

Titanio: numero atomico 22.



Francesco Biaggini, imprenditore, CEO di AbutmentCompatibili.com*

**Diplomato Itis a Genova nel 1995, ha intrapreso il proprio percorso formativo seguendo come organizzatore i corsi di Parodontologia ed Implantologia presso lo studio Sicor del Dr. Giuseppe Corrente, i corsi di Protesi del Dr. Aldo Anglesio Farina, i corsi di Implantologia del Prof. Paolo Mangiante e del Prof. Alberto Rebaudi. Responsabile area implantologia presso la Biaggini Medical Devices e specialist per KLS Martin dal 2000 al 2012. Ha partecipato alla stesura dell' "Atlante di Implantologia" 1°, 2°, 3° e 4° edizione. Specializzato in Chirurgia Guidata con firma su pubblicazioni internazionali, relatore in corsi di Odontoiatria Digitale in Università e Associazioni Scientifiche. Firmatario di pubblicazioni sulla stampa 3D e sulla protesi implantare. Dal 2013 è CEO di AbutmentCompatibili.com*

Cosa sappiamo davvero del titanio e cosa pensiamo di sapere su questo metallo dal numero atomico 22? Con l'avvento della fresatura in house nel settore dentale si è iniziato a lavorare con processi di asportazione metalli come il titanio, dalle caratteristiche fisico chimiche quasi uniche. Spesso, però, i processi di lavorazione semi industriale non sono supportati da un'adeguata conoscenza del materiale e delle corrette procedure di lavorazione, e ancora oggi in molti tendono a fresare il titanio come se fosse un qualsiasi metallo, senza conoscere le insidie e ignorando le inevitabili conseguenze che questo approccio può comportare. Questo breve articolo, una collezione estrapolati di articoli e tesi di laurea e di valutazioni personali, un taccuino di appunti, non ha la pretesa di insegnare come lavorare il titanio, piuttosto intende evidenziare gli elementi che un operatore a bordo macchina (anche nella versione più desktop) dovrebbe approfondire per una corretta conoscenza della materia. Il presente articolo è frutto di una raccolta di dati e informazioni, tesi di laurea, articoli pubblicati, esperienze dirette e rappresenta un emozionante viaggio fin nelle profondità della lega di titanio.

PROPRIETÀ FISICHE DEL TITANIO ⁽¹⁾

Il titanio situato nel IV gruppo della tavola periodica con numero atomico 22, ha eccellenti proprietà dal punto di vista ingegneristico:

- bassa densità;
- alta resistenza (è resistente quanto l'acciaio e due volte più dell'alluminio);
- basso modulo di elasticità;
- bassa conducibilità termica;
- bassa espansione termica;
- eccellente resistenza a corrosione;
- biocompatibilità.

Il titanio, estratto dai minerali, una volta reso puro (Fig. 1) si presenta bianco e brillante, ed è duttile solo se contiene quantità di ossigeno trascurabili; si brucia in aria ed è l'unico elemento che si brucia in azoto puro. Il titanio può esistere in due forme cristalline: la fase (*alfa*) a cui corrisponde una struttura cristallina esagonale compatta, stabile a basse temperature, e la fase (*beta*) che ha una struttura cubica a corpo centrato, stabile alle alte temperature. Nel titanio non legato la fase è stabile a tutte le temperature fino a 882°C, dove si trasforma in fase; questa temperatura è conosciuta come temperatura di "beta transus" e la fase è stabile da 882°C al punto di fusione, ovvero 1660°C. Il titanio ha un basso valore di densità (4.54 g/cm³), approssimativamente il 56% dell'acciaio, è il 60% più



Fig. 1. Il titanio nella sua forma più pura.

pesante dell'alluminio, ma due volte più resistente.

IL TITANIO E LE SUE LEGHE

Il titanio e le sue leghe sono classificati in tre grandi categorie, in base alle fasi predominanti presenti nella microstruttura. A temperatura ambiente il titanio ha struttura cristallina esagonale chiamata (*alfa*); a circa 882°C, la fase si trasforma in una struttura cubica a corpo centrato, fase (*beta*), stabile fino al punto di fusione, tra 1650°C e 1700°C. L'alluminio stabilizza la fase, innalzando la temperatura di trasformazione alfa-beta; tra gli altri alfa stabilizzatori ci sono carbonio, ossigeno ed azoto, che formano soluzioni solide interstiziali nel titanio. Gli effetti di rinforzo di questi ultimi elementi interstiziali scompaiono nel range di temperatura da 260°C a 430°C, mentre gli effetti di rinforzo dell'alluminio rimangono fino a circa 540°C. Oltre all'effetto di rinforzo, entro questi limiti gli elementi interstiziali causano infragilimento. I beta stabilizzanti, come idrogeno, rame, silicio, palladio, cromo, niobio, ferro, manganese, molibdeno, tantalio e vanadio, abbassano la temperatura di trasformazione alfa-beta, rendendo la fase stabile alle basse temperature; stagno e zirconio, infine, sono altamente solubili in entrambe le fasi e sono sostanzialmente neutrali nelle quantità presenti nelle leghe attuali, agendo come rinforzanti della fase. Siccome la struttura cubica del titanio beta contiene un maggior numero di piani di scorrimento rispetto a quelli presenti nella forma esagonale alfa, il titanio beta è più facilmente deformabile.

LE LEGHE ALFA

La principale variabile microstrutturale delle leghe alfa (Fig. 2) è



Fotografa il QR Code con il tuo smartphone per consultare la tabella comparativa delle leghe di titanio.



Fig. 2. Il titanio nella sua forma più pura.

la dimensione del grano. Snervamento e rottura (creep) sono direttamente influenzate dalla dimensione. Leghe "Super Alfa" sono tipologie ad altissimo contenuto di alluminio ed estremamente povere di grani in fase beta. Le leghe alfa più comuni sono la lega Ti-5Al-2,5Sn ed una lega con bassa quantità di elementi interstiziali (ELI), che ha la stessa composizione della precedente. La qualità ELI può essere ottenuta commercialmente per colata o con ogni altro tipo di lavorazione ed è usata in numerose applicazioni aerospaziali; inoltre, è utilizzata per realizzare serbatoi a riempimento di idrogeno liquido e per vasi ad alta pressione operanti al di sotto dei -200°C , poiché essa mantiene duttilità e tenacità alle temperature criogeniche. Troviamo spesso titanio ELI nelle produzioni di impianti dentali israeliani, questo paese è stato uno dei primi ad usare queste leghe per scopi militari aumentandone la disponibilità anche nelle produzioni civili e medicali.

LE LEGHE BETA

Il titanio può esistere completamente in fase beta (Fig. 3) a temperatura ambiente (fase beta metastabile); l'aggiunta di alcuni elementi nella lega può inibire la trasformazione da beta

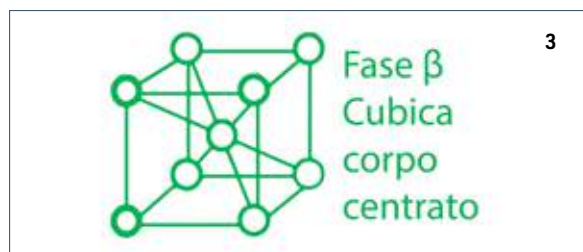


Fig. 3. Fase Beta del titanio.

ad alfa. Le leghe beta sono abbastanza ricche di beta stabilizzanti, e povere di alfa stabilizzanti, in modo che possa essere ottenuta, tramite velocità di raffreddamento appropriate, una microstruttura in cui sia presente solo fase beta. Le leghe beta sono instabili e la precipitazione della fase alfa nella fase beta metastabile è un metodo usato per rinforzarle. Sono, quindi, leghe in grado di acquisire una buona durezza, hanno buona lavorabilità a freddo e presentano alta resistenza quando sono invecchiate.

LE LEGHE ALFA-BETA

Le leghe Alfa-Beta contengono sia elementi alfa stabilizzanti che beta stabilizzanti. Generalmente, quando si desidera un rinforzo, le leghe vengono raffreddate rapidamente a partire da alta temperatura. Le leghe Alfa-Beta hanno un'alta resistenza ma sono meno formabili delle leghe alfa. Questa classe di leghe di titanio incide su oltre il 70% di tutto il titanio impiegato commercialmente. Dal punto di vista microstrutturale, i costituenti alfa, quelli rimasti beta e quelli trasformati in beta possono esistere in diverse forme: equiassici, aciculari o come combinazione di questi due. Le strutture equiassiche

si formano durante la lavorazione della lega nel range di temperature alfa-beta e durante le eventuali ricotture a basse temperature; le strutture aciculari, invece, hanno origine da lavorazioni o da trattamenti termici a temperature prossime alla beta transus, seguiti da rapido raffreddamento. Il rapido raffreddamento dalle alte temperature nel range alfa-beta si traduce nella formazione di strutture primarie di alfa equiassico e secondarie di beta trasformato.

CONCETTI GENERALI SULLA LAVORABILITÀ DEL TITANIO

Il titanio e le sue leghe sono sempre state caratterizzate da un'estrema difficoltà di lavorazione ⁽²⁾, dovute alle particolari caratteristiche meccaniche e chimiche del materiale: la bassa conducibilità termica, l'alta reattività chimica e il basso modulo di elasticità del materiale. Il titanio ha bassa conducibilità termica, per cui il calore generato dall'azione di taglio non è dissipato velocemente per conduzione all'interno del pezzo in lavorazione, e si concentra sul tagliente e sul petto dell'utensile. Le polveri di titanio in saturazione delle camere di fresaggio, se non correttamente gestite, possono incendiarsi e bruciare in modo violento. Il titanio ha modulo elastico relativamente basso, apprezzato sul prodotto finale, ma che può essere causa di difficoltà di lavorazione. Sotto la pressione dell'utensile il materiale "elastico" tende ad allontanarsi dalla zona di taglio soprattutto nelle passate "leggere" tipiche del settore dentale. Le parti più sottili si deflettono e il bordo tagliente più che tagliare tende a strisciare sul pezzo, provocando vibrazioni, problemi di tolleranza e portando le frese ad una sovra produzione di calore. Le forze di taglio e potenze richieste sono inferiori rispetto ad altri materiali, tuttavia a questi bassi valori di forze si associa una molto più piccola area di contatto sul petto dell'inserto, rispetto a quando si tagliano altri tipi di materiali. Questo significa che lo sforzo di compressione sul tagliente è molto elevato, e determina usura e deformazione, quindi una ridotta vita degli utensili da taglio. Il materiale asportato per ottenere una ragionevole vita utile dell'inserto risulta minore di quando si lavora acciaio. Inoltre, a causa della piccola area di contatto, l'angolo del piano di scorrimento è ampio (Fig. 4).

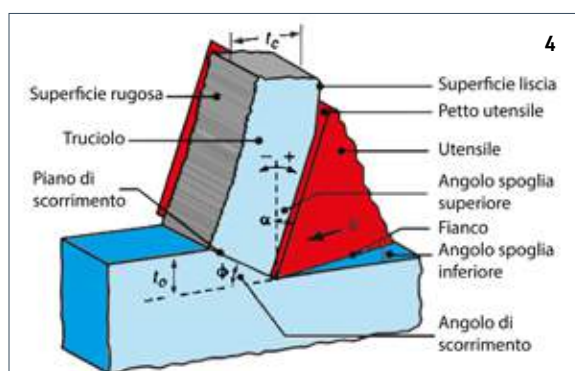


Fig. 4. Processo di taglio del titanio, definizioni.

Tenendo conto delle caratteristiche del materiale sopra descritte, si può arrivare a dei criteri generali di lavorazione:

- utilizzo di basse velocità di taglio, per minimizzare la creazione di calore. Velocità di taglio eccessive sono molto più dannose con il titanio che con altri materiali: un aumento della velocità del 30% può ridurre dell'80% la durata dell'utensile;
- la velocità di taglio incide sulla durata dell'inserto molto di più che gli altri parametri di taglio;
- impiego di avanzamenti relativamente alti. La temperatura è meno influenzata dall'avanzamento che dalla velocità di taglio, pertanto è conveniente usare gli avanzamenti più alti possibili, compatibili con una buona lavorazione;

- utilizzo di taglienti positivi che consentano al truciolo di scorrere più velocemente sul petto del tagliente, e quindi di limitare l'effetto di incrudimento;
- uso di un flusso molto abbondante di fluido da taglio, per aumentare l'effetto refrigerante. È necessario inoltre che il flusso sia diretto esattamente nel punto di taglio. In seguito alla bassa conducibilità termica infatti l'effetto refrigerante è molto ridotto se non esercitato direttamente sul punto di creazione del calore;
- mantenimento di un'affilatura degli utensili molto accurata e loro sostituzione al minimo accenno di usura. Quando si lavora con una macchina utensile complessa o con un centro di lavoro (fresatori a 5 assi da metallo), a causa dei costi di ammortamento della macchina, la produzione è molto più importante della vita dell'utensile da taglio, di conseguenza è consigliabile far lavorare un utensile fino al limite della sua capacità, ma sostituirlo non appena la sua efficienza di taglio comincia a diminuire;
- assicurare la massima rigidità di tutto il sistema di lavorazione (macchina, mandrino, portamandrino e utensile) per compensare l'elasticità del materiale ed evitare al massimo le vibrazioni;
- non fermare mai l'avanzamento mentre pezzo ed utensile in movimento sono a contatto. Lasciare sostare l'utensile provoca l'immediato incrudimento e surriscaldamento del materiale e favorisce abrasioni, grippature e rotture dell'utensile.

CARATTERISTICHE DEGLI UTENSILI

La fresa adatta alla lavorazione è scelta mediante angoli e geometrie specifiche per la lavorazione del titanio (Fig. 5):

- angolo di registrazione;
- angolo di inclinazione;
- angolo di spoglia superiore;
- passo;
- micro geometria del tagliente.

L'angolo di registrazione è l'angolo tra il tagliente principale e la



Fig. 5. Esempio di fresa multilama.

superficie del pezzo da lavorare. Questo angolo influenza fortemente l'entità degli sforzi e lo spessore del truciolo durante la lavorazione. Il titanio, avendo la tendenza a flettersi, come prima illustrato, necessita di forze di taglio ridotte. Un angolo di registrazione minore riduce lo spessore del truciolo, determina la ripartizione del materiale su una superficie più ampia del tagliente, comporta una penetrazione più graduale nel taglio, con una conseguente riduzione della pressione radiale e una protezione del tagliente. Lo spessore di truciolo prodotto e la lunghezza della superficie di contatto sono notevolmente ridotti. Per la stessa passata vengono generate forze di taglio più basse ed è richiesto un minore assorbimento di potenza. Le frese doppio positive hanno un'azione di taglio dolce, quindi sono vantaggiose quando il pezzo è deformabile o instabile, ha la tendenza

ad incrudirsi, oppure quando la potenza disponibile è limitata. La spoglia positiva è quella più usata, consente un utilizzo migliore della capacità della macchina e provoca un minor riscaldamento del tagliente. L'angolo di spoglia negativo si dovrebbe utilizzare quando è richiesto un tagliente più robusto, come ad esempio per la fresatura di materiali come il cromo-cobalto. Un'altra caratteristica fondamentale da prendere in considerazione nella scelta della fresa più adatta ad una generica lavorazione, è il passo, ossia la distanza angolare tra i denti sulla fresa, e varia a seconda della fase di lavorazione associata. La scelta del passo nella lavorazione del titanio non è così rigorosa. Tuttavia, dato che il passo determina il numero di denti, l'avanzamento tavola e il relativo tempo di truciolo-truciolo, si opta, se possibile, verso un passo stretto che consenta di aumentare la produttività su lavorazioni industriali; mentre si predilige un passo largo nelle lavorazioni odontoiatriche che asportano volumi di materiale decisamente inferiori alle meccanica. Infine, nella scelta della geometria di una fresa per il titanio, incide fortemente la micro geometria, ossia la preparazione del tagliente. La micro geometria adatta alla lavorazione del titanio deve avere tagliente positivo e affilato, condizione fondamentale nel taglio del materiale. Il tagliente, inoltre, deve avere una buona resistenza all'usura per abrasione, deformazione plastica e diffusione, nonché tenacità e robustezza. È possibile prolungare la vita degli utensili da taglio per la fresatura frontale usando sempre una fresatura con alimentazione concorde (Fig. 6), riducendo al minimo indispensabile le lavorazioni asimmetriche (Fig. 7) delle frese, soprattutto le più

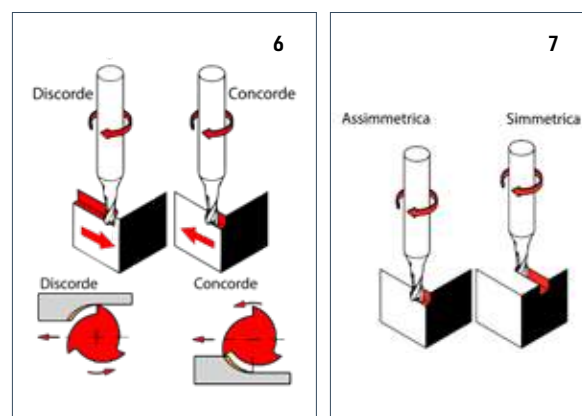


Fig. 6. Esempio di fresatura concorde e discorde.

Fig. 7. Esempio di fresatura simmetrica e asimmetrica.

piccole di diametro. Nella fresatura in concordanza la direzione di avanzamento del pezzo da lavorare corrisponde a quello di rotazione della fresa nell'area di taglio. Durante la lavorazione i trucioli di titanio tendono a saldarsi al tagliente della fresa e, quando il tagliente rientra nel metallo e i trucioli si staccano, portano via una parte del tagliente. La fresatura con alimentazione concorde produce un truciolo fine quando i denti dell'utensile da taglio escono dal pezzo, e quindi il truciolo si separa dal materiale nel punto in cui ha spessore minimo, riducendo così la tendenza del truciolo a saldarsi al tagliente. Come in tutte le operazioni di lavorazione del titanio, devono usarsi utensili affilati per ridurre lo sfregamento e la tendenza alla saldatura. Gli angoli di spoglia inferiore o angoli di incidenza per le frese frontali devono essere maggiori di quelli usati per l'acciaio. In generale, si sceglie il diametro della fresa tenendo conto delle dimensioni della stessa rispetto al pezzo da lavorare e della potenza della macchina. La posizione della fresa rispetto al pezzo da lavorare e l'impegno dei denti della fresa sono fattori fondamentali per l'esecuzione corretta dell'operazione.

DEFORMAZIONI DEL SOTTOSUOLO MICROSTRUTTURATO DURANTE LA FASE DI FRESATURA ⁽³⁻⁴⁾

Il processo di fresatura nella sua micro o nanodimensione è un evento traumatico per il grezzo da fresare. Quello che nella macro dimensione è un tagliente risulta essere nella microdimensione un evento brutale, distruttivo, traumatico. I metalli, le plastiche o gli agglomerati di polveri vengono scossi da un utensile che strappa o sgretola parte del loro tessuto esterno, questo si ripercuote sugli strati più prossimi del materiale con deformazioni e micro cricche (Fig. 8). Parametri di taglio sbagliati, utensili non dedicati al materiale fresato, frese di scarsa qualità o usurate possono aumentare notevolmente questo trauma lasciando ripercussioni strutturali anche importanti. Analizziamo il fenomeno e le possibili cure.

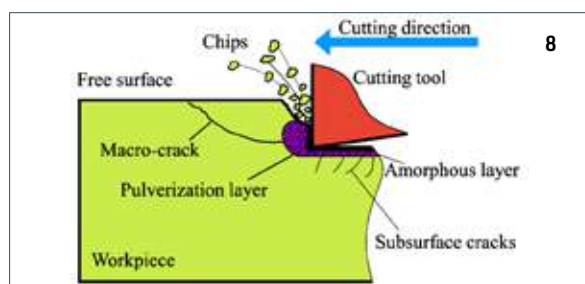


Fig. 8. Suddivisione delle zone di trauma causate dalle fresatura.

MICROSTRUTTURA

La deformazione microstrutturale del sottosuolo causata dalla lavorazione consiste in bordi di grano deformati nella direzione del taglio e allungamento degli stessi (Fig. 9). Questi tipi di difetti sono tipicamente creati durante la lavorazione di leghe di titanio, che nella sua fase Alpha-Beta è formato da grani di fasi differenti di titanio, stabilizzate da metalli aggiunti in fase di colata. La fresa

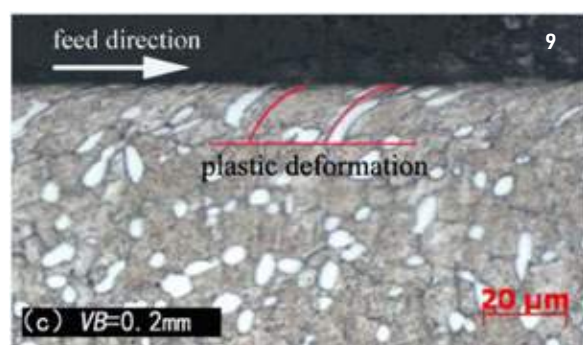


Fig. 9. Deformazione dello strato superficiale del titanio causata da usura degli utensili

con la sua geometria e forma strappa dalla base del grezzo una parte di esso, il truciolo, e l'area sottostante si polverizza nel primissimo strato e si deforma negli strati sottostanti. I grani stessi si deformeranno e scivoleranno lungo le linee di collegamento dei cristalli Alpha e Beta; il calore causato da questo movimento e dall'attrito della fresa cercherà di spostare di fase il metallo e micro crepe si creeranno lungo le aree di maggior cedevolezza dello stesso. Osservazioni delle foto ad importanti ingrandimenti ci consentono di concludere che la microstruttura nella regione superiore fino a diversi micrometri al di sotto della superficie lavorata tende a mostrare deformazioni plastiche nella direzione dell'avanzamento

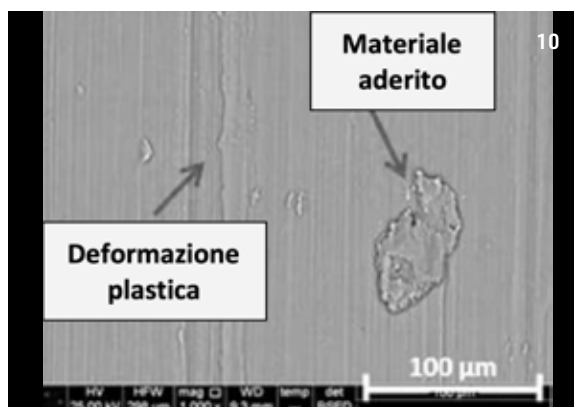


Fig. 10. Esempi di difetti superficiali causati da una refrigerazione errata o non sufficiente.

delle frese (Fig. 10). Le immagini evidenziano che la gravità della deformazione plastica del sottosuolo è dipendente dalla velocità di taglio e dall'usura dell'utensile. Questa forma di alterazione microstrutturale è tipicamente associata al riscaldamento superficiale altamente localizzato causato da una lavorazione con parametri errati o da uno strumento usurato. Con l'aumento della velocità di taglio, da bassa ad alta, diminuiscono le deformazioni plastiche e le alterazioni profonde della microstruttura. La deformazione plastica sulla superficie lavorata è causata dall'elevata pressione di taglio ad alta temperatura durante il processo di lavorazione. La lavorazione prolungata utilizzando un utensile usurato produce una importante deformazione plastica e una profonda alterazione della microstruttura sulla superficie lavorata. Le zone di deformazioni o frantumazione, unite alle rigature lasciate dal trascinamento di trucioli non distaccati dalle frese, o da incapsulamento e trascinamento di parti di tagliente distaccatosi dalle frese (Fig. 11) possono essere classificate come possibili zone di innesco delle fratture. Ogni

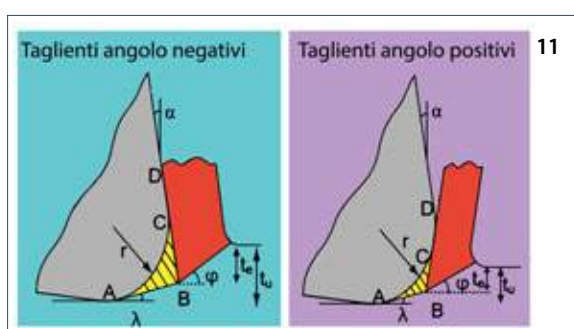


Fig. 11. Taglienti con angoli positivi risultano più efficaci nella lavorazione del titanio, limitando accumulo del calore e deformazioni alle aree circostanti al suo vertice.

piccola crepa, ogni rigatura del metallo, ogni irregolarità tende a concentrare su se stessa le forze; più la superficie risulterà irregolare più la concentrazione sarà elevata.

DIFETTI DI SUPERFICIE

Un'analisi qualitativa al SEM con rivelatore ETD effettuata dall'Università di Padova ⁽¹¹⁾ ha permesso di identificare i principali difetti tipici delle lavorazioni di tornitura e fresatura, ne sono riportati alcuni esempi in Fig. 12. Le diverse tipologie di difettosità si possono categorizzare a seconda del meccanismo che li ha generati:

- Alte temperature: provocano una bassa conducibilità termica e

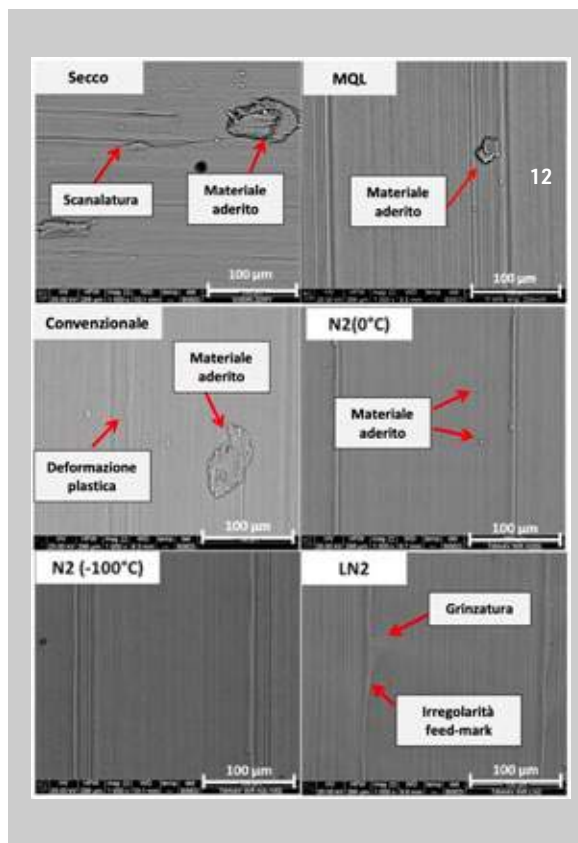


Fig. 12. Differenti difetti superficiali con l'utilizzo di differenti tecniche di refrigerazione.

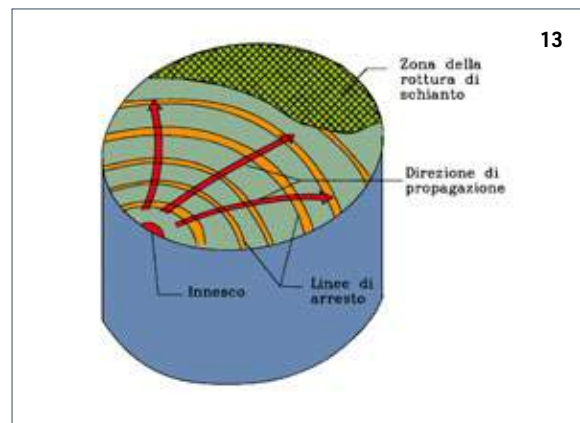


Fig. 13. Schema di propagazione di una frattura



Fig. 14. Esempio di frattura a fatica, punto di innesco, linee di propagazione, zona di schianto.

portano ad avere particelle risaldate sulla superficie, il materiale aderito può provenire da truciolo risaldata o da un reflusso laterale di taglio (side-flow);

- Basse temperature: provocano un calo della plasticità della lega che porta a difetti come irregolarità dei "feed-mark", "side flow", grinze (wrinkles) e strappi.

I difetti maggiormente riscontrati dallo studio sono originati da materiale aderito ed alte temperature; il tipo di lubrificazione e di raffreddamento hanno evidenziato scostamenti importanti, il risultato peggiore è con lavorazioni prive di raffreddamento o lubrificazione, il migliore è quello con un raffreddamento della lavorazione a -100° . Questo studio evidenzia come anche il refrigerante e quindi la temperatura accumulata dall'utensile e dal grezzo possono ulteriormente contribuire a creare difettosità in superficie che sommate a quelle profonde descritte precedentemente possono contribuire all'innesco di microcricche coadiuvanti al meccanismo di rottura a fatica.

MECCANISMO DI ROTTURA A FATICA DEL TITANIO ⁽¹³⁾

La rottura a fatica consiste di tre fasi fondamentali (Fig. 13):

- Fase 1: Innesco di una o più cricche;
- Fase 2: Propagazione della cricca dominante;
- Fase 3: Frattura finale.

Le cricche di fatica hanno generalmente inizio sulla superficie; le condizioni della superficie, rugosità superficiale, graffi o segni di lavorazione meccanica, influenzano in maniera determinante la resistenza a fatica. La deformazione plastica gioca un ruolo fondamentale in questa fase; l'applicazione ripetuta di carichi variabili determina la formazione, all'interno dei grani superficiali, di bande di scorrimento che causeranno l'innesco.

FASE 1: INNESCO

Questo primo stadio, l'innesco, è definito anche assestamento microstrutturale. Slittamenti "disordinati" dei piani cristallini del metallo si localizzano in bande disposte a 45° rispetto alla direzione dello sforzo applicato, generando microintrusioni e microestrusioni (Fig. 14).

La frattura si innesca quasi sempre sulla superficie del pezzo ed è dovuta a irregolarità superficiali di qualsiasi tipo, ad esempio microcricche e microintagli. Complementare conseguenza dell'innesco è la nucleazione di microintrusioni e microestrusioni che determinano l'innesco del danneggiamento per fatica. Sul fondo di tali microintrusioni gli sforzi risultano amplificati per effetto d'intaglio, per cui il materiale in quel punto cederà facilmente e si formeranno delle microcricche. Queste tendono a riunirsi, andando a formare la cricca vera e propria, che si considera ormai nucleata quando raggiunge la profondità di circa 0.1 mm.

FASE 2: PROPAGAZIONE DELLA CRICCA

La cricca si propaga in direzione ortogonale alla direzione esterna. In particolare dopo la nucleazione della cricca, la sua propagazione avviene in maniera transgranulare e in senso perpendicolare a quello del massimo sforzo; ad ogni ciclo di sforzo la cricca avanza di un "passo" e lascia a volte tracce caratteristiche, dette "striature" (Fig. 15). All'apice della cricca si ha intensificazione degli sforzi. Se il materiale è tenace, si ha deformazione plastica e propagazione della cricca; aumenta il raggio di plasticizzazione all'apice della cricca e di conseguenza avviene l'arresto della cricca stessa. Questo arrestarsi e ripartire della cricca per ogni ciclo dà origine alla formazione delle "linee di spiaggia" o arresto tipiche della zona di propagazione.

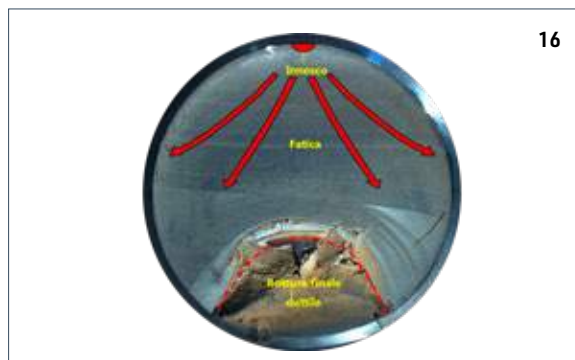
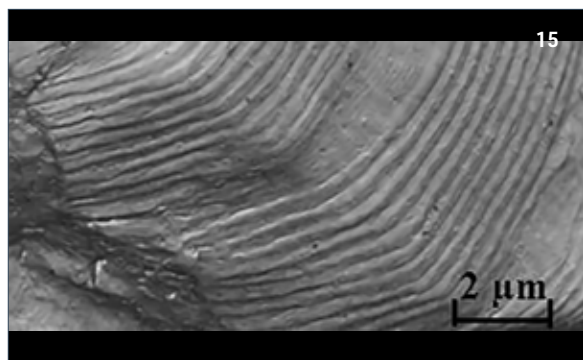


Fig. 15. Esempio di linee di propagazione chiamate anche linee di spiaggia.

Fig. 16. Schema di propagazione di una frattura

FASE 3: FRATTURA FINALE

L'avanzare della cricca porta ad una progressiva diminuzione di sezione resistente; quando la sezione resistente si riduce e la dimensione della cricca raggiunge il valore della sezione critica del materiale, si ha la frattura finale di schianto per sovraccarico (statico) (Fig. 16).

LE CONCLUSIONI

Il titanio è un materiale eccezionale sotto svariati punti di vista, ed indispensabile nell'attuale pratica clinica; le macchine, i fresatori, sono dei gioielli della meccanica, i software CAM sono dei miracoli della mecatronica. Resto sempre stupito dalla leggerezza con il quale, spesso, viene affrontato l'argomento. Nei laboratori o studi dentistici, la semplificazione estrema dei processi di produzione permette di avviare quasi sempre un fresatore a 4 o 5 assi, e di ottenere un manufatto fresato; ma questo non vuol dire padroneggiare la

materia. Il mondo della fresatura del titanio e a cascata degli acciai e delle zirconie è una terra ancora troppo sconosciuta al nostro piccolo settore dentale. Potremmo ottenere immense risorse ed esperienze traslandole dalla meccanica, ma continuiamo a non voler vedere la fortuna che abbiamo a disposizione. Troppo spesso la fresa è un obolo da pagare senza dare grande importanza, l'emulsione è serbatoio di acqua sporca da rabboccare saltuariamente, il CAM un incomprensibile software che pone domande stupide e senza senso. Siamo ragazzini che giocano in un campetto da oratorio, circondati da stadi da Champions League pieni di campioni. Ci basterebbe un po' più di curiosità e dedizione alla comprensione e/o formazione per ottenere miglioramenti incredibili. Il mio consiglio? Non smettete mai di essere curiosi e prestare attenzione a ciò che vi circonda, non date mai nulla per scontato e non aggrappatevi a delle convinzioni; nel mare della vita non puoi fermare le onde, ma puoi imparare a padroneggiarle e surfarle.

BIOGRAFIA ESSENZIALE

- 1) Tecnologie per la realizzazione e funzionalizzazione di nanotubi di titanio. (Dottorato di ricerca. Ing. Annalisa Acquesta).
- 2) Progettazione e realizzazione di un utensile per la fresatura di leghe di titanio. (Tesi di laurea Ing Maria Eugenia Nardis).
- 3) Bi Zhang & Jingfei Yin. The 'skin effect' of subsurface damage distribution in materials subjected to high speed machining. International Journal of Extreme Manufacturing ,
- 4) Du Jin & Zhanqiang Liu. Damage of the machined surface and subsurface in orthogonal milling of FGH95 superalloy. Int J Adv Manuf Technol
- 5) Pun Krishna Kaway & Xueping Zhang. Experimental Study on Surface Integrity of Titanium Alloy Ti6Al4V by Ball End Milling. Journal of the Institute of Engineering .
- 6) A. Pramanik & G. Littlefair. Machining of titanium alloy (ti-6al-4v) - theory to application.
- 7) P.J.T. Conradie, G.A. Oosthuizen, D.M. Dimitrov & M. Saxer. Effect of milling strategy and tool geometry on machining cost when cutting titanium alloys. South African Journal of Industrial Engineering.
- 8) Yang Houchuan & Chen Zhitong & Zhou ZiTong. Influence of cutting speed and tool wear on the surface integrity of the titanium alloy Ti-1023 during milling. Int J Adv Manuf Technol .
- 9) S.Kolahdouz ,M.Hadi, B.Arezoo, S.Zamani. Investigation of surface integrity in high speed milling of gamma titanium aluminide under dry and minimum quantity lubricant conditions.
- 10) Metodi energetici per il calcolo dei fattori di intensificazione delle tensioni in problemi bidimensionali e tridimensionali. (Tesi laurea Ing Luca Pittarello).
- 11) Tecniche ibride di lubrificazione/ refrigerazione atte all'incremento della lavorabilità in tornitura della lega ti6al4v. (Tesi laurea, Ing Daniele Verbaro).
- 12) Rangert B, Jemt T, Jörneus L. Fatigue Fracture of Implant System Using TiN and WC Coated Abutment Screw Forces and moments on Branemark implants. Int J Oral Maxillofac Implants.
- 13) La fatica nei materiali metallici: dalla teoria alla pratica. (Tesi laurea. Ing Luca Baiocchi.)