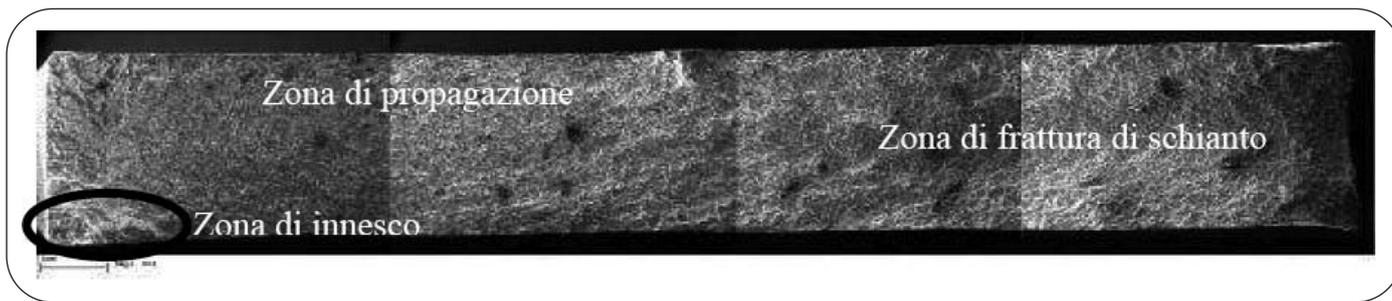
*Fatigue behaviour of both laser cutting and punching machine cutting specimens.*

verticale tratteggiata) non hanno subito rottura.

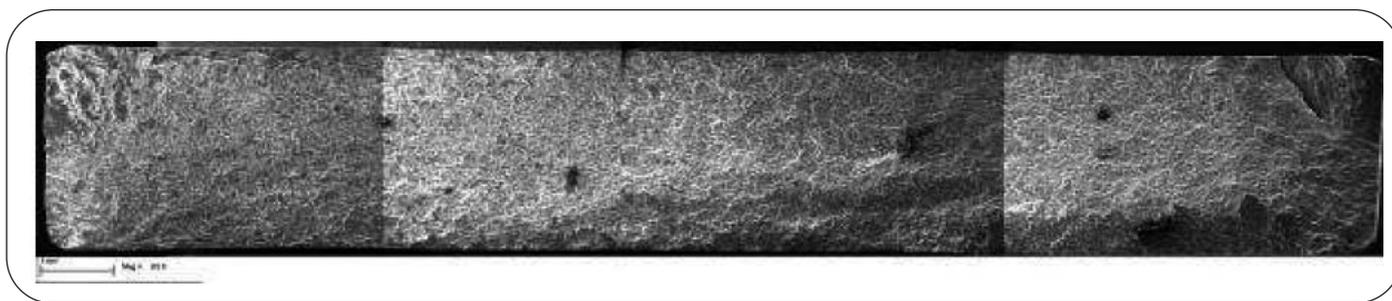
Come si nota dal grafico la distribuzione dei punti porta ad asserire che l'impiego del taglio laser non influenza il comportamento a fatica per quanto riguarda il valore di resistenza a fatica (tensione alternata e numero di cicli) fermo restando la presenza della diversa modalità di rottura.

Di seguito sono presentate delle frattografie ottenute dall'analisi al microscopio elettronico a scansione (Figg. 15, 16, 17). Tali micrografie rappresentano le superfici di frattura di tre differenti provini tagliati al laser. L'innesco della frattura è da identificarsi nella parte sinistra di ogni foto. Si distinguono oltre alla zona di innesco le altre due zone classiche di una superficie di frattura per fatica: propagazione e tratto ultimo di rottura duttile (ultimo tratto di ogni figura).

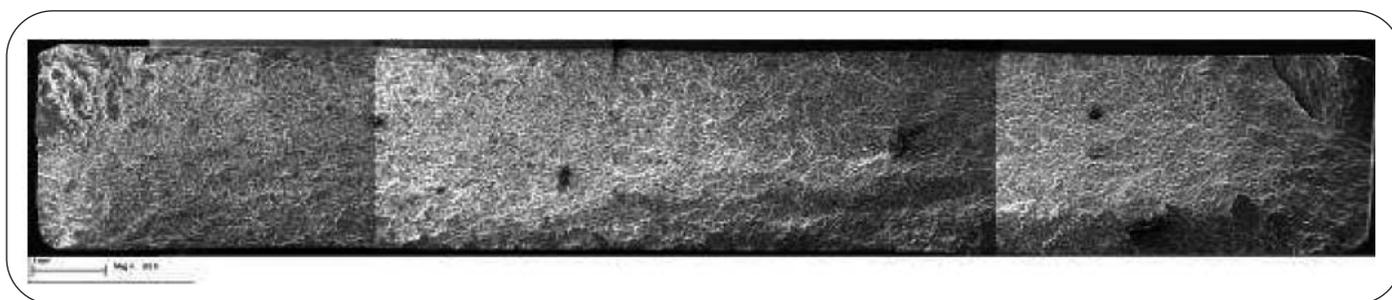
Le immagini di Fig. 18a si riferiscono alla zona di innesco della cricca a fatica per il campione in Fig. 15 (60 Mpa, 3069399 cicli). La prima figura è stata ottenuta con lo stereoscopio mentre la seconda (Fig.18b) è ottenuta con il microscopio elettronico a scansione. Si può notare come l'innesco della cricca parta da un apice del provino individuato dagli ovali bianchi.



▲  
Fig. 15 *Superficie di frattura provino testato a fatica (60 MPa, 3 069 399 cicli).*  
Fatigue fracture surface of a specimen failed at 60 MPa and 3 069 399 cycles.



▲  
Fig. 16 *Superficie di frattura provino testato a fatica (60MPa, 3 272 636 cicli).*  
Fatigue fracture surface of a specimen failed at 60MPa and 3 272 636 cycles.



▲  
Fig. 17 *Superficie di frattura provino testato a fatica (60MPa, 3 346 434 cicli).*  
Fatigue fracture surface of a specimen failed at 60MPa and 3 346 434 cycles.

L'analisi frattografica dei campioni tagliati al laser ha evidenziato fratture aventi un doppio innesco come rappresentato in Fig. 19.

### Zona di innesco

Per quanto riguarda, invece le superfici di frattura dei campioni ottenuti con l'impiego della punzonatrice si nota dalla Fig. 20 che, anche in questo caso l'innesco della cricca di fatica parte da un apice del provino e che la frattura ha lo stesso aspetto di quelle relative ai campioni tagliati al laser.

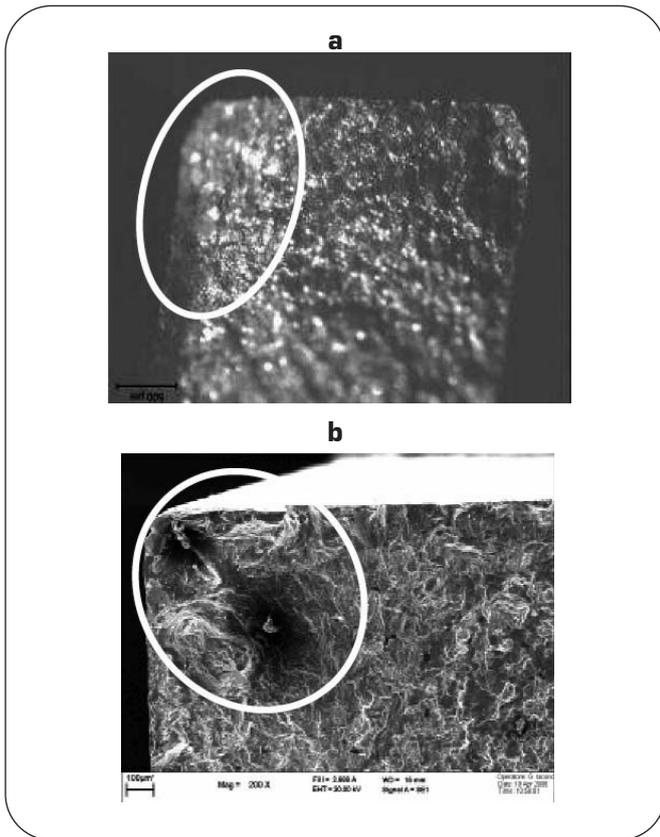
Poiché tutti i provini tagliati al laser presentano la frattura praticamente nello stesso punto, è da supporre che tale punto costituisca anche la partenza del taglio nonché l'arrivo del raggio laser dopo il taglio. Si crea pertanto una zona di materiale "indebolito" poiché rifuso due volte, la quale, sottoposta a fatica, può favorire un eventuale innesco.

Questa spiegazione porta ad asserire che provini il cui taglio

tramite laser parta da un apice dell'afferraggio e non dal punto di raccordo tra afferraggio e corpo centrale, non presentino, se sottoposti a fatica, un comportamento anomalo ma la loro eventuale frattura si abbia all'interno del tratto utile.

### CONCLUSIONI

L'impiego in modo sempre più significativo di tecnologie che coinvolgono fasci laser per il taglio di lamiere di utilizzo aerospaziale e la mancanza di riferimenti normativo-bibliografici sull'effetto di tale metodologia sulle caratteristiche meccaniche dei componenti ha portato ad approfondire tale tematica. Pertanto una serie di campioni di lamiere di lega di alluminio della serie 6061 e 6082 di differente spessore, preparati mediante taglio con fascio laser e, per confronto, taglio tradizionale con punzonatrice meccanica, sono stati sottoposti a caratterizzazione morfologica e alle prove mecca-

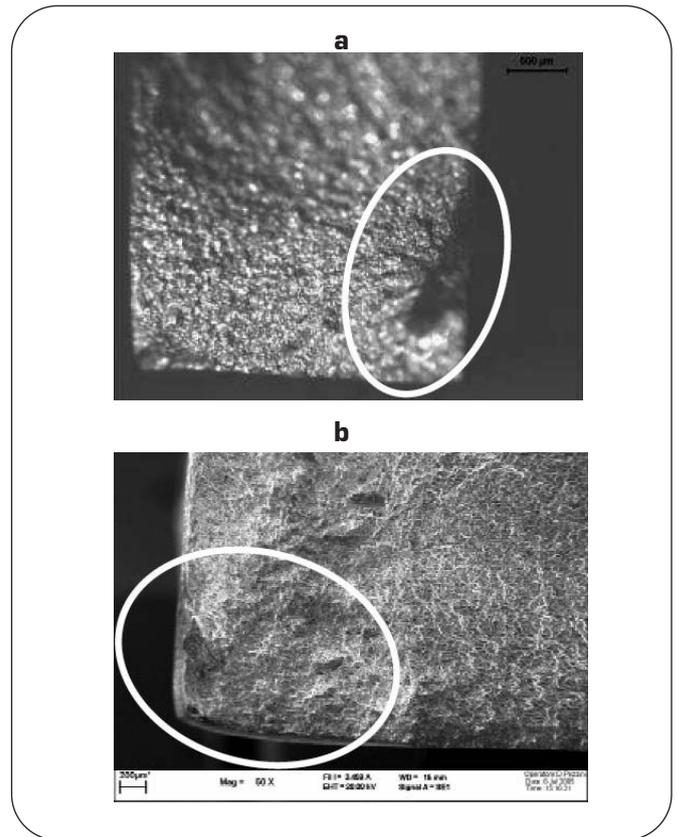


▲  
Fig. 18

**a) superficie stereografica; b) superficie al SEM.**

*a) fracture surface obtained by a stereoscope; b) fracture surface obtained by a scanning electron microscope (SEM).*

niche di trazione, microdurezza, fatica e bearing (in considerazione dell'impiego di rivetti in campo aeronautico). Per quanto riguarda la morfologia del bordo di taglio si può notare che la tecnologia laser lascia una superficie che presenta zone di rifusione nonché rugosità e frastagliature, mentre la punzonatrice crea inizialmente una superficie liscia che diven-



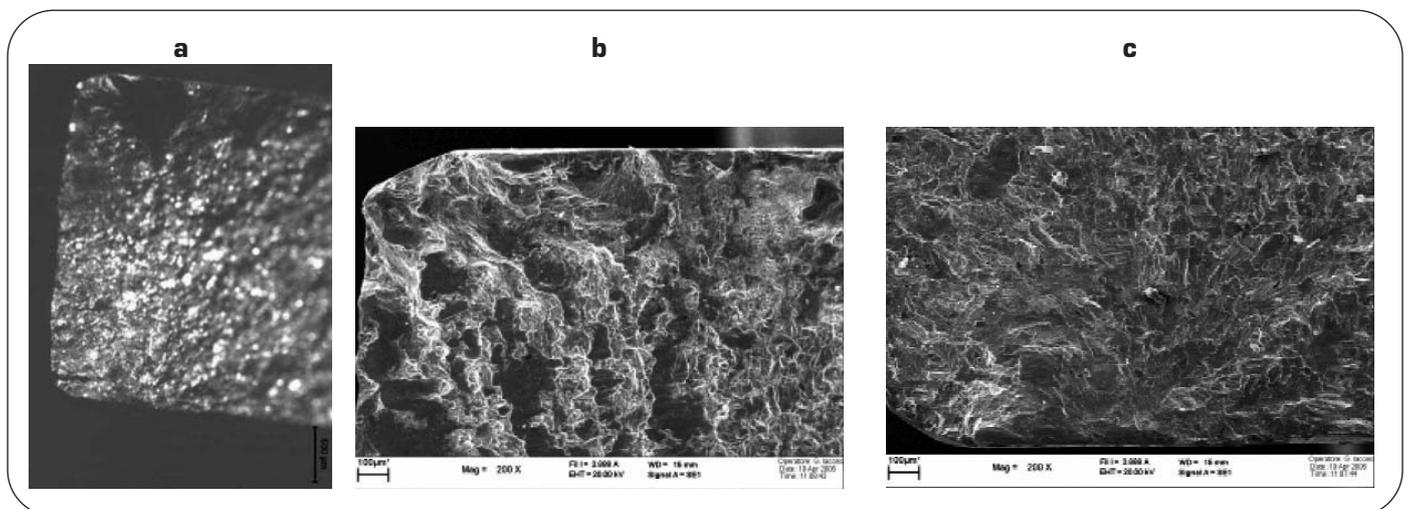
▲  
Fig. 20

**a) superficie stereografica per provino punzonato; b) superficie al SEM.**

*a) punching machine cutting specimen fracture surface obtained by a stereoscope; b) fracture surface obtained by a scanning electron microscope (SEM).*

ta rugosa per lo strappo finale del materiale.

La prova di microdurezza ha evidenziato un decadimento della durezza in prossimità dei bordi tagliati con fascio laser della profondità di circa 100 µm dovuto a effetti termici ovvia-



▲  
Fig. 19

**(a) superficie stereografica; (b) innesco apice superiore, (c) innesco apice inferiore.**

*(a) fracture surface obtained by a stereoscope; (b) upper edge crack initiation site, (c) lower edge crack initiation site.*

mente assenti nei tagli con punzonatrice meccanica.

La prova di trazione e la prova di bearing hanno permesso di controllare che l'impiego della tecnologia laser mantiene le caratteristiche meccaniche ampiamente nei limiti delle norme sebbene i valori risultino essere leggermente inferiori a quelli riscontrabili per i provini fabbricati con taglio tradizionale.

I risultati derivanti dalle prove di fatica assiale hanno permesso di asserire che a livello "numerico", cioè a livello di tensioni alternate e numero di cicli, non si riscontrano particolari differenze di comportamento tra le due metodologie di fabbricazione dei provini testati. Tuttavia a livello "morfologico" si è riscontrata una anomalia nella posizione di innesco-propagazione della cricca a fatica che nei provini tagliati al laser si colloca sempre al di fuori del tratto utile. Tale anomalia è verosimilmente dovuta alla presenza di zone rifuse due volte in quanto risultano essere punti di partenza e di arrivo del fascio laser.

In conclusione si può asserire che il taglio laser può essere impiegato per la creazione di profilati metallici per l'impiego

in aeromobili avendo però l'accortezza di programmare opportunamente il percorso del raggio laser durante il taglio evitando di iniziare dalle zone critiche della figura.

### BIBLIOGRAFIA

- 1] E. Oberg, F.D. Jones, H.L. Horton, H.H. Ryffel, Machinery's Handbook (27th Edition) & Guide to Machinery's Handbook, 2004 Industrial Press
- 2] Military Handbook - MIL-HDBK-5H: Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures (Knovel Interactive Edition), U.S. Department of Defense, July 2003
- 3] C. Borsellino, L. Calabrese, G. Di Bella, V. Fiore, A. Valenza, Bearing failure prediction: an experimental versus numerical approach, AIMAT proceedings, Palermo 27 Giugno 1 Luglio 2006
- 4] D. Schuocker, Dynamic phenomena in laser cutting and cut quality, Applied Physics B: Lasers and Optics, Volume 40, Number 1 / May, 1986

## ABSTRACT

### LASER CUTTING EFFECTS ON ALUMINIUM SHEETS MECHANICAL PROPERTIES.

**Keywords:** alluminio e leghe, deformazioni plastiche, laminazione, microscopia elettronica-prove meccaniche, processi

In aeronautic field there is always a continuous research, implementation and application of more and more advanced technologies. This leads to the adoption of lasers in the aluminium sheets cutting to create plane external structures as an alternative at the more consolidate mechanical cutting techniques such as the use of punching machines.

There is a lack of specific references about laser cutting technology in literature and in international norms so the aim of this work is to understand if the thermal (laser) and mechanical (punching machine) cutting technique are equivalent in terms of not influencing the mechanical properties of the components after cutting.

The tested materials are aluminium sheets of EN AW-6061 [Al, Mg, Si, Cu] and EN AW-6082 [Al, Si, Mg, Mn] alloys with a T6 heat treatment and thickness of 0.8, 1.0, 1.2 e 1.6 mm for 6061 and 3.0 mm for 6082.

The study has been performed following three different activities:

- Static mechanical properties (microhardness, tensile test – figure 1, bearing test – figures 2, 3) on 6061 T6 aluminium alloy sheets
- Axial fatigue test on 6082 T6 aluminium alloy sheets (figure 4)
- Morphological analysis of the cutting surfaces (figures 5, 6, 7)

About the cutting surfaces morphology it is possible to notice that the laser technology creates a surface characterised by re-melted and rough areas (figures 5 and 6) while the punching machine first produces a smooth surface that becomes rough in the final phase of the fracture (figure 7).

The microhardness test puts in evidence a hardness decreasing near the cutting edge created with the laser beam till a distance of about 100  $\mu\text{m}$  (figure 8) because of the thermal effects obviously absent in the punching machine cutting surfaces.

The tensile (table 3 and figure 9) and bearing tests (figure 10) clarify that the laser technology maintains mechanical properties in the ranges indicated by the international design norms even if all the results are a little bit lower than the ones obtained with the punching machine.

Axial fatigue data let to say that in terms of alternate stresses and number of cycles to failure the differences on fatigue behaviour of the two types of cutting are negligible (figure 14). Nevertheless, under a morphologic point of view there is a great difference in the position of the fatigue crack initiation and propagation on the laser cut specimens (figure 11) if compared to the punching machine fractured specimens (figure 13) maybe because of the presence of re-melted areas that could represent the starting and arriving points of the laser beam during the cutting.

As a conclusion we can say that the laser cutting could be use for the creation of complex figures on metal sheets for airplane external structures at the condition to properly plan the laser beam path during cutting avoiding to start from the more critical zones of the figure.