

Tornitura criogenica della lega Ti6Al4V

R. Sola, P. Veronesi

La continua ricerca di maggiori performance in ambito automotive ed aerospaziale e il desiderio di raggiungere nuovi traguardi in ambito biomedicale hanno condotto ad una crescita costante dell'utilizzo di leghe di titanio, note per le eccellenti proprietà meccaniche e la biocompatibilità. L'elevata resistenza meccanica, anche ad alta temperatura, e la bassa conducibilità termica, se confrontata con altri materiali metallici, rendono il titanio, e le sue leghe, materiali difficili da lavorare alle macchine utensili. Difficile asportazione del truciolo, elevata usura dell'utensile, scadimento della finitura superficiale, deterioramento delle proprietà meccaniche dei pezzi in lavorazione, bassa produttività sono solo alcuni degli inconvenienti riscontrati durante la tornitura delle leghe di titanio. L'utilizzo dei tradizionali lubro-refrigeranti, miscele di composti chimici nocivi per la salute degli operatori e ad elevato impatto ambientale, comporta elevati costi di smaltimento e l'ottenimento di trucioli di lavorazione sporchi, difficilmente riciclabili.

Questo lavoro di ricerca indaga l'utilizzo dell'azoto liquido, in sostituzione dei lubrorefrigeranti tradizionali, nella tornitura della lega Ti6Al4V. I risultati dei test di tornitura e delle analisi microstrutturali, di topografia superficiale e di usura dell'utensile evidenziano come la refrigerazione criogenica migliori le proprietà microstrutturali, meccaniche e la finitura superficiale dei prodotti, diminuisca l'usura dell'utensile e consenta l'ottenimento di trucioli puliti e facilmente riciclabili.

PAROLE CHIAVE: TI6AL4V, TORNITURA, RAFFREDDAMENTO CRIOGENICO, TRUCIOLI, BIOMATERIALI.

INTRODUZIONE

Le leghe di titanio sono le leghe metalliche più utilizzate in ambito biomedicale per l'elevata resistenza meccanica e a corrosione, e per l'eccellente biocompatibilità. Gepreel e all. in [1-3] e Geethe e all. in [2] dichiarano la lega Ti6Al4V come la più appropriata per la fabbricazione delle protesi a lungo termine (coppa acetabolare, protesi al ginocchio, protesi alla spalla) per le proprietà simili a quelle dell'arto in sostituzione. Generalmente le protesi biomediche presentano forme complesse e la loro fabbricazione risulta particolarmente onerosa e con una elevata quantità di scarti di lavorazione. Reattività chimica, elevata durezza e scarsa conducibilità termica rendono le leghe di titanio, specialmente la lega Ti6Al4V, particolarmente difficili da lavorare alle macchine utensili. Per l'elevata forza di taglio richiesta e la gran quantità di calore che si genera nella zona di taglio, l'usura dell'utensile diviene presto severa [4]. Tradizionalmente per migliorare la lavorabilità del Ti6Al4V si utilizzano adeguati fluidi lubro-refrigeranti, solitamente oli minerali con additivi chimici particolarmente

R. Sola

Department of Industrial Engineering, University of Bologna

P. Veronesi

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

tossivi e nocivi per l'ambiente e per la salute umana, che agiscono da lubrificanti, refrigeranti e facilitano la truciola-bilità. Tuttavia, il settore biomedicale, allo scopo di prevenire fallimenti delle protesi chirurgiche, allergie e infezioni causate da potenziali contaminazioni della superficie, richiede operazioni di pulizia e sanificazione particolarmente costose in termini economici e di tempo. La lavorazione meccanica a secco potrebbe essere una possibile soluzione per ridurre le operazioni di pulizia, ma la drastica riduzione della lavorabilità, il deterioramento delle proprietà e dell'integrità superficiale dei pezzi in lavorazione e l'importante riduzione della vita dell'utensile ne scoraggiano l'applicazione [5]. Al fine di ridurre la temperatura nella zona di taglio la letteratura scientifica ha proposto approcci alternativi eco-sostenibili come l'azoto liquido (LN₂), il biossido di carbonio (CO₂), l'aria compressa e fluidi con oli vegetali, solitamente utilizzati nelle operazioni di sgrossatura e non nella finitura.

L'azoto liquido, rispetto ai lubro-refrigeranti tradizionali, è pulito, incolore, inodore, non tossico, non cancerogeno, non combustibile, non corrosivo e non inquinante. L'azoto liquido costa di più come investimento iniziale, ma per i materiali metallici refrattari, difficili da lavorare, anche i costi di acquisto, rigenerazione e smaltimento dei lubro-refrigeranti tradizionali ricoprono un costo pari al 16-26% dei costi totali di produzione. In aggiunta, si eviterebbero tante operazioni di finitura e pulizia post-lavorazione. Se si ragiona in termini di ciclo completo e non si limita il pensiero al solo fattore costo iniziale, sicuramente l'azoto liquido diviene una soluzione particolarmente allettante. Shaahidhara e all. in [6] hanno dimostrato che l'utilizzo degli oli vegetali diminuisce l'usura dell'utensile e migliora la finitura superficiale dei pezzi, ma non limita il numero delle operazioni di pulizia imposte dal settore biomedicale. I risultati migliori in termini di pulizia dei pezzi in lavorazione, finitura superficiale, proprietà del materiale, riduzione della temperatura nella zona di taglio, dell'attrito e della forza di taglio, diminuzione dell'usura dell'utensile, incremento della velocità e della profondità di taglio si raggiungono con l'utilizzo dell'azoto liquido [7]. In aggiunta, l'u-

tilizzo dell'azoto liquido nella lavorazione alle macchine utensili consente l'ottenimento anche di trucioli e scarti di lavorazione puliti, privi di inquinanti, facilmente riciclabili e riutilizzabili con le nuove tecnologie di metallurgia delle polveri.

Considerando i vantaggi tecnologici, produttivi ed ecologici, in questo lavoro di ricerca è stata valutata l'efficacia dell'azoto liquido nella tornitura ad alta velocità su semi-finitura di barre in Ti6Al4V in comparazione alla lavorazione a secco, per applicazioni in ambito biomedicale.

TECNICHE SPERIMENTALI

La lega metallica oggetto di questo studio è una lega alfa-beta Ti6Al4V con composizione chimica nominale (wt%) in accordo con ASTM F1472 [8]: Al 6%, V 4%, C 0.03%, Fe 0.1%, O 0.15%, N 0.01%, H 0.003%, Ti bal. In Fig. 1 è riportata una micrografia della lega Ti6Al4V nello stato di fornitura, prevalentemente costituita da grani alfa con circa un 8% di fase beta a bordo grano. Le barre nello stato di fornitura sono state sottoposte a tornitura utilizzando un tornio a controllo numerico, visibile in Fig. 2 (A e B), opportunamente attrezzato per l'esecuzione dei test. L'azoto liquido è convogliato nella zona di taglio attraverso un sistema di tubi che ha partono da un serbatoio di stoccaggio adiacente alla macchina di tornitura (Fig. 2 B). L'apparato sperimentale prevede un tornio Mori-Seiki NL1500 CNC in cui sono stati montati inserti in WC-Co Widia CNMG 120408-5 forniti da Boehlerit, sostituiti ad ogni prova per la valutazione dell'usura. Le variabili di taglio considerate sono riportate in Tab. I. Le prove sono state condotte mantenendo costante profondità di taglio pari a 1.5 mm e alimentazione 0.1 mm/giro. Per ogni set di parametri sperimentali si sono eseguiti 10 test al fine di valutare la ripetibilità del processo. Il controllo della pressione di approvvigionamento di azoto liquido avviene in modo manuale regolando l'apertura di una valvola. Alla massima apertura della valvola ("max") corrisponde una pressione di azoto liquido pari a 3 bar, a circa metà apertura della valvola ("medium") corrisponde una pressione di azoto pari a 1.5 bar.

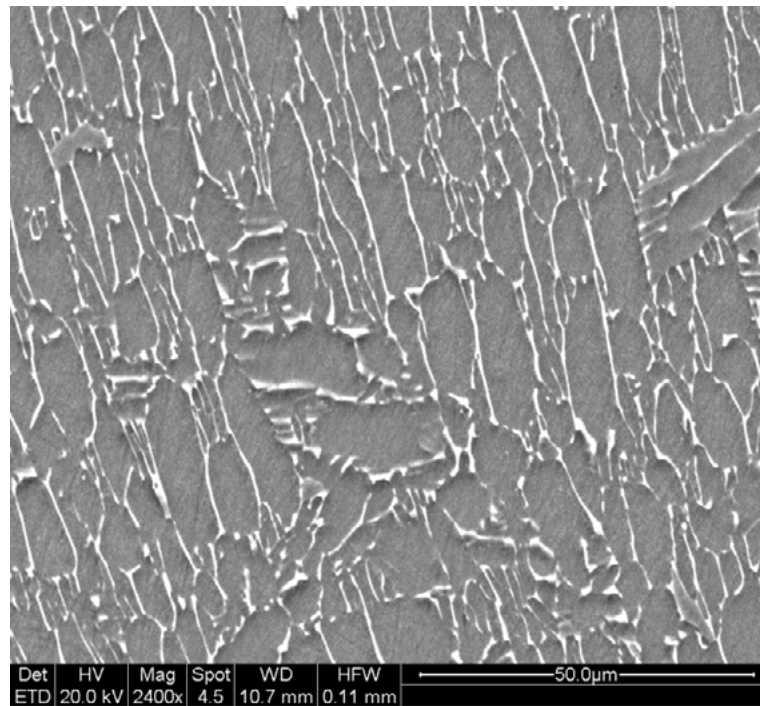


Fig.1 - Micrografia SEM-BSE della microstruttura della lega Ti6Al4V nello stato di fornitura, prima di ogni lavorazione

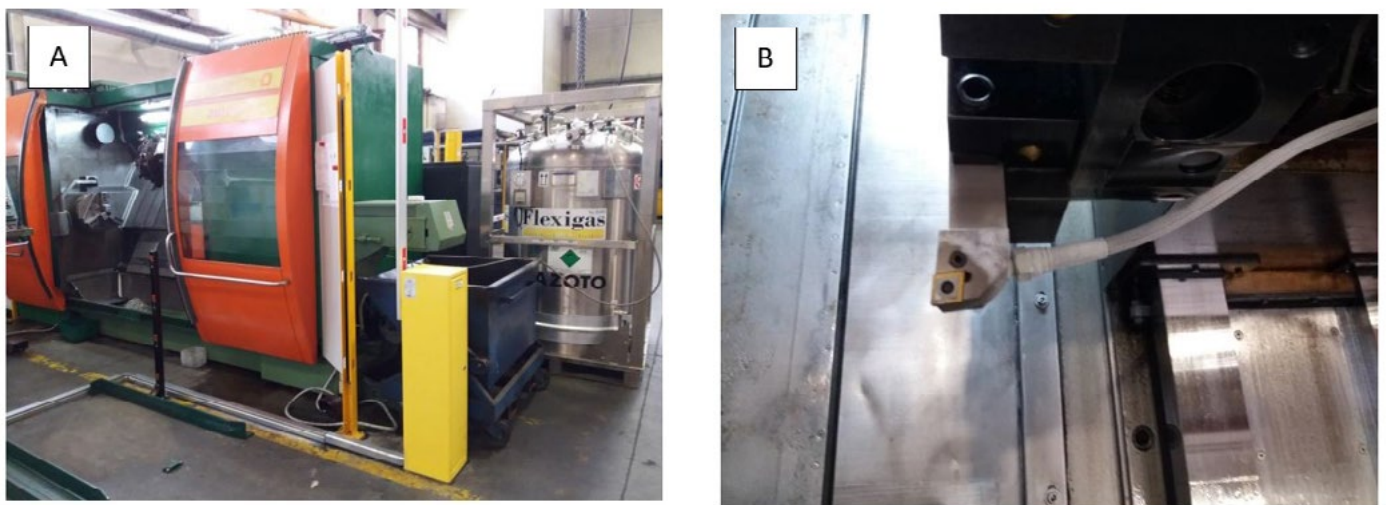


Fig.2 - Set-up sperimentale. A. Vista globale del tornio a controllo numerico; B. dettaglio dell'impianto di convogliamento dell'azoto liquido

Tab.1 - Variabili di taglio

Prova	Velocità di taglio [m/min]	Pressione LN2
1	100	No LN2 (a secco)
2	100	Medium
3	100	Medium
4	120	max

I campioni di Ti6Al4V lavorati secondo le condizioni di Tab. I sono stati caratterizzati per:

- microscopia ottica ed elettronica, previa tipica preparazione di sezioni metalliche,
- microdurezza Vickers HV1,
- diffrazione a RX con tubo Cu-K α per l'analisi delle fasi cristalline,
- topografia confocale 3D per l'analisi della finitura e dei difetti superficiali.

L'usura degli inserti è stata valutata nel fianco e nel petto dell'utensile per stereo-microscopia ottica e microscopia elettronica. Lo studio è stato completato con analisi al microscopio elettronico dei trucioli di scarto per la valutazione della deformazione plastica e della presenza di contaminanti.

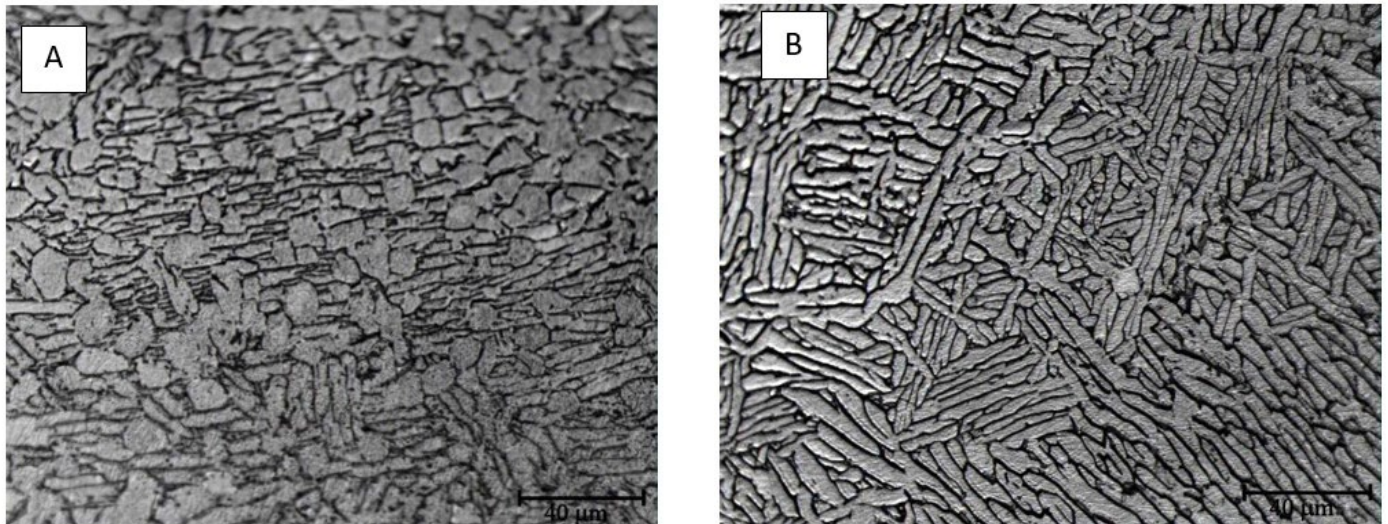


Fig.3 - Microscopie ottiche (attacco: reattivo si Kroll) del Ti6Al4V sottoposto a tornitura criogenica (A) e a secco (B)

I dati di diffrazione a RX, riportati in Fig. 4, sono una ulteriore dimostrazione delle evidenze microstrutturali riportate in Fig. 3. Entrambi i campioni presentano i picchi della fase α e della fase beta β , ma con intensità differenti. Il campione lavorato in assenza di azoto liquido presenta, infatti, un picco più alto in corrispondenza della fase β , sinonimo di una maggiore quantità, rispetto al campione sottoposto a tornitura criogenica, a conferma delle elevate temperature che sono state raggiunte durante la lavorazione.

Le analisi microstrutturali dei campioni sottoposti a tornitura criogenica mostrano che velocità di taglio e pressione di LN2 non influenzano la microstruttura.

In Tab. II sono riassunti i dati di microdurezza Vickers HV1 e di topografia superficiale con analisi della rugosità. Tutti i

RISULTATI E DISCUSSIONE

In Fig. 3 sono riportate le micrografie ottiche dei campioni (attacco metallografico con reattivo di Kroll) ottenuto per tornitura criogenica (A) e a secco (B). Si nota che il campione A, lavorato utilizzando l'azoto liquido come lubrorefrigente, presenta una microstruttura equiassica costituita da grani di fase α e fase beta β prevalentemente depositata a bordo grano. Il campione F, lavorato in assenza di azoto liquido, evidenzia una microstruttura aciculare grossolana tipo Widmanstätten in cui si evidenziano grani di α e β organizzati in colonne. L'evidente differenza microstrutturale dimostra che il campione F, durante la lavorazione, ha subito un intenso riscaldamento a temperature prossime alla β -transun.

campioni sottoposti a tornitura criogenica, indipendentemente dalla pressione di apporto di LN2, presentano valori di durezza confrontabili di circa 370 HV1, perfettamente in accordo con la tipologia e di lega, la microstruttura rilevata e con lo stato di trattamento. La durezza del campione della prova 1, lavorato in assenza di azoto liquido, è notevolmente più bassa se confrontata con gli altri campioni, poiché l'elevata temperatura raggiunta in sede di taglio ha determinato modificazioni microstrutturali che hanno peggiorato le proprietà meccaniche del materiale.

Dalle rappresentazioni 3D delle superfici si nota che i campioni lavorati con azoto liquido presentano solchi regolari generati dalla roto-traslazione reciproca pezzo/utensile, mentre un maggior grado di irregolarità è evidentemente

visibile nel campione corrispondente alla prova 1, lavorato in assenza di LN2. In particolare, i solchi di lavorazione presenti sul campione 1, visibili in Fig. 5, presentano un profilo a dente di sega, tipico della presenza di tagliante di riporto sull'utensile che staccandosi man di mano provoca difetti sulla superficie lavorata.

I dati di rugosità riportati in Tab. II evidenziano chiaramente che, nelle condizioni di prova testate, l'utilizzo dell'azoto liquido nella zona di taglio assicura valori di Ra medi notevolmente più bassi e superfici con un maggior grado di regolarità rispetto ai campioni lavorati in assenza di azoto liquido. Più specificatamente, riguardo Ra, l'utilizzo di LN2 assicura un miglioramento medio del 65%. Il campione 1, infatti, lavorato in assenza di azoto liquido, oltre a presen-

tare valori di Ra molto più elevati rispetto agli altri campioni, è caratterizzato da valori di Rsk e Rku peggiori, i sinonimi di maggiore irregolarità superficiale e di superficie con molti picchi dal profilo acuto, deleteri per la resistenza a fatica del componente. Pertanto, in condizioni di taglio critiche, con velocità di taglio, avanzamento giro e profondità di passata molto elevate (condizioni che ricalcano quelle di una sgrossatura), l'utilizzo dell'azoto liquido nella zona di taglio costituisce un effettivo vantaggio sulla finitura superficiale dei pezzi. Inoltre, a parità di condizioni di taglio, una maggiore pressione di LN2 mediamente migliora i valori Ra di un 16% e consente l'ottenimento di superfici con una maggiore regolarità tra valli e picchi.

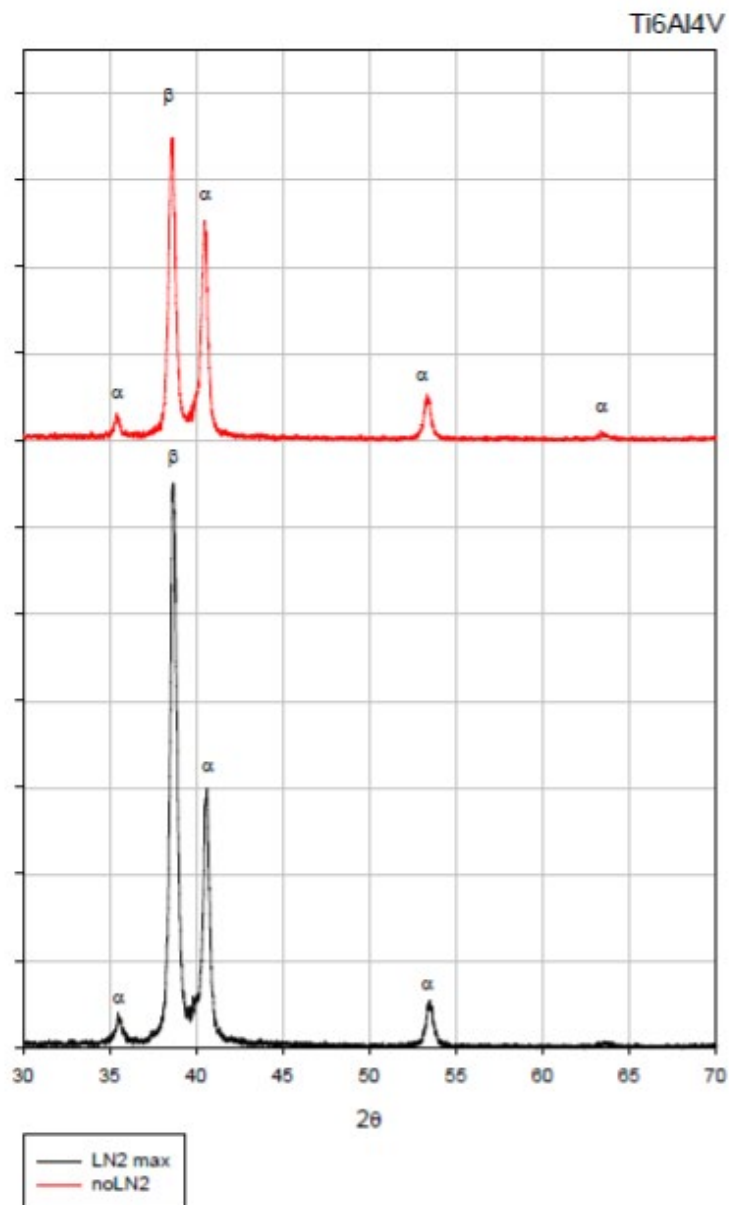
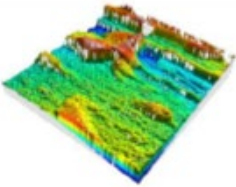
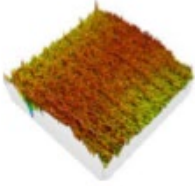
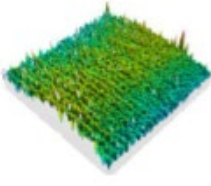
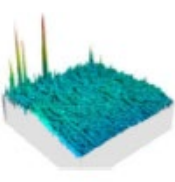


Fig.4 - Diffratogrammi a RX del Ti6Al4V sottoposto a tornitura criogenica (con massima pressione di azoto liquido) e a secco

Tab.2 - Risultati di topografia superficiale, rugosità e durezza

N°prova	3D della superficie lavorata	HV1	Ra [μm]	Rsk	Rku
1		315 ± 8	3.4 ± 0.5	2.10 ± 0.4	7.90 ± 1.4
2		374 ± 3	2.5 ± 0.7	0.12 ± 0.2	3.69 ± 0.4
3		369 ± 11	2.6 ± 0.2	0.11 ± 0.2	3.01 ± 0.6
4		371 ± 13	2.7 ± 0.2	0.60 ± 0.2	4.01 ± 0.7

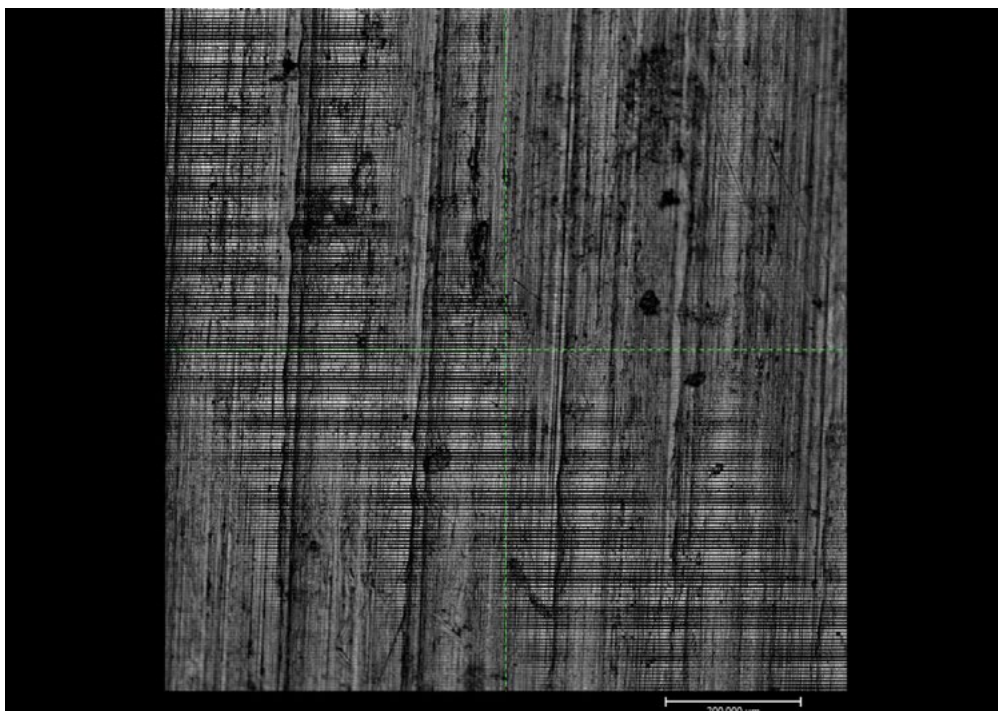


Fig.5 - Microscopia ottica a basso ingrandimento della superficie del campione dopo la prova 1 (a secco)

La valutazione dell'usura degli inserti è un fattore determinante nella valutazione di una lavorazione meccanica. Una maggiore usura degli inserti comporta un notevole incremento delle forze in gioco durante la lavorazione con conseguente incremento dei carichi sulla macchina e effetti negativi sulla finitura superficiale dei pezzi. Per questa ragione, oltre alle analisi sui pezzi lavorati, sono stati condotti test sugli inserti utilizzati nella lavorazione per microscopia ottica ed elettronica.


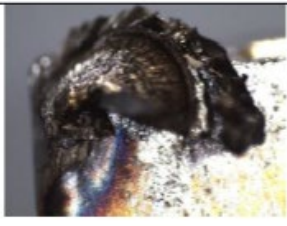






In Tab.III si riportano le micrografie scattate allo stereo-microscopio degli inserti che hanno lavorato secondo le condizioni di Tab. I. Tra i campioni 2, 3, 4, tutti sottoposti a tornitura criogenica, non si rilevano delle differenze sostanziali nell'usura degli inserti. L'usura del campione 1, tornito in assenza di azoto liquido, non è valutabile per stereo-microscopia perché un truciolo si è saldato all'inserto a causa delle elevate temperature raggiunte durante la lavorazione. L'analisi dell'usura degli inserti è stata approfondita al microscopio elettronico di cui nelle Figg. 4, 5 e 6 si riportano alcune micrografie.

L'analisi al microscopio elettronico degli inserti conferma che tra i campioni 2, 3, 4 tutti sottoposti a tornitura crioge-

nica, non sussistono differenze sostanziali, mentre sull'inserto del campione corrispondente alla prova 1 si evidenzia la presenza di un grosso truciolo saldato all'inserto (Fig. 6), presumibilmente a causa delle elevate temperature raggiunte nella zona di taglio. Questo fenomeno comporta un netto peggioramento della finitura superficiale con conseguenze deleterie sulla resistenza a fatica dei componenti che spesso necessitano di ulteriori e costose lavorazioni di finitura.

A completamento, sono state eseguite indagini microscopiche dei trucioli di cui si riportano le evidenze sperimentali in Fig. 7. Si nota immediatamente che il truciolo proveniente da a secco presenta visibili creste indice della grande deformazione di scorrimento subita. Il truciolo da lavorazione criogenica si presenta più liscio e con solchi di deformazione meno evidenti. L'analisi EDS dei trucioli (Fig. 8), mostra la completa assenza di contaminanti dei trucioli. Non si evidenziano segni di ossidazione e nitrurazione, pertanto i trucioli possono essere facilmente riciclati e riutilizzati. Analogamente, anche i pezzi lavorati con LN2 sono completamente puliti e privi di sostanze nocive, pertanto le successive operazioni di pulizia imposte dal settore biomedicale e di finitura superficiale possono essere ridotte al minimo.

Tab.3 - Micrografie allo stereo-microscopio del petto e del fianco dell'utensile dopo le prove descritte in Tab. I

Prova	Petto utensile	Fianco utensile
1		
2		
3		
4		

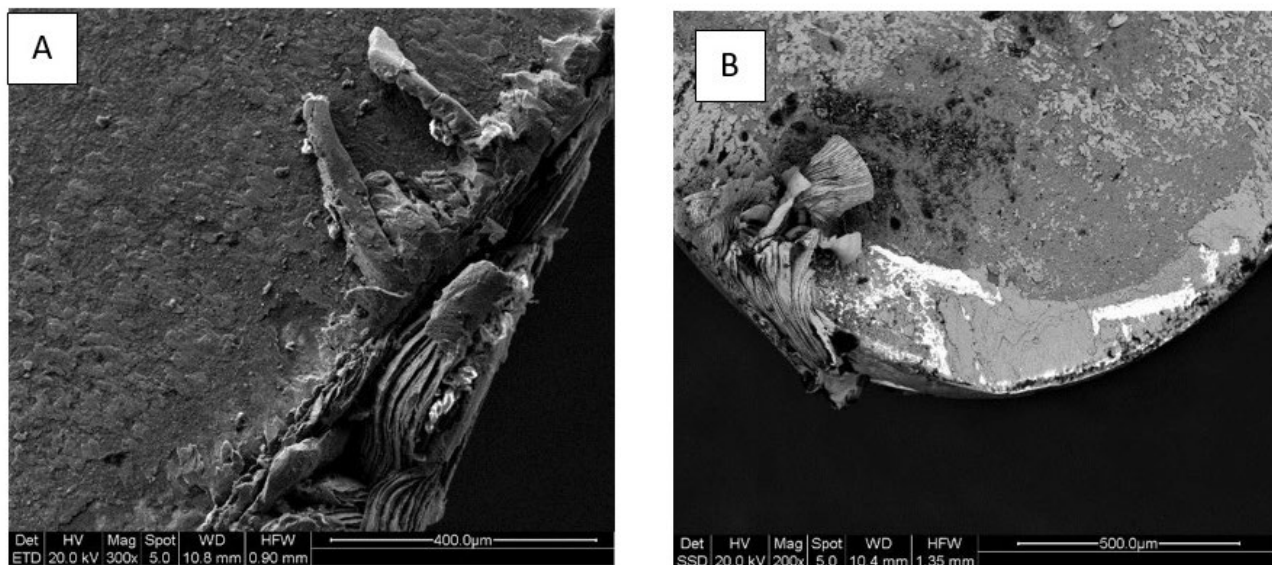


Fig.6 - Micrografie SEM-SE (A) e SEM-BSE (B) dell'inserto relativo alla prova 1 in cui sono visibili il truciolo saldato (A) e l'usura severa (B)

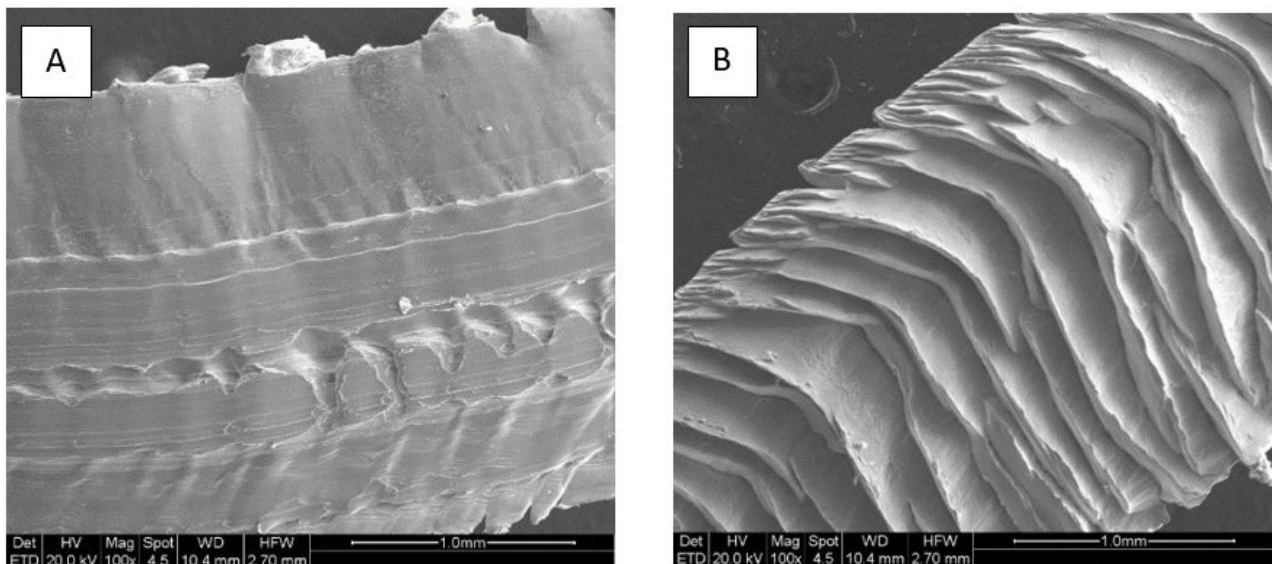


Fig.7 - Micrografie SEM-SE dei trucioli dopo tornitura criogenica (A) e tornitura a secco (B)

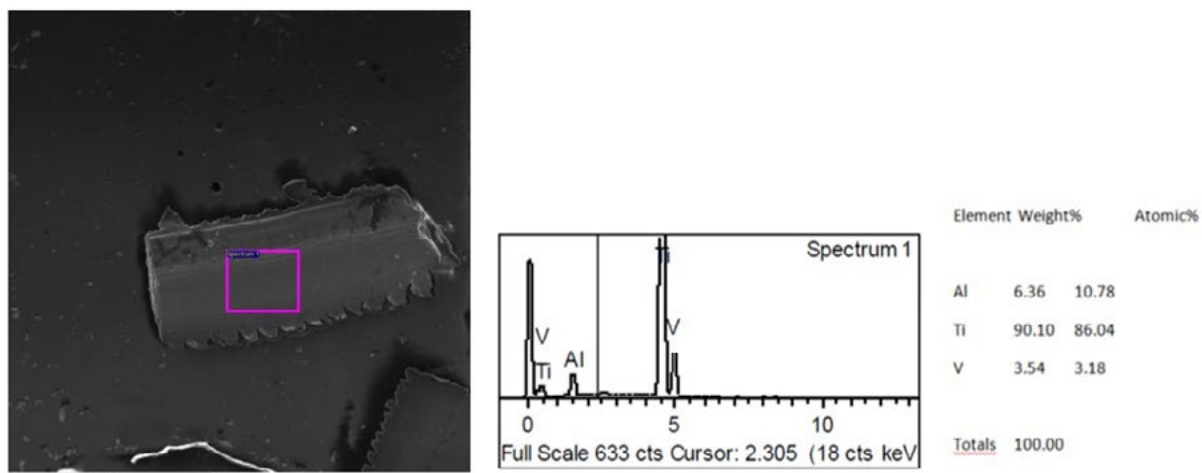


Fig.8 - Micrografia SEM-SE e microanalisi EDS del truciolo dopo tornitura criogenica, non contaminato e non nitrato

CONCLUSIONI

In questo lavoro sperimentale è stata valutata l'efficacia del raffreddamento criogenico nella lavorazione di tornitura della lega Ti6Al4V. Dai risultati delle prove microscopiche, microanalitiche, topografiche e di microdurezza si può concludere che l'utilizzo dell'azoto liquido come lubro-refrigerante nella zona di taglio costituisce un effet-

tivo guadagno in termini di usura degli inserti e proprietà microstrutturali, meccaniche e di finitura superficiale del pezzo in lavorazione. Si possono ottenere componenti puliti e con bassa rugosità, che non richiedono dispendiose operazioni successive di pulizia e di finitura. Anche i trucioli risultano non contaminati e possono essere facilmente riutilizzati e riciclati.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Mohamed Abdel-Hady Gepreel, Mitsuo Niinomi, Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Volume 20, April 2013, Pages 407-415.
- [2] Dipti Daga, Divya Mehrotra, Shadab Mohammad, Geeta Singh, S.M. Natu, Tentpole technique for bone regeneration in vertically deficient alveolar ridges: A review, *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, Volume 5, Issue 2, May–August 2015, Pages 92-97.
- [3] G.P. CAMMAROTA, L. CESCHINI, A. MORRI "Impact test in Ti6Al4V and AA6082 welded joints", *Extended Summaries of the "18th Danubia-Adria Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics"* 26-29 Settembre 2001, Steyr, Austria, Ed. E.J. Beer, , pp 75-76. ÓIAV-ASESA Wien 2001. [cod 5066010/01.
- [4] E. O. Ezegwu, J. Bonney, Y. Ymane, An overview on the machinability of aeroengine alloys, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 134 (2003), pp. 233-253.
- [5] M. Lofti, M. Jahanbakhsh, A. Akhavan Farid, Wear estimation of ceramic and coated tools in turning of Inconel 625: 3D Fe analysis, *Tribol. Int.* 99, 2016, pp. 107-116.
- [6] Y. M. Shashidhara, S. R. Jayaram, Vegetable oils as a potential cutting fluid – an evolution, *Tribol. Int.*, vol. 43, 2010, pp. 1073-1081.
- [7] S. Sartori, L. Moro, A. Ghiotti, S. Bruschi, *Trib. Int.*, vol. 105, 2017, pp. 264-273.
- [8] ASTM F1472-14. Standard specification for wrought titanium-6 aluminum-4 vanadium alloy for surgical implants applications.