



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**COMPORTAMENTO AD USURA DI UN ACCIAIO HSS 600
RINFORZATO DA UN RIVESTIMENTO A TEMPERATURA
AMBIENTE**

**WEAR BEHAVIOR OF A HSS 600 STEEL REINFORCED BY A
MULTILAYER COATING AT ROOM TEMPERATURE**

Relatore:

Prof. Marcello Cabibbo

Tesi di Laurea di:

Giulia Baffo

A.A. 2019 / 2020

*Ai miei genitori
Stefano e Livia.*

Sommario

1 - INTRODUZIONE ALLE LAVORAZIONI MECCANICHE.....	4
2 - RUOLO DEI RIVESTIMENTI NEGLI UTENSILI DA TAGLIO.....	7
2.1 - Processo di taglio dei metalli.....	7
2.2 - Tipiche modalità di usura e zona di lavoro sicura.....	9
2.3 - Utensile da taglio.....	12
2.3.1 - Materiale substrato.....	12
2.3.2 – Geometria	14
2.3.3 – Rivestimenti	15
2.4 - Rivestimenti nanostrutturati	18
2.4.1 - Rivestimenti a multistrati	19
2.4.2- Rivestimenti nanostrutturati	23
2.5 - Riepilogo e prospettive	24
3 - UTENSILE DA TAGLIO.....	27
3.1 - Caratteristiche dell'utensile da taglio	27
3.2 - Acciai super rapidi (HSS)	29
3.3 - Usura dell'utensile	31
4 – PROCEDURE SPERIMENTALI	33
5 – RISULTATI	37
6 – CONSIDERAZIONI COMPARATIVE.....	42
7 – CONCLUSIONI.....	47
Bibliografia	49
Ringraziamenti.....	51

NOTA..... 54

1 - INTRODUZIONE ALLE LAVORAZIONI MECCANICHE

La lavorazione meccanica è un processo di fabbricazione sottrattivo per produrre oggetti mediante rimozione di materiale, utilizzando strumenti appositamente progettati per asportare materiale dai pezzi da lavorare, e produrre parti con forme e superfici con determinate specifiche. Per completare questa attività di produzione, lo strumento deve essere in grado di tagliare il materiale del pezzo e realizzare prodotti con geometria, finitura superficiale e tolleranze richieste in modo coerente e conveniente.

Il compito delle macchine utensili viene continuamente messo alla prova dalla necessità di lavorare pezzi sempre più difficili da tagliare, dai severi requisiti ambientali e dalla pressione competitiva per soddisfare gli obiettivi di costo per diverse parti della produzione (1). Il costo degli utensili ricopre, in genere, tra il 2 e il 5% del totale dei costi di produzione. Tuttavia, il suo valore reale è la capacità di aumentare produttività aumentando la percentuale del materiale rimosso, riducendo al minimo i tempi morti della macchina e consentendo altre tecniche di produzione convenienti. L'effetto della velocità di taglio sul costo di lavorazione è presentato schematicamente in Figura 1.

I "costi di produzione fissi" mostrati nella parte inferiore della tabella sono la somma del costo del materiale, delle impostazioni della macchina e tempi di inattività, nonché il costo di smaltimento del refrigerante, costi generali e altri costi indipendenti dalla velocità di taglio. Sulla parte superiore del grafico ci sono due linee contrassegnate con (1) e (2), raffigurante i costi di lavorazione che dipendono dalla velocità di taglio. La linea (1) rappresenta la somma dei costi diretti, principalmente di manodopera, ma anche il costo dell'energia, dell'acqua e di altre forniture. Questi costi (per pezzo prodotto) diminuiscono con la velocità di taglio e con l'aumentare dei pezzi prodotti nello stesso periodo di tempo. La linea (2) rappresenta i costi degli utensili che aumentano con la velocità di taglio. Include il costo degli utensili che si consumano più velocemente e, perciò, devono essere sostituiti,

i costi di ricondizionamento dell'utensile (quando applicabile) e, soprattutto, il costo del tempo e della perdita di produttività quando la macchina viene fermata per sostituire l'utensile usurato. Il costo di lavorazione effettivo è la somma dei costi fissi e di quelli dipendenti dalla velocità ed è, di conseguenza, determinato dal rapporto tra il costo decrescente della lavorazione e il costo crescente della lavorazione con utensili. La velocità di taglio all'intersezione delle due curve, al minimo della curva di costo totale, è la velocità di taglio ottimale, V_{opt} , per particolare ciclo di produzione.

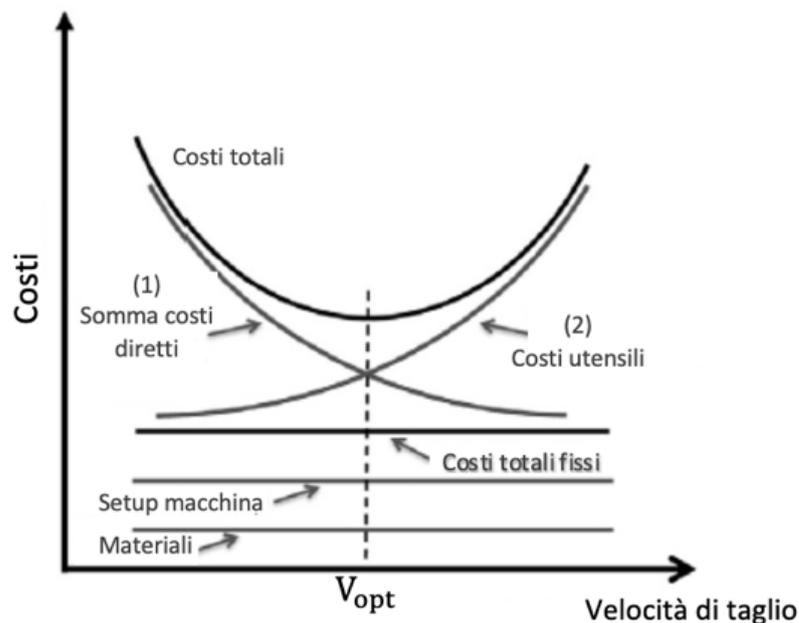


Figura 1 - Effetto della velocità di produzione sui costi di produzione (2)

La richiesta di aumentare la produttività aumentando la velocità di taglio, e applicando condizioni di servizio più restrittive, ha un impatto significativo sull'utensile di taglio. Un ovvio risultato dell'aumento della velocità di taglio è l'aumento dell'interazione utensile-pezzo, con concomitanti aumenti di temperatura e di usura dell'utensile. Le sempre più crescenti restrittive condizioni di lavoro causano usura progressiva e distorsione del bordo del tagliente che devono essere affrontati quando si progettano nuovi utensili e nuovi rivestimenti per migliorare le prestazioni di taglio.

Di conseguenza, gran parte dello sforzo di fondo per ridurre i costi di produzione è quindi diretto allo sviluppo di nuovi e migliorati utensili di taglio. Gli utensili migliorati possono essere applicati costantemente e con un tasso di usura prevedibile per velocità di taglio più elevate, per condizioni di taglio più difficili e per un periodo di tempo più lungo (ovvero durata dell'utensile).

Questo obiettivo viene raggiunto rivolgendosi a tre variabili chiave dell'utensile:

- 1) la geometria dell'utensile e del tagliente, che definisce la direzione di taglio e influenza l'intensità delle forze di taglio durante la lavorazione;
- 2) il materiale con cui è realizzato lo strumento, che definisce la durezza complessiva, la tenacità, la resistenza a frattura e la stabilità termica del tagliente;
- 3) il rivestimento che, proteggendo lo strumento e il tagliente, svolge un ruolo importante nella determinazione e nel miglioramento delle prestazioni dello strumento.

2 - RUOLO DEI RIVESTIMENTI NEGLI UTENSILI DA TAGLIO

2.1 - Processo di taglio dei metalli

La lavorazione richiede un'elevata quantità di energia per tagliare il materiale del pezzo da lavorare e per separare il truciolo. Per mantenere le forze di taglio ad un livello ragionevole l'utensile, il pezzo o entrambi, durante il processo di taglio, si muovono generalmente con moto rotatorio; di conseguenza, il processo di taglio è descritto da tre parametri: 1) la velocità lineare dell'utensile in corrispondenza del punto di taglio (velocità superficiale, m/min), 2) l'avanzamento assiale dell'utensile per giro (velocità di avanzamento, mm/giro) e 3) la sua corsa radiale (profondità di taglio, mm). L'elevata velocità lineare e il movimento di taglio dell'utensile generano sollecitazioni elevate e alte temperature sul bordo di taglio, con forti gradienti di temperatura e di fatica a poca distanza dal punto di taglio. Tipici schemi di gradienti termici e di fatica sono rappresentati in Figura 2, che mostra l'analisi 2D di elementi finiti (FEA) che simulano la distribuzione delle sollecitazioni (Figura 2a) e la distribuzione della temperatura sul tagliente (Figura 2b).

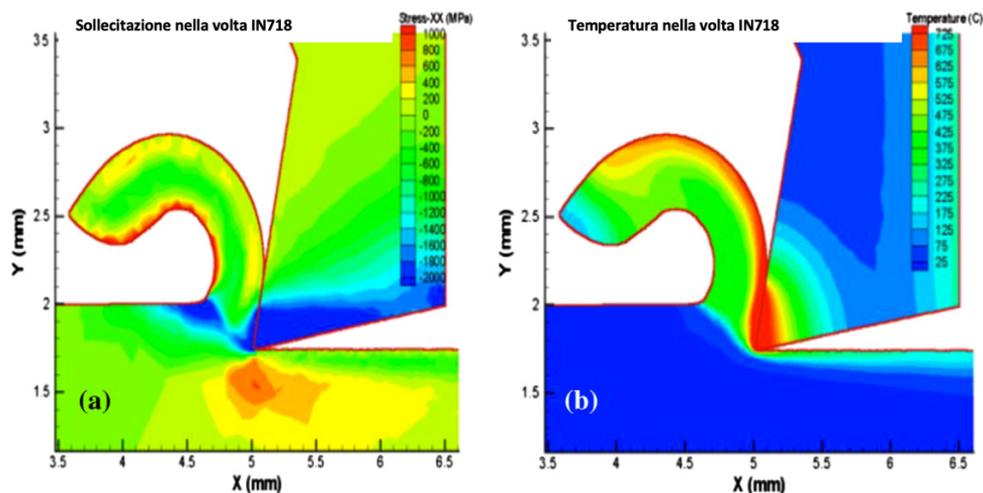


Figura 2 - Simulazioni di analisi 2D di elementi finiti (FEA) (software Third Wave AdvantEdge) di (a) distribuzione delle sollecitazioni e (b) distribuzione della temperatura sul tagliente generata nella volta Inconel 718 (3)

La temperatura più alta si sviluppa sul petto dell'utensile e nell'area di contatto tra il truciolo e lo strumento, mentre la temperatura sulla parete laterale dello strumento, o "fianco", è generalmente inferiore. Inoltre, sono raffigurati le grandi variazioni di temperatura e di sollecitazioni nel punto di contatto: la temperatura scende da $\sim 750^\circ\text{C}$ a 200°C e il tipo di sollecitazione può cambiare da compressione a trazione nel raggio di pochi millimetri dal punto di taglio. Queste caratteristiche sono esasperate quando la velocità di taglio aumenta.

2.2 - Tipiche modalità di usura e zona di lavoro sicura

Le complesse condizioni termo-meccaniche nel punto di taglio possono innescare vari meccanismi di usura nello strumento. Le principali modalità di usura e le loro posizioni sul bordo dell'utensile sono mostrate schematicamente in Figura 3. Queste sono: abrasione meccanica del fianco dove l'utensile sfrega contro il materiale del pezzo; usura del cratere sul petto dell'utensile dove il truciolo caldo scorre e interagisce chimicamente con l'inserto; profondità di intaglio nella zona del fianco che si verifica durante la lavorazione di materiali con tendenza all'incrudimento; deformazione plastica al naso che si verifica quando la resistenza termica del tagliente è insufficiente per le particolari condizioni di taglio.

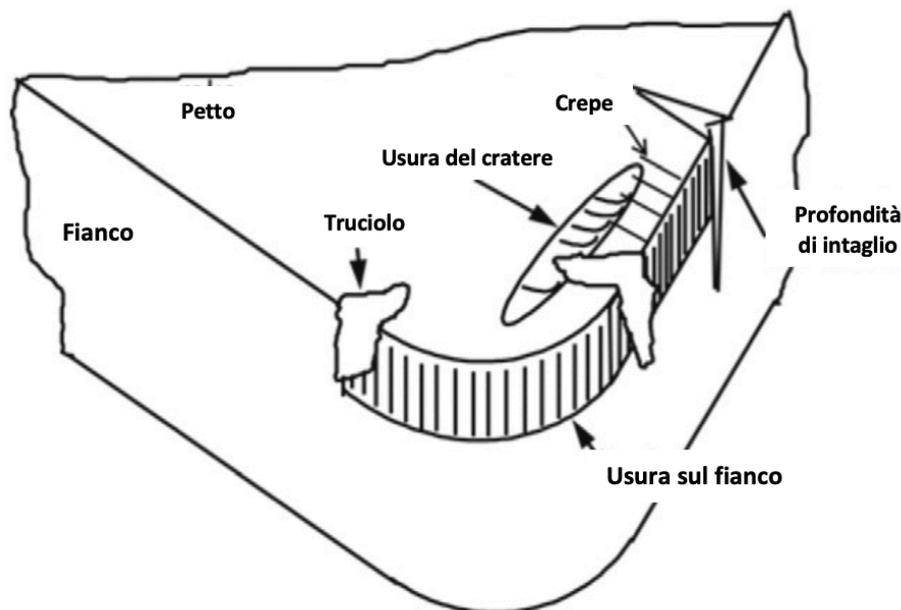


Figura 3 - Tipi di usura primari e loro posizione sul tagliente (4)

Le, apparentemente, separate modalità di usura si verificano in una piccola area del bordo del tagliente e si combinano per amplificare il danno complessivo sull'attrezzo. (Ad esempio, un grande cratere sulla faccia del petto può sfondare il fianco che, combinandosi

con l'usura sul fianco, stacca il naso dallo strumento). La modalità di usura può anche cambiare ogni volta che le condizioni di taglio sono adattate per la produzione della forma di un determinato prodotto. (Per esempio, una variazione della velocità della superficie durante la lavorazione di spigoli vivi, comporterà un cambiamento significativo nel relativo carico termico). Questa natura dinamica del processo di usura è descritta nelle mappe di usura che rappresentano, appunto, l'usura dell'utensile in funzione di due o più parametri di taglio. Viene presentata nella Figura 4 una tipica mappa dell'usura, sviluppata da D.T. Quinto, che illustra gli effetti della velocità di taglio (asse y) e della velocità di avanzamento (asse x) sull'usura dell'utensile.

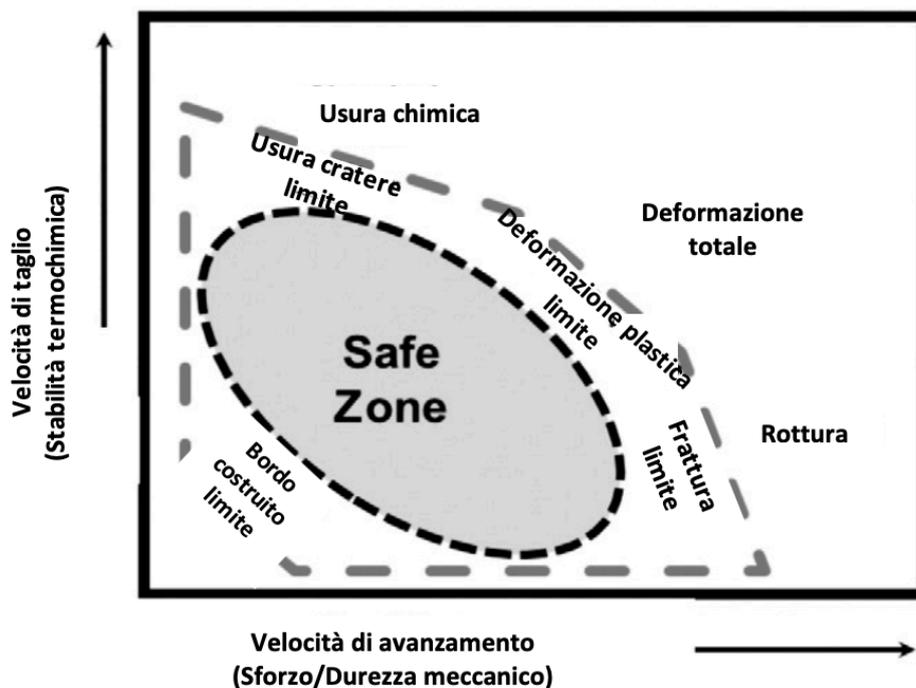


Figura 4 - Un diagramma della modalità di errore per un materiale utensile che incorpora un determinato materiale del pezzo e che mappa i meccanismi di usura come funzioni delle variabili di taglio dei metalli. La zona sicura definisce la regione operativa in cui lo strumento sopravvive in condizioni di usura prevedibili. (5)

Un crescente aumento della velocità di taglio causerà eventualmente la rottura del cratere dell'utensile. Allo stesso modo, un'eccessiva velocità di avanzamento provocherebbe la frattura e la rottura dell'utensile. Una combinazione di entrambi (velocità di taglio e di avanzamento elevate) porteranno alla formazione di una sequenza di crateri, deformazione plastica, rottura e meccanismi correlati che definiscono il limite superiore della "zona sicura", ovvero l'area nella mappa di usura in cui lo strumento può essere utilizzato in sicurezza ed in modo controllabile e prevedibile. La durata dell'utensile aumenta se viene utilizzato all'interno della "zona sicura", e/o attraverso l'ampliamento dell'area della "zona sicura" stessa; tale ampliamento, accompagnato da una sempre crescente velocità di taglio, velocità di avanzamento o profondità di taglio, diventa sinonimo di aumento di produttività e ottimizzazione del processo produttivo. Il principale obiettivo nello sviluppo degli strumenti è quello di migliorare il livello delle prestazioni all'interno della "zona sicura" e nel suo intorno.

2.3 - Utensile da taglio

Per resistere alla gamma descritta di processi di usura, lo strumento deve avere una vasta gamma di proprietà utili: durezza a caldo, stabilità termica, resistenza all'ossidazione, inerzia chimica, resistenza alla frattura e resistenza agli shock termici. In questa sezione, si vedrà brevemente la struttura dell'utensile da taglio e le relative funzioni dei tre blocchi: substrato, geometria e rivestimento.

2.3.1 - Materiale substrato

Esistono diversi gruppi di materiali utilizzati per il taglio di pezzi come si vede in Figura 5. I materiali super duri (diamante e cubi di nitruro di boro) sono nell'angolo in alto a sinistra; hanno la massima durezza e resistenza alla deformazione termica, ma bassa resistenza e una significativa vulnerabilità per scheggiature. Gli strumenti super duri costituiscono un importante segmento di mercato nella lavorazione di compositi di carbonio (utensili in diamante), leghe ipereutettiche Al-Si (diamante), acciai temprati (cubi di nitruro di boro) e leghe ad alta temperatura (nitruro di boro cubico) (6).

Gli acciai ad alta velocità, nella parte inferiore della mappa, hanno eccellenti caratteristiche come tenacità e resistenza alla frattura, ma i materiali si ammorbidiscono rapidamente quando aumenta la velocità di taglio e quindi la temperatura dell'utensile.

Gli utensili in acciaio ad alta velocità vengono applicati a basse velocità di taglio per evitare surriscaldamento e rammollimento dello strumento e sono utilizzati principalmente per produzione di trapani e frese che sono inclini a scheggiature e premature rotture.

Gli utensili in acciaio ad alta velocità costituiscono un mercato importante per rivestimenti in PVD. Le condizioni di rivestimento PVD a bassa temperatura, di solito sotto i 550 ° C, evitano la necessità di un trattamento termico post-mano dell'utensile.

Materiali in carburo di tungsteno cementato, realizzati con particelle di WC duro e un legante di metallo che di solito è cobalto o nichel, si trovano vicino al centro della mappa durezza-tenacità, che ne riflette l'equilibrio “combinazione di durezza, tenacità e resistenza all'usura”.

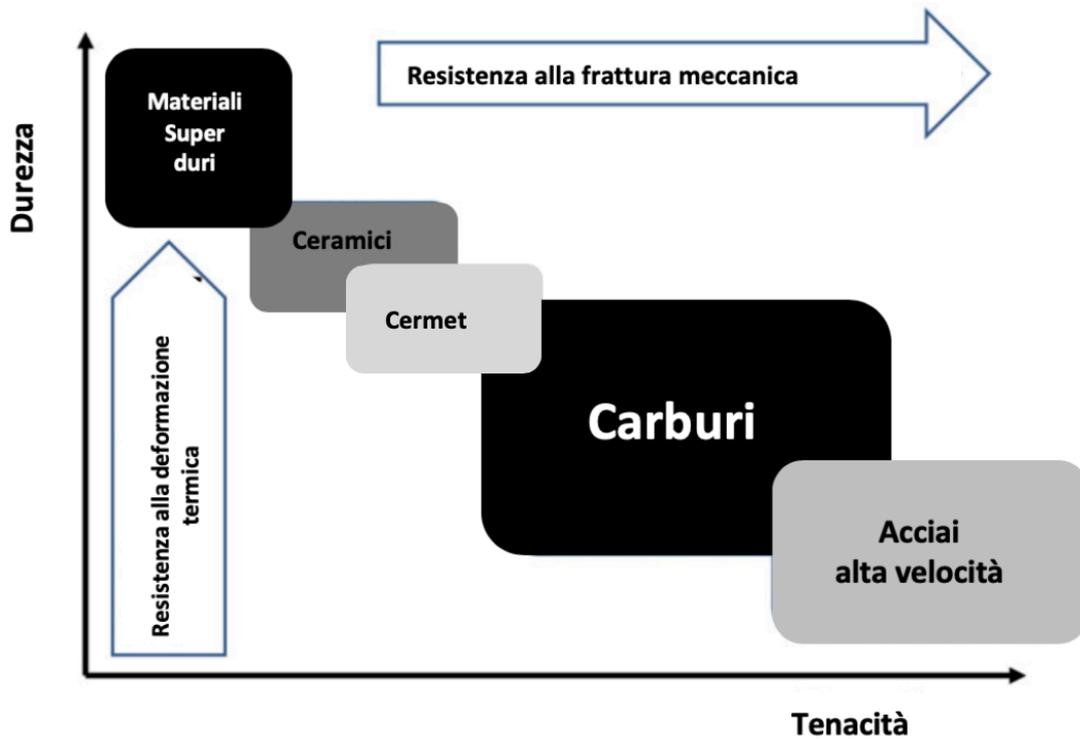


Figura 5 – Materiali usati per la fabbricazione di utensili da taglio e le relative proprietà di durezza/tenacità (7)

2.3.2 – Geometria

La geometria include sia la macro-geometria dell'utensile (ovvero la forma complessiva dell'utensile) sia la micro-geometria del tagliente. La loro combinazione determina l'angolo di contatto tra lo strumento e il pezzo, la direzione e l'entità delle forze di taglio durante la lavorazione e la superficie di contatto nel punto di taglio (8).

La forma e le condizioni del tagliente sono determinate da fasi di produzione che includono macinazione, levigatura e sabbiatura del bordo tagliente. Le condizioni meccaniche e la pulizia della superficie sono fondamentali per ottenere una buona adesione del rivestimento, mentre la nitidezza del bordo influenza le forze di taglio e svolge un ruolo nel decidere l'appropriata tecnologia di rivestimento. I film PVD sottoposti a stress compressivo sono la prima scelta per il rivestimento di bordi affilati e levigati; i rivestimenti per deposizione chimica da vapore (CVD) sono usati tipicamente per carichi pesanti e strumenti levigati.

2.3.3 – Rivestimenti

Inizialmente gli utensili da taglio venivano usati non rivestiti, a basse velocità di taglio e in condizioni di taglio moderate. Tale strumento non riuscirebbe a sopportare i carichi termici e meccanici di oggi.

Un parziale miglioramento è stato ottenuto aggiungendo piccole quantità di Ti, Ta, e altri elementi di WC / Co che hanno migliorato alcune proprietà termiche del carburo. Tuttavia, il principale passo avanti è stato raggiunto solo dopo lo sviluppo e l'introduzione commerciale di rivestimenti protettivi che hanno limitato l'interazione tra il truciolo e il legante e, soprattutto, aumentavano la durezza termica, la stabilità e l'inerzia chimica del tagliente. Oltre il 90% di tutti gli inserti in metallo duro sono attualmente rivestiti con deposizione chimica di vapore (CVD), deposizione fisica di vapore (PVD) o loro combinazione. I processi PVD consistono in un intenso bombardamento ionico che generano sullo strato alti livelli di difetti e sollecitazioni di compressione che portano ad un'elevata durezza.

Il primo rivestimento monostrato PVD commerciale è stato il TiN, tuttavia, la componente di durezza dipendente dalla fatica viene persa quando si trova in condizioni di velocità di taglio elevate e, quindi, esposto a carichi termici elevati; per tale motivo è stato rapidamente seguito dall'introduzione di una soluzione solida di rivestimenti monostrato rinforzati Ti(CN), dando forma al primo multistrato PVD TiN / Ti (CN) e al TiAlN stechiometrico (1998), con notevoli miglioramenti di stabilità termica e durezza a caldo.

Un tipico rivestimento multistrato è costituito da diversi rivestimenti monostrato dove, ogni strato, contrasta un diverso meccanismo di usura. Le proprietà meccaniche e termiche della struttura risultante superano quelle della somma dei singoli componenti, con un significativo miglioramento delle prestazioni dello strumento. I primi multistrati erano realizzati con

rivestimenti monostrato CVD e sono stati rapidamente seguiti da rivestimenti in PVD. La scelta dei singoli strati, i loro spessori e la loro posizione si basa su prove di taglio dei metalli e analisi delle proprietà dei singoli rivestimenti in condizioni di taglio. Il principio guida è realizzare una combinazione di proprietà complementari che ricopra un'ampia gamma di condizioni di taglio. Un multistrato correttamente bilanciato dovrebbe fornire una buona protezione contro l'usura meccanica, lavorare bene ad alta temperatura e resistere ad alti livelli di carichi termici e chimici.

Un nuovo percorso nella produzione dei rivestimenti inizia a metà degli anni '90 con lo sviluppo di rivestimenti nanostrutturati che potevano essere progettati a livello atomico: a partire da rivestimenti nanostrutturati, come TiN / VN, AlN / TiN, AlTiN / TiN, e AlTiSiN / TiN, seguiti da rivestimenti nanocompositi: Ti – Si – N, Al – Ti – Si – N e Ti – B – N.

I rivestimenti nanostrutturati, ovvero multistrati nanometrici, hanno un ruolo molto importante nello sviluppo di nuovi utensili da taglio. Gli strati nanostrutturati possono essere considerati come una particolare porzione del rivestimento monostrato, purché i materiali di base possano essere opportunamente dispersi su scala nanometrica. Allo stesso modo, i rivestimenti multistrato potrebbero essere visti come multistrati su nano-scala realizzati con materiali originali aventi adeguate proprietà, come una differenza significativa tra moduli elastici.

Il rapido sviluppo di nuovi rivestimenti è stato in parte consentito da simili progressi nelle tecnologie di rivestimento PVD. La placcatura ionica originale era seguita da sputtering, con una flessibilità intrinseca delle composizioni della struttura del rivestimento; arco catodico, con il vantaggio di un plasma altamente ionizzato; magnetron sputtering pulsato ad alta potenza, con un alta densità ionica ma priva di goccioline; deposizione assistita da laser ed

elettronica, con un controllo preciso della composizione del rivestimento; e sistemi ibridi, con una combinazione di due o più delle tecnologie di rivestimento, per il deposito di rivestimenti sempre più complicati.

2.4 - Rivestimenti nanostrutturati

I rivestimenti nanostrutturati e i rivestimenti nanocompositi hanno aperto un nuovo percorso nella progettazione di rivestimenti con proprietà “su misura”. Le proprietà di entrambi i rivestimenti dipendono dai materiali di origine e dalle loro strutture su scala nanometrica. Mentre la ricerca iniziale era volta ad aumentare la durezza dei rivestimenti, col tempo è stato possibile dimostrare la presenza di altre proprietà rilevanti, a seconda dell'uso dei materiali di provenienza, tali da affrontare condizioni di taglio estreme. Tuttavia, per raggiungere il pieno potenziale di tale tecnologia è richiesto un controllo preciso dei processi di deposizione e la totale comprensione degli effetti di piccole perturbazioni rispetto alla struttura ideale.

Un esempio di rivestimento nanostrutturato è rappresentato in Figura 6.

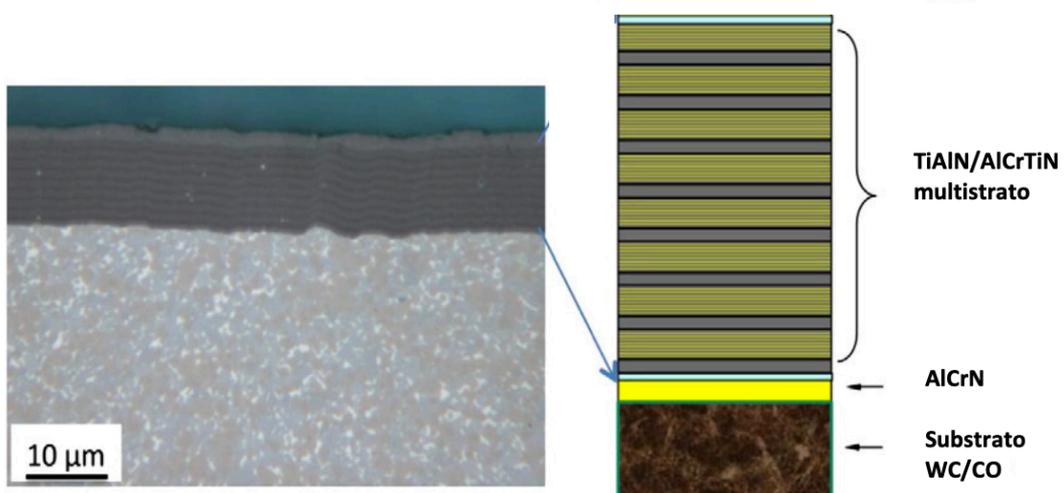


Figura 6 – Descrizione schematica e immagine di un rivestimento multistrato con (1) AlCrN che garantisce una buona adesione, (2) TiAlN/AlCrTiN nanostrutturato. (9)

2.4.1 - Rivestimenti a multistrati

Il rivestimento multistrato presenta molte nuove proprietà, questo è dovuto al fatto che è costituito da materiali con moduli elastici significativamente differenti tra di loro e da strati con spessori in scala nanometrica; in particolare la durezza del composito potrebbe essere di molto superiore a quella dei singoli materiali originali, infatti costituisce il punto di partenza per la selezione di particolari rivestimenti per gli utensili da taglio. Questo aspetto è illustrato nella Figura 7 in cui si confrontano l'usura sul fianco con le forze di taglio che si sviluppano durante la tornitura di 718 Inconel, usando strumenti con rivestimenti nanostrutturati e con film multistrato costituiti dagli stessi materiali originali. In tutte le coppie di rivestimento riportate, il più duro rivestimento nanostrutturato mostrava una minore usura sul fianco e minori forze di taglio rispetto al multistrato.

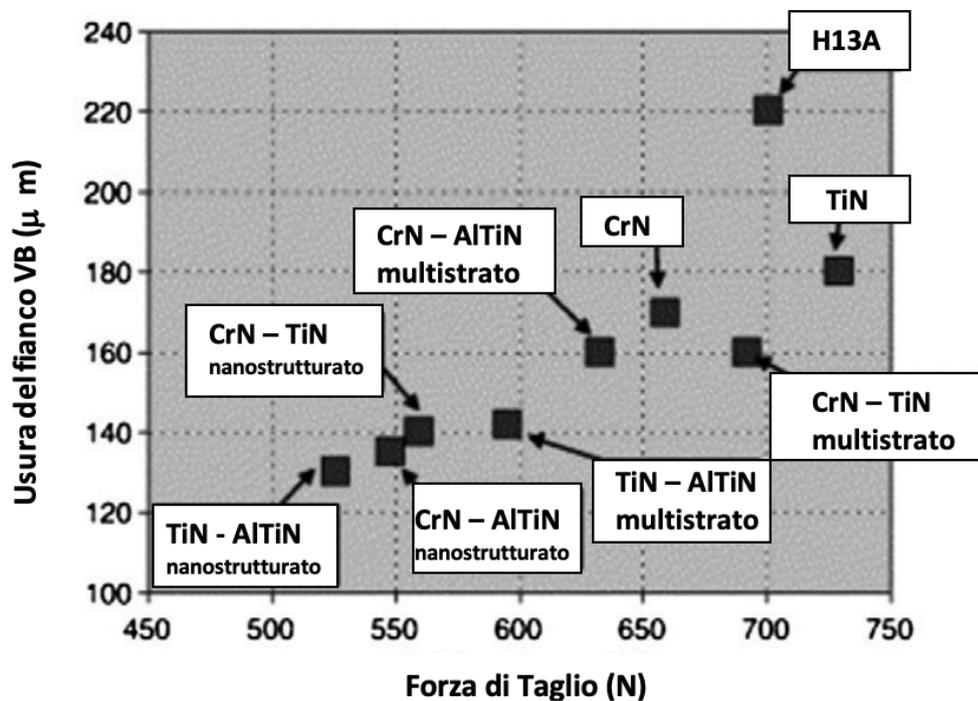


Figura 7 – Usura del fianco (in μ m) contro la forza di taglio (in N) durante la tornitura di Inconel 718 a 40 m/min con utensili in metallo duro rivestiti con multistrato e nanostrutturati PVD (10).

Un comportamento simile è mostrato in Figura 8 che confronta l'usura sul fianco di uno strumento ricoperto con un rivestimento nanostrutturato TiAlN/TiN (Figura 8a) con quello di uno strumento rivestito con TiAlN monostrato (Rapporto Al/Ti = 1) (Figura 8b). L'applicazione è la fresatura dell'acciaio 4140 (con velocità di taglio di 183 m/min, un'alimentazione di 0,3 mm/giro, una profondità assiale di taglio di 2,5 mm e una profondità radiale di taglio di 75 mm).

La temperatura nella zona del fianco dell'utensile è relativamente bassa e la modalità di usura primaria è l'abrasione meccanica. Di conseguenza, il più morbido TiAlN stechiometrico si consuma più velocemente del più duro TiAlN/TiN nanostrutturato, e l'usura risultante sul fianco è da 3 a 5 volte più ampia dopo lo stesso numero di passaggi di taglio. Tuttavia, l'alta durezza da sola non è abbastanza per proteggere lo strumento da danni termici. L'effetto della bassa stabilità termica può essere anche vista nella Figura 8 sotto forma di crepe che si sviluppano a causa della fatica termica del carburo sotto il ciclo termico associato alla fresatura. Le crepe termiche hanno raggiunto la stessa lunghezza in entrambi i rivestimenti e non sono stati aiutati dall'aumento della durezza del rivestimento nanostrutturato TiAlN/TiN.

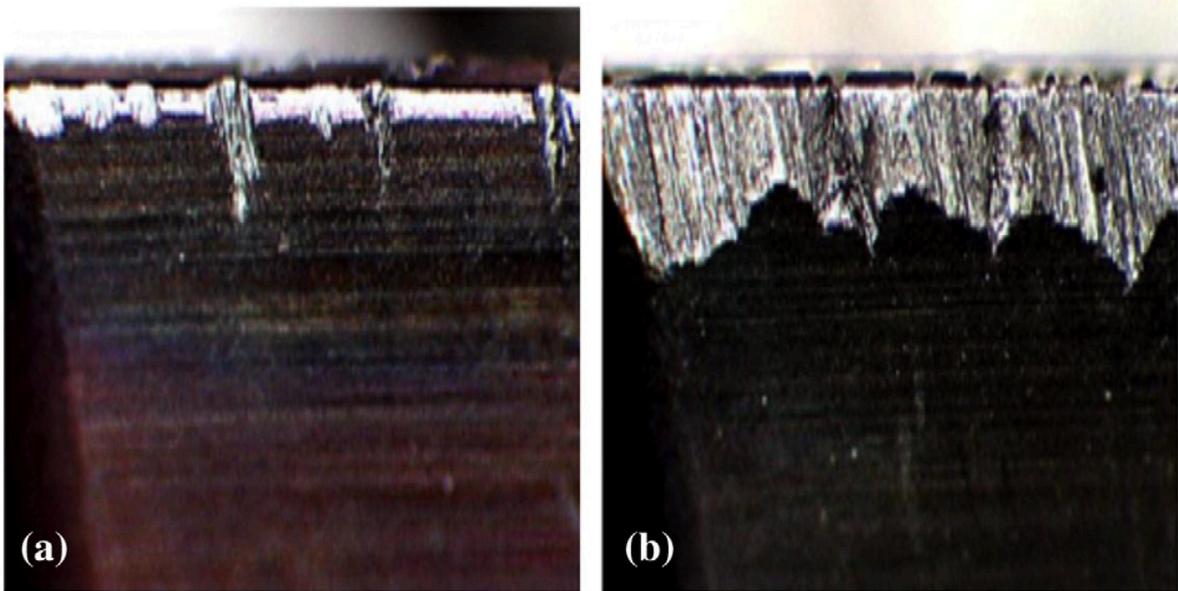


Figura 8 – Usura del fianco e crepe (le linee scure che attraversano l'area usurata) formate durante la fresatura dell'acciaio 4140 usando uno strumento ricoperto con (a) TiAlN/TiN nanostrutturato e (b) TiAlN monostrato (alla velocità di taglio di 183 m/min, un'alimentazione di 0,3 mm/giro, una profondità di taglio assiale di 2,5 mm, e una profondità di taglio radiale di 75 mm) (11).

Il campo di operatività del rivestimento può essere aumentato con un'appropriata scelta dei materiali principali. Ciò può coinvolgere combinazioni di ceramica/metallo per migliorare le proprietà tribologiche del rivestimento, inclusi i rivestimenti TiN/Ni e ZrN/Cu che combinano elevata durezza e buona tenacità del metallo o CrN/Ag che combina l'effetto del duro CrN con il morbido e lubrificante Ag. Particolarmente utili sono combinazioni di ceramiche dure e termicamente stabili con controparti in ceramica più morbide ma più resistenti. Il concetto è illustrato in Figura 9, che presenta la durata dell'utensile con inserti rivestiti di AlTiN/TiNi, rivestimenti nanostrutturati AlTiSiN/TiN e AlTiSiN/CrN rispetto alla durata dell'utensile con inserti simili con rivestimento monostrato AlTiN di spessore confrontabile. L'applicazione è la tornitura dell'acciaio inossidabile, a una velocità di superficie di 198 m/min, 0,2 mm/giro di avanzamento e 2,54 mm di profondità di taglio, che causa diversi meccanismi di usura dello strumento, compresi i metodi di usura meccanica,

termica e chimica. Tutti e tre i rivestimenti nanostrutturati hanno una durata maggiore rispetto al rivestimento monostrato AlTiN e la relativa classificazione dipende dalla composizione dei singoli strati.

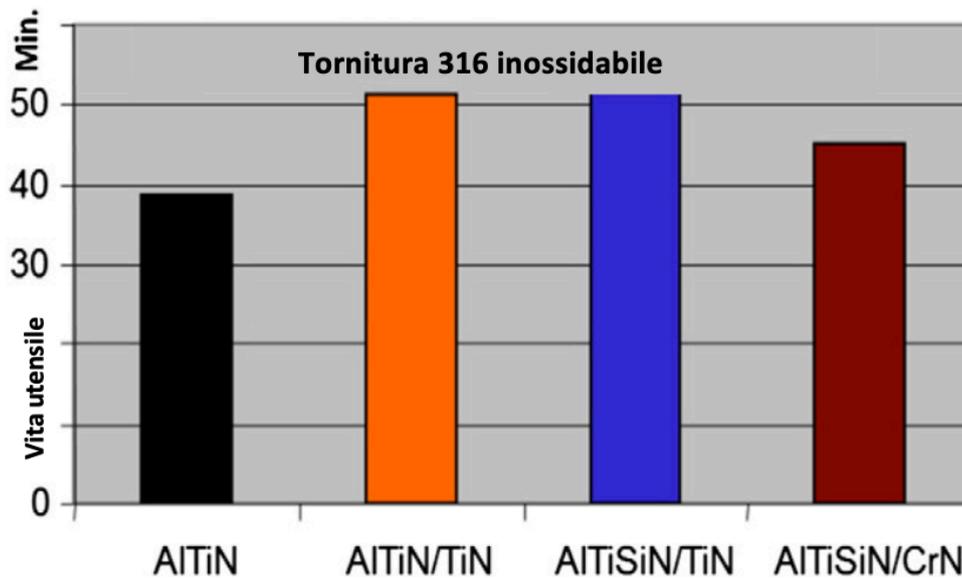


Figura 9 – La vita dell'utensile (min) durante la tornitura dell'acciaio inossidabile 316 per utensili ricoperto con AlTiN monostrato e con AlTiN/TiN, AlTiSiN/TiN, AlTiSiN/CrN nanostrutturati. Condizioni di taglio: velocità di superficie 198 m/min, alimentazione 0,2 mm/giro e 2,54 mm di profondità di taglio (12).

2.4.2- Rivestimenti nanostrutturati

I rivestimenti nanocompositi possono offrire una gamma di proprietà estremamente ampia, purché si possano trovare le condizioni di elaborazione e la chimica tale che i due, o più, materiali principali possano essere opportunamente dispersi su scala nanometrica. I nanocompositi più comuni sono quelli con una fase (o fasi) nanocristallina dura dispersa su nanoscala in una matrice dura amorfa, con forti bordi che limitano la mobilità dei cristalli di dimensioni nanometriche in condizioni operative. Una durezza significativamente migliorata è stata dimostrata nei nanocompositi contenenti piccoli (3–10 nm) nanocristalli (nc) separati da 1–3 nm e incorporato all'interno di una matrice amorfa (a). Tipici esempi includono nanocompositi nc-TiN/a-SiN, nc-W₂N/a-SiN e Ti – B – N. Uno sforzo significativo è dedicato ai nanocompositi nei quali la separazione di fase, e il conseguente aumento di durezza siano determinati dal processo di deposizione che controlla la struttura su nanoscala. Tali materiali includono il rivestimento nc-AlTiN/a-SiN, così come nc-AlCrN/a-SiN similmente strutturato e rivestimenti nc-AlCrN/a-CrN, che combinano l'effetto dei termicamente stabili AlTiN, AlCrN e SiN con l'elevata durezza intrinseca dei nc/a nanocompositi.

2.5 - Riepilogo e prospettive

L'utensile da taglio è un componente fondamentale del processo di lavorazione.

Fino ad ora è stata esaminata la funzionalità dei rivestimenti in PVD per proteggere il bordo tagliente, e discusso le tre strutture di base: rivestimenti multifunzionali monostrato e termicamente stabili, multistrati in cui ogni strato è progettato per resistere ad un tipo diverso di usura e, rivestimenti nanostrutturati costruiti dal basso verso l'alto, con una combinazione su misura di proprietà attraverso un controllo accurato delle caratteristiche su nanoscala.

Lo studio del taglio dei metalli sottolinea la lunga lista di prodotti di rivestimento, vale a dire rivestimenti già in uso e, inoltre, la mappa dell'usura presentata in Figura 4 ha evidenziato due aree di destinazione:

- 1) Al perimetro della "zona di lavoro sicura" il rivestimento viene applicato per migliorare la produttività aumentando il tasso di rimozione del metallo (velocità di taglio, avanzamento o profondità di taglio più elevati), senza compromettere la vita dell'utensile.
- 2) All'interno della "zona di lavoro sicura" viene applicato il rivestimento per prolungare la vita dell'utensile e ridurre la perdita di produttività richiedendo meno arresti della linea di produzione per sostituire l'utensile da taglio.

Molti dei prodotti di rivestimento discussi sono progettati per la prima area. Questi includono AlTiN monostrato termicamente stabile e rivestimenti AlCrN, AlTiSiYN nanostrutturato. Esempi particolari sono il doppio strato AlTiSiN / AlTiN che aumentano la resistenza alla profondità dell'incisione di taglio senza compromettere le proprietà termiche, e il rivestimento triplo strato TiN / AlTiN / AlTiN / ASiN per frese.

Il perimetro non è limitato all'area superiore della zona sicura. Altrettanto importante è la parte inferiore, zona a bassa velocità e a bassa alimentazione, con le minacce di accumulo, finitura superficiale e scheggiatura del tagliente. I rivestimenti lubrificanti a base di TiN e DLC sono spesso la prima linea di difesa.

Tutti i rivestimenti sopra citati vengono anche utilizzati per estendere la vita dello strumento quando viene applicato nella seconda area. Ad esempio, il TiN e il TiAlN stechiometrico sono rivestimenti per usi generali importanti nella gamma di media velocità di taglio e di moderata velocità di avanzamento di taglio. Il rivestimento TiN è anche usato per garantire una buona adesione e per controllare l'accumulo a bassa velocità. Allo stesso modo, gli strumenti rivestiti in TiCN sono utilizzati per la lavorazione di materiali duri con condizioni di taglio aventi bassa temperatura e bassa velocità, mentre il TiB₂ è spesso applicato per la lavorazione di leghe di alluminio quando l'accumulo potrebbe essere un problema. Tuttavia, è importante notare che, anche se la composizione chimica rimane la stessa, i rivestimenti ottenuti hanno poca somiglianza con gli originali, hanno una microstruttura più densa, spesso più dura, con una migliore adesione, e una copertura dei bordi compatta. Il miglioramento continuo dei prodotti di rivestimento esistenti è un obiettivo importante per il progettista di utensili perché hanno un ruolo chiave nel miglioramento delle funzionalità degli utensili da taglio. L'elenco dei prodotti di rivestimento esistenti è lungo e quello dei promettenti candidati ad essere rivestimenti è ancora più lungo. Ci sono diverse ragioni che spiegano la rapida commercializzazione di nuovi prodotti di rivestimento.

- L'uso di tecniche computazionali predittive e la modellizzazione dei processi di taglio (Figura 2) sono un fattore importante per comprendere meglio il processo di taglio dei metalli e specificare i requisiti di base per avere un rivestimento funzionale.
- Migliore controllo dell'ambiente del plasma ionizzato, progressi nelle tecnologie del vuoto e analisi di processo, hanno portato alla progettazione di nuove camere di deposizione per una maggiore verifica del processo di deposizione. L'industria ha seguito da vicino i continui progressi nella progettazione di sistemi e processi come la placcatura ionica precoce attraverso sputtering, l'arco catodico, i sistemi ibridi, il magnetron sputtering pulsato ad alta potenza e molti altri. Il modo in cui viene realizzato il rivestimento ha un impatto

significativo sulle sue proprietà. Ciò vale in particolare per i sistemi PVD in cui la formazione del rivestimento e le sue proprietà sono influenzate dalle condizioni del plasma e dalla configurazione della camera di deposizione.

- La compressione e il conseguente impiego della levigatura dei bordi e delle tecniche di preparazione di una nuova superficie, portano a prestazioni costanti e ad una buona adesione del rivestimento.
- L'incorporazione di rivestimenti nanostrutturati e nanocompositi hanno stimolato ulteriormente l'interesse nello sviluppo di rivestimenti nanostrutturati che rimangono stabili in condizioni di taglio estreme.

Complessivamente, l'innovazione è il fondamento di ogni buon prodotto e fornisce la "*raison d'être*" dello sviluppo di nuovi candidati al rivestimento. Anche dopo la dimostrazione delle nuove proprietà, il candidato al rivestimento deve rispettare rigorosi standard di produzione e severi obiettivi di mantenimento dei costi di produzione.

3 - UTENSILE DA TAGLIO

3.1 - Caratteristiche dell'utensile da taglio

Il comportamento di un utensile nelle lavorazioni influenza in maniera determinante la qualità ed il costo delle parti lavorate; ad esempio durante il processo di sgrossatura l'utensile deve asportare elevati volumi di truciolo, mentre il quello di finitura deve permettere l'ottenimento di finiture superficiali adeguate. La capacità di un utensile di soddisfare tali esigenze dipende dal tipo e dalle proprietà del materiale impiegato per la sua costruzione, dalla sua geometria e dai parametri di lavorazione. L'utensile è soggetto a sollecitazioni meccaniche e termiche che si manifestano come usura progressiva e talvolta come collasso improvviso, per questo motivo ogni utensile è caratterizzato da un tempo di vita utile (durata) durante il quale può eseguire, con le prestazioni desiderate, una data operazione con parametri di taglio definiti (13).

Le principali caratteristiche che un buon utensile da taglio deve avere sono:

- elevata durezza a caldo e/o a freddo ma soprattutto a temperature molto alte;
- tenacità agli urti ripetuti;
- elevata resistenza alla deformazione plastica che può presentarsi a causa delle elevate sollecitazioni meccaniche e termiche agenti sull'utensile;
- elevata resistenza all'usura, causata dallo strisciamento del truciolo sul petto e della superficie lavorata sul dorso dell'utensile;
- elevata conducibilità termica, allo scopo di favorire la dissipazione del calore dalla zona di taglio;
- basso coefficiente d'attrito, allo scopo di impedire eccessivi riscaldamenti nella zona di taglio.

Trovare un utensile che abbia un giusto compromesso fra tutti questi requisiti non è così semplice, per questo esistono soluzioni tecnologiche che ne migliorano alcune proprietà e inoltre, una vasta gamma di acciai per utensili.

3.2 - Acciai super rapidi (HSS)

La categoria degli acciai per utensili a cui ci riferiremo in tutto l'elaborato è quella dei super rapidi.

Questi acciai sono utilizzati principalmente per utensili da taglio, poiché sono caratterizzati dalla capacità di mantenere un elevato livello di durezza mentre tagliano i metalli ad alta velocità. Gli acciai super rapidi possono lavorare a temperature alte senza perdere le proprietà di taglio, queste infatti negli utensili in HSS sono nettamente superiori rispetto ai comuni acciai al carbonio.

Il motivo per il quale tali acciai hanno una durezza elevata anche per alte temperature di esercizio, è la presenza di un notevole tenore di elementi di lega che permettono la formazione di carburi duri. In base alla composizione dell'acciaio, si eseguono rinvenimenti multipli a temperature elevate (500-600°C), che danno vita ad una matrice ferritica facendo precipitare i carburi secondari. Questi carburi sono molto duri e fini e la loro precipitazione causa un notevole incremento della durezza dell'acciaio, della resistenza meccanica, della resistenza all'usura e all'ingrossamento. Tali carburi però aumentano di dimensioni molto lentamente in funzione della temperatura e quindi la durezza tende ad abbassarsi in maniera rilevante solo a temperature elevate (attorno ai 650-750°C, in base alla composizione dell'acciaio) e per tempi di mantenimento (a tali T) "considerevoli".

Il vantaggio degli HSS è che i vari carburi rimangono di piccole dimensioni e molto ben distribuiti nella matrice. Nell'acciaio tradizionale, infatti, uno dei più gravi inconvenienti che si incontrano, è la presenza di carburi di notevoli dimensioni con distribuzioni, a volte, irregolari.

Gli acciai ad alta velocità (spesso abbreviati in HSS seguito da quattro cifre) sono leghe a base ferrosa del sistema multicomponente Fe – C – X, in cui X rappresenta un gruppo di elementi di lega che comprende principalmente Cr, W o Mo, V e Co (14).

Il tungsteno aumenta la resistenza all'usura e la tenacità, il molibdeno impedisce la fragilità, aumenta la tenacità e la resistenza a fatica, inoltre migliora anche la lavorabilità e la resistenza alla corrosione. Il molibdeno ha la stessa funzione del tungsteno ma, a differenza di quest'ultimo, il molibdeno influenza in particolare la durezza massima ottenibile tramite la tempra in particolare, aumentando la concentrazione di molibdeno, si ottiene un intervallo di durezza maggiore e dunque aumenta il numero di applicazioni possibili per un determinato acciaio. Il cromo aumenta la resistenza all'usura, a fatica ed a corrosione; il vanadio contribuisce ad aumentare la resistenza all'usura ed agli urti. Altra caratteristica non poco importante è che è in grado di raffinare la crescita granulare nell'acciaio, ciò aumenta la durezza e permette di avere un taglio estremamente pulito e funzionale; l'aggiunta del cobalto è opzionale e il suo scopo principale è quello di promuovere la durezza a caldo.

3.3 - Usura dell'utensile

Principalmente, a seconda dell'operazione di taglio, dei parametri di taglio, del materiale di lavoro e del materiale dell'utensile, le prestazioni dell'utensile sono limitate dall'usura del naso, dell'usura sul fianco, dell'usura del cratere, delle scheggiature dei bordi o di combinazioni di questi. A seconda degli stessi parametri, l'usura si verifica gradualmente per usura abrasiva o adesiva, per deformazione plastica, per perdite più discrete di materiale attraverso meccanismi di frattura o per combinazioni di questi (15).

L'usura abrasiva domina l'usura sul fianco e sul cratere del bordo dell'utensile HSS ed è contrastata da un'elevata resistenza allo snervamento (elevata durezza) e da un grande volume di metallo duro dell'HSS. L'usura adesiva domina l'usura sul fianco e sul cratere degli utensili HSS ma, a differenza di quella abrasiva, avviene solo se i bordi raggiungono temperature elevate, cioè ad alta velocità di taglio. L'usura adesiva sia lieve che severa è principalmente contrastata dal materiale HSS grazie alla sua elevata resistenza allo snervamento a temperature elevate (elevata durezza a caldo). Quando il bordo dell'utensile HSS viene caricato oltre la sua resistenza allo snervamento, si deforma a causa della deformazione plastica con conseguente smussatura del bordo. Infine, per quanto riguarda la frattura, a livello macroscopico è un evento piuttosto raro, mentre più comuni sono i frammenti localizzati sul bordo dell'utensile.

Dalla fine degli anni Settanta, quando il rivestimento TiN è stato introdotto sugli utensili da taglio in metallo HSS, il rivestimento PVD è diventato uno standard nella protezione dell'usura degli utensili.

Un sottile rivestimento in PVD (1-10 μm) proteggerà principalmente il tagliente in due modi:

- agendo da scudo contro l'usura abrasiva e adesiva;
- riducendo la temperatura dell'utensile attraverso la diminuzione dell'attrito tra utensile e materiale di lavoro, in particolare tra truciolo e superficie di spoglia.

I rivestimenti combinano una maggiore durezza (resistenza all'usura abrasiva) con una reattività chimica con materiali metallici relativamente bassa (bassa solubilità), in modo da fornire protezione contro l'usura adesiva. Una volta rimosso il rivestimento, i meccanismi di usura degli utensili rivestiti sono gli stessi di quelli non rivestiti, sebbene più severi perché normalmente su di essi vengono utilizzati parametri di taglio più elevati.

Dai meccanismi di usura degli utensili da taglio HSS si conclude che la durezza, la resistenza al calore (durezza a caldo) e la resistenza alla frattura sono i prerequisiti di elevate prestazioni dell'utensile. Un altro mezzo per migliorare ulteriormente le prestazioni dell'utensile HSS è migliorare la finitura superficiale, ovvero evitare il deterioramento del materiale HSS superficiale a causa dell'eccessiva generazione di calore, infatti una superficie liscia dell'utensile evita il distacco prematuro dei rivestimenti.

4 – PROCEDURE SPERIMENTALI

Lo scopo di questa tesi è studiare le prestazioni di usura a scorrimento con lubrificante di un rivestimento AlTiCrN multistrato depositato su un acciaio ad alta velocità S601 (HSS) a temperatura ambiente. Il rivestimento è stato depositato con il metodo PVD di evaporazione dell'arco catodico. L'utensile da taglio è stato osservato al microscopio elettronico a scansione (SEM) ed è stata acquisita un'immagine della struttura sul quale sono stati effettuati alcuni studi.

L'utensile rivestito è stato sottoposto a test di usura in aria, in presenza di acqua come lubrificante con una pressione equivalente di 100 MPa su un disco di acciaio inox martensitico ruotante ad una velocità di 40 m/min (Figura 10), e sono state studiate le condizioni di usura dopo 100 e dopo 500 minuti di lavorazione.

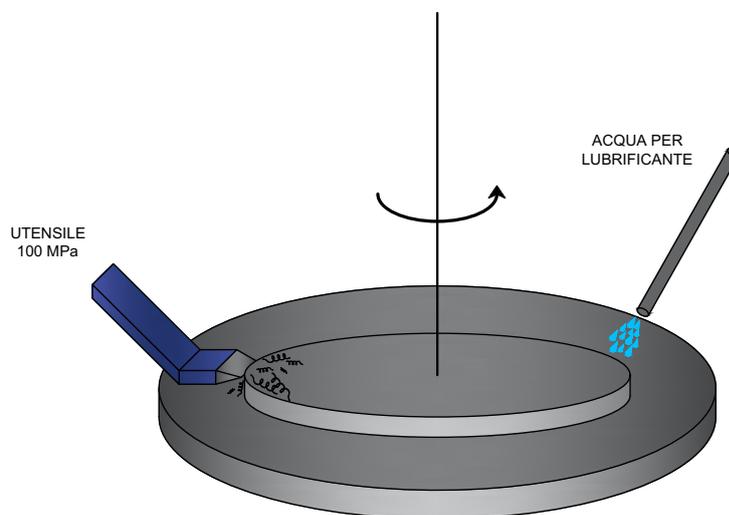


Figura 10 - Schizzo utensile

Sulla micrografia sono stati eseguiti due diversi metodi stereologici attraverso l'ausilio del software ImageJ, al fine ottenere informazioni sulla percentuale dei carburi presenti nel metallo e sulla loro dimensione:

- 1) griglia puntuale;
- 2) intercetta lineare.

Inizialmente è stata effettuata la scalatura dell'immagine in modo tale da ottenere ogni misura in μm ; per il primo metodo sono stati identificati e misurati l'elemento più piccolo e più grande di carburi ed è stata fatta la media geometrica tra i due valori, determinando così la spaziatura tra le linee della griglia ed è stata poi misurata la lunghezza della linea orizzontale (L_{eff}).

Sono state sommate le volte in cui ogni punto di intersezione si trovava nel carburo $\sum N_c(i)$: in particolare è stato conteggiato 1 se il punto si trovava completamente all'interno del carburo, e 0.5 se si trovasse sul bordo.

La stessa procedura è stata fatta per tutte le N_L linee della griglia ricavando per ognuna la frazione di punti che cadono all'interno del carburo rispetto al totale potenziale di punti $P_c = \frac{\sum N_c(i)}{N_{PL}}$.

Facendo la media delle frazioni puntuali di tutte le linee si ottiene la relazione $\bar{P}_c = \frac{\sum P_c}{N_L}$.

Assumendo un materiale omogeneo, a prescindere dal piano di osservazione, ciò che si vede è sempre uguale per cui $P_c = L_L = A_A = V_v$ (frazione puntuale = frazione lineare = frazione superficiale = frazione volumetrica); vale quindi la relazione $V_v = \bar{P}_c \pm \delta\bar{P}_c$.

$\delta\bar{P}_c$ è l'errore assoluto percentuale commesso per la frazione puntuale media, ricavato

dall'errore relativo $s = \sqrt{\frac{\sum (P_c - \bar{P}_c)^2}{N_L - 1}}$ quindi $\delta\bar{P}_c = \frac{s}{\sqrt{N_L}}$.

Per il secondo metodo sono stati contati i punti d'intersezione con i bordi di carburi per ogni riga; in particolare si è considerato un valore pari a 0,5 per la presenza di carburi ai bordi

della micrografia e pari a 1 per i limiti del carburo lungo l'intera linea. Successivamente sono stati calcolati i numeri effettivi di intercette di carburi $N_L^c(i)$ da cui sono state ricavate le loro dimensioni per ogni riga e di conseguenza le dimensioni medie:

$$N_c(i) = \frac{N_L^c(i)/2}{L_{\text{eff}} \cdot P_c(i)} ; D_c(i) = \frac{1}{N_c(i)} ; \bar{D}_c(i) = \frac{\sum D_c(i)}{N_L} .$$

Si è proseguito infine con il calcolo dell'errore relativo s e di quello assoluto percentuale S

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum (D(i)_c - \bar{D}_c(i))^2}{N_L - 1}} ; \delta D_c = S_c = \frac{s_p}{\sqrt{N_L}} .$$

Non essendo sufficiente all'analisi la verifica sui carburi, si è deciso di effettuare il calcolo dello spessore del rivestimento sulla stessa micrografia. Attraverso l'utilizzo del software ImageJ sono state fatte dieci misurazioni in modo da trovare lo spessore medio.

Sono state acquisite ulteriori immagini al SEM della punta dell'utensile usurata dopo 100 e dopo 500 minuti e da tali immagini è stato ricreato indicativamente il vertice dell'utensile non usurato a temperatura ambiente.

Osservando l'usura formatasi, è stato posizionato un sistema di riferimento dal quale, con il software ImageJ, sono stati trovati dei punti in modo da ricreare il profilo dell'usura, ed è stato formulato un modello matematico che approssimasse al meglio tale curva.

Dalle equazioni ottenute è stato calcolato l'integrale che costituisce l'area usurata. In seguito,

è stata calcolata la profondità dell'usura attraverso l'equazione di Holm: $\Delta h = k \cdot \frac{P}{P_m} \cdot \Delta s$

(16).

Dove:

- k è un fattore adimensionale sperimentale che dipende dalla natura dei materiali che vengono a contatto, dallo stato delle superfici, dalla durezza e dalle dimensioni delle particelle abrasive
- P è la pressione di contatto

- P_m è la pressione di snervamento superficiale (misurata dalla durezza)
- Δs è lo spazio percorso
-

Il valore di K è stato determinato attraverso l'impiego di tabelle comparative come quella in Figura 11.

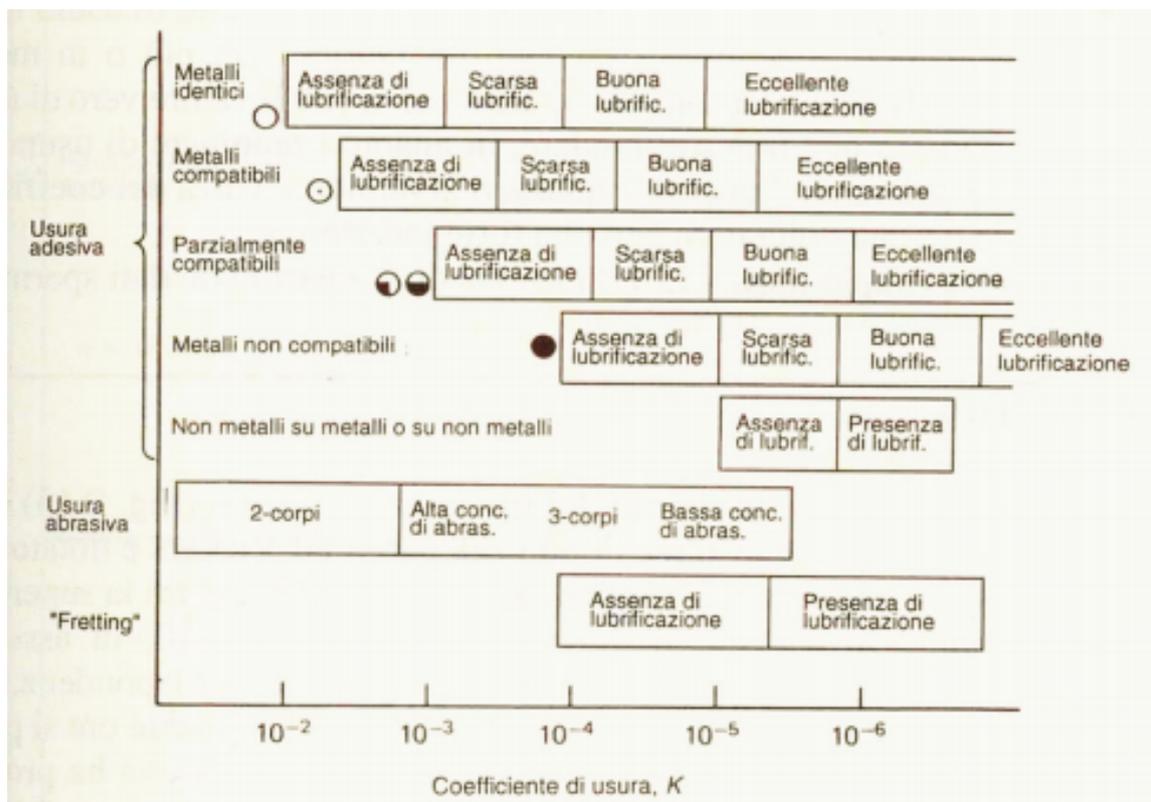


Figura 11 - Tabella valori di K (17)

Il prodotto tra l'area ottenuta dal profilo e la profondità di usura costituisce il volume di usura dal quale è possibile ricavare il tasso di usura attraverso il rapporto tra Δh e Δs .

5 – RISULTATI

La micrografia ottenuta tramite SEM è mostrata in Figura 12.

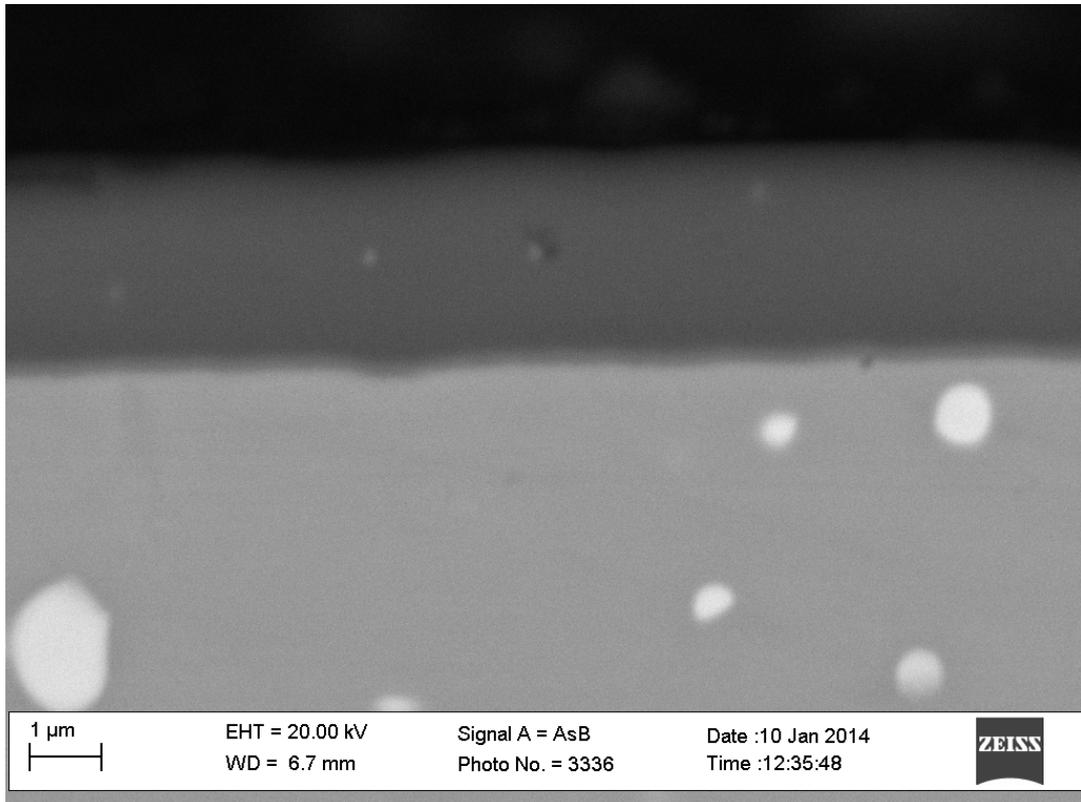


Figura 12 - Micrografia SEM di un acciaio HSS601 con rivestimento multistrato AlTiCrN a temperatura ambiente

Di seguito vengono riportati i dati ottenuti dall'applicazione dei metodi della griglia puntuale e dell'intercetta lineare sulla micrografia (Figura 12), attraverso i quali sono state ricavate la frazione percentuale dei carburi all'interno dell'acciaio e la loro dimensione media:

$N_c(i)$	$P_c(i)$	$(P_c(i) - \bar{P}_c)^2$	$N_{cL}(i)$	$N^c(i)$	$D_c(i)$	$(D_c(i) - \bar{D}_c)^2$
3	0,17	0,009	4	0,8	1,3	0,56
0	0	0,006	0	0	0	0,25
0	0	0,006	0	0	0	0,25
0	0	0,006	0	0	0	0,25
2	0,11	0,001	3	0,9	1,1	0,32
3	0,17	0,009	7	1,4	0,7	0,04

Frazione percentuale

$7.5 \pm 0.4 \%$

Dimensione media

0.5 ± 0.2

Il valore medio dello spessore del rivestimento, ottenuto dalle dieci misurazioni eseguite sulla micrografia (Figura 12), è il seguente:

<i>Spessori</i>
3,12
3,07
3,13
3,12
3,1
3,09
3,03
3,09
3,1
3,04

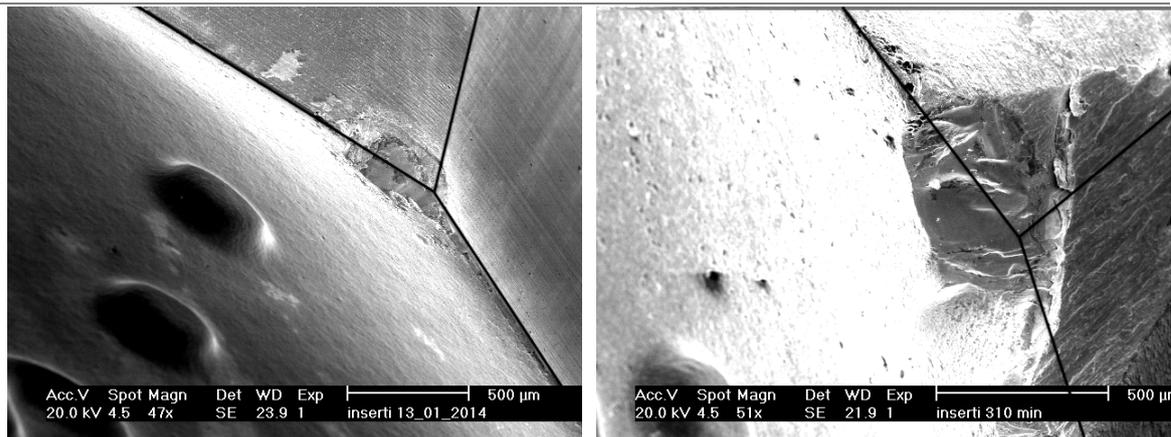
Spessore medio

3.1 ± 0.4

Tramite l'osservazione delle immagini dell'utensile usurato, dopo 100 e dopo 500 minuti, è stato ricreato il suo ipotetico stato originale attraverso delle semirette coincidenti con i bordi del tagliente:

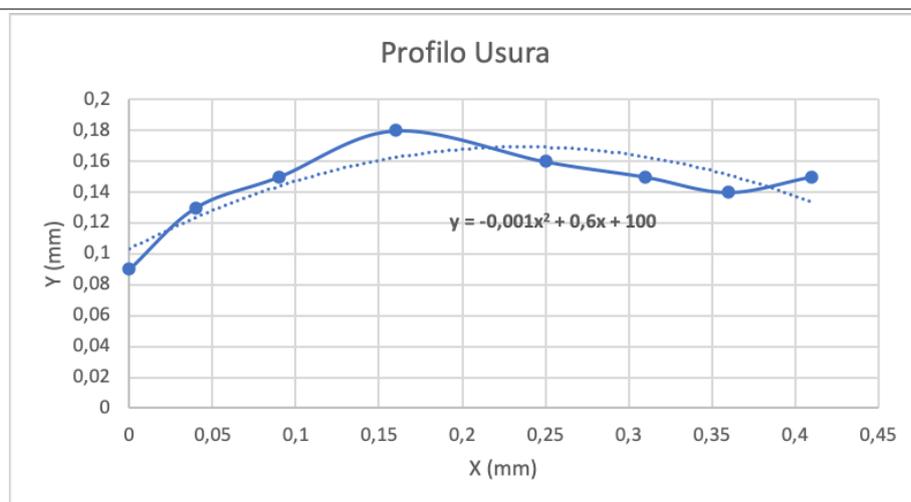
Tagliente Originale a T. ambiente (100')

Tagliente Originale a T. ambiente (500')

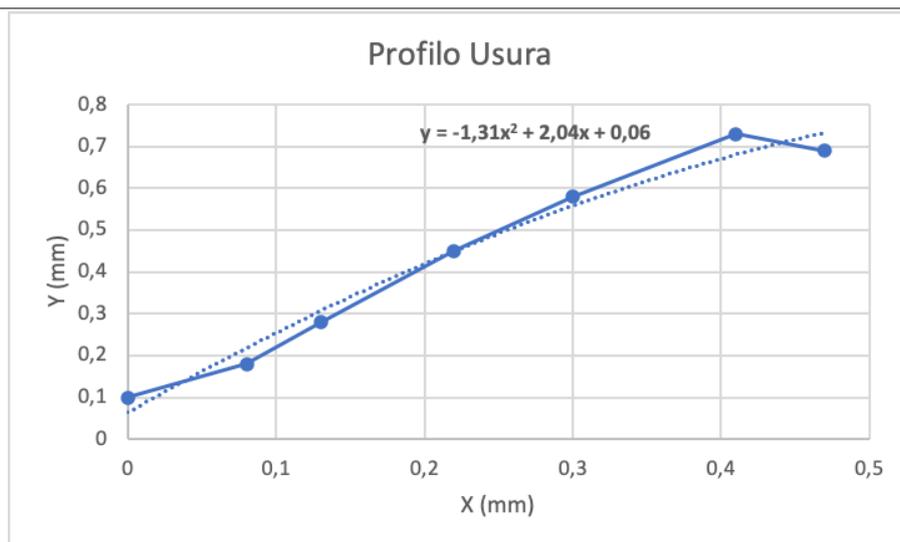


Gli andamenti dei profili di usura ottenuti dal tagliente ricreato, dopo 100 e dopo 500 minuti, vengono riportati di seguito:

Profilo Usura a T. ambiente (100')



Profilo Usura a T. ambiente (500')



Dal calcolo dell'area sottesa dai profili di usura e, in seguito dall'applicazione dell'equazione di Holm, sono stati trovati i risultati finali di questa tesi.

Dopo 100 minuti:

<i>k</i> (adimensionale)	Δs (mm)
10^{-4}	$4 \cdot 10^6$
Pressione equivalente (MPa)	Pressione di snervamento (MPa)
100	$37 \cdot 10^3$
Δh (mm)	Area (mm²)
1,1	0,07
Tasso di usura	Volume (mm³)
$2,7 \cdot 10^{-7}$	0,07

Dopo 500 minuti:

<i>k (adimensionale)</i>	Δs (mm)
10^{-4}	$2 \cdot 10^7$
Pressione equivalente (MPa)	Pressione di snervamento (MPa)
100	$37 \cdot 10^3$
Δh (mm)	Area (mm²)
5,4	0,21
Tasso di usura	Volume (mm³)
$4 \cdot 10^{-7}$	3,56

6 – CONSIDERAZIONI COMPARATIVE

Gli stessi criteri di analisi sono stati eseguiti, nella tesi di Gloria Cordisco, su un medesimo utensile ma sottoposto a 600 °C, al fine di valutare quale dei due avesse migliori prestazioni. Dal confronto dei dati si nota che all'aumentare della temperatura, il numero dei carburi cresce del 60% (Figura 13):

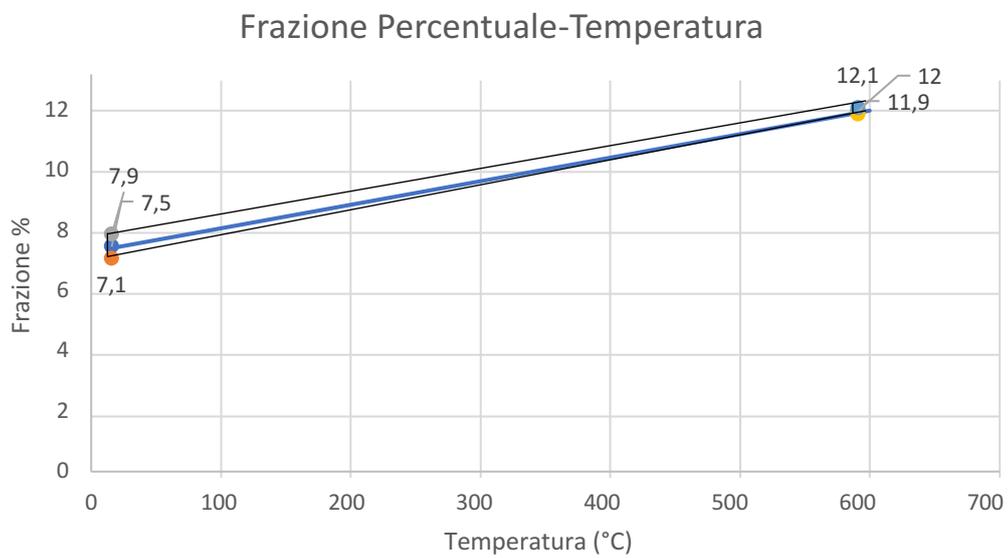


Figura 13 - Variazione della frazione percentuale con l'incremento della temperatura

Inoltre aumenta anche la dimensione del 114% (Figura 14), ovvero aumenta di circa 1 nm per 1°C:

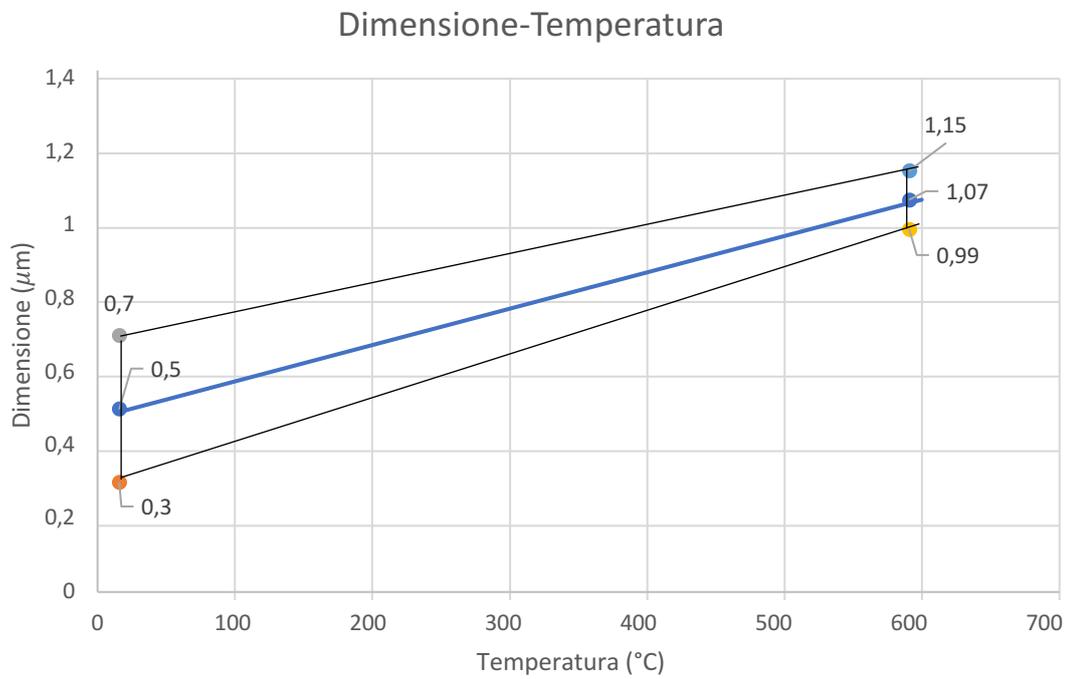


Figura 14 - Variazione della dimensione con l'incremento della temperatura

Anche nel caso degli spessori è stato fatto un confronto dei dati che hanno dato come risultato un aumento dello spessore del 270% all'aumentare della temperatura (Figura 15), vale a dire che lo spessore aumenta di 14 nm per 1°C.

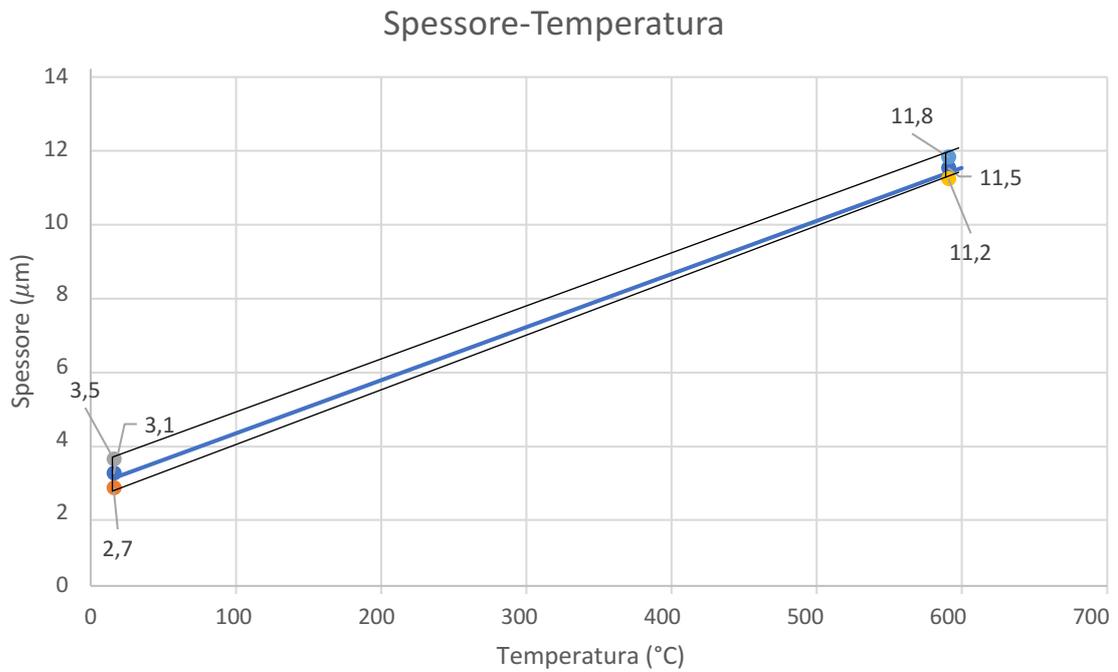


Figura 15 - Variazione dello spessore con l'incremento della temperatura

In termini di usura è stata confrontata la perdita del volume; in particolare si è visto che dopo 100 minuti, all'aumentare della temperatura, il volume usurato sulla punta dell'utensile aumenta del 114% (Figura 16).

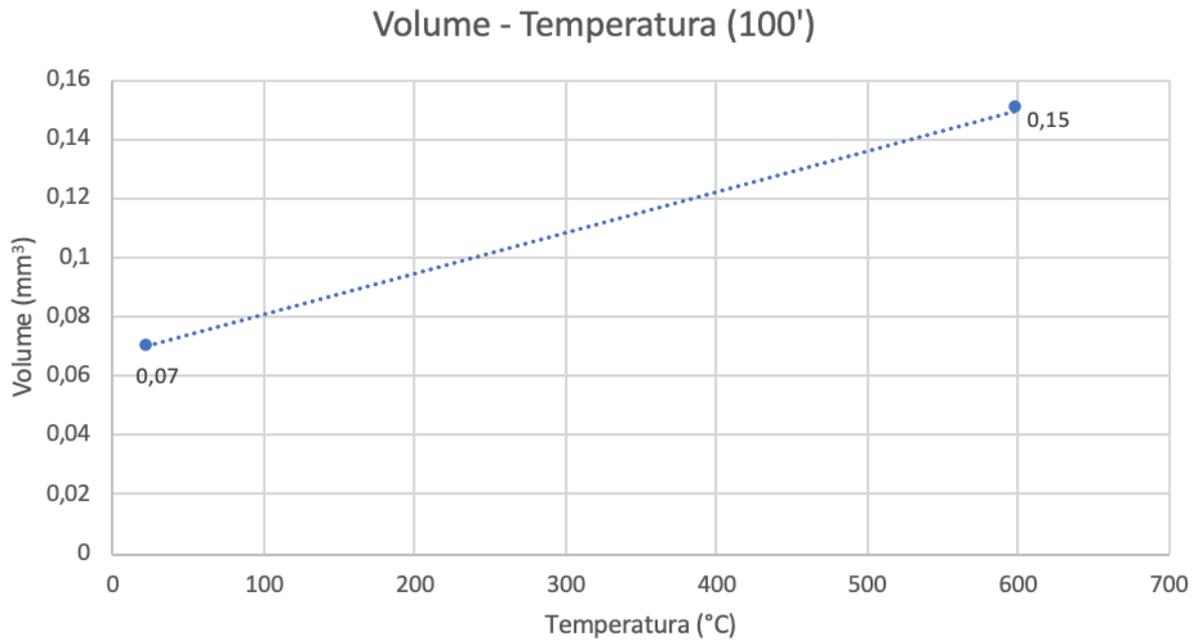


Figura 16 - Variazione volume con l'incremento della temperatura dopo 100 minuti di lavorazione

Dopo 500 minuti, il volume usurato continua ad aumentare con la temperatura, ma la crescita rallenta, infatti si ha un incremento del 26% (Figura 17), e il tasso di usura diminuisce.

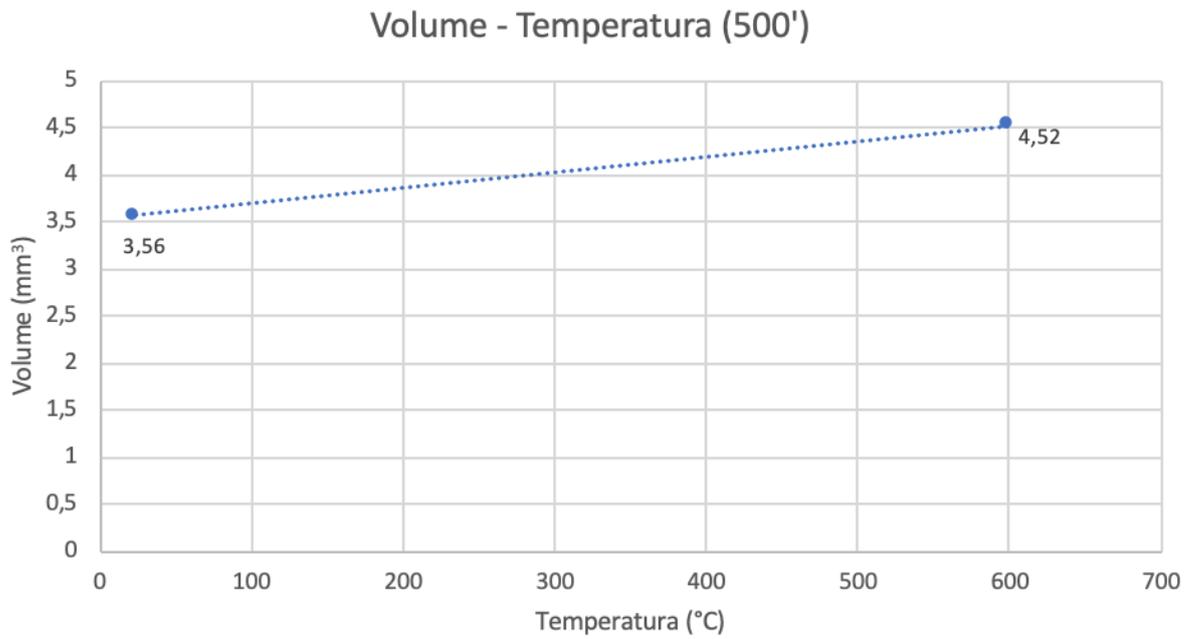


Figura 17 - Variazione volume con l'incremento della temperatura dopo 500 minuti di lavorazione

7 – CONCLUSIONI

La sperimentazione di questa tesi, confrontata con quella effettuata da Gloria Cordisco, a colpo d'occhio potrebbe far pensare che l'utensile a temperatura ambiente abbia migliori prestazioni rispetto all'utensile a 600 °C. Per giungere ad una conclusione più corretta però, è necessario analizzare la combinazione dei dati ottenuti.

In primo luogo, la dimensione dei carburi a temperatura ambiente è minore rispetto ai 600°C. La vita del tagliente è funzione della dimensione e del numero di carburi per unità d'area: quanto più questi sono grossolani tanto più la vita dell'utensile si riduce, per cui è quasi automatico concludere che l'acciaio sia più resistente a basse temperature. È importante considerare anche che l'acciaio cui si ha a che fare è un HSS e, come si è visto nel corso di questa trattazione, generalmente gli acciai super rapidi possono lavorare ad alte temperature senza perdere le proprietà di taglio, di fatto la perdita di durezza dovuta alla dimensione maggiore dei carburi a 600°C, è compensata da uno spessore del rivestimento più grande del 270% rispetto al rivestimento applicato sull'utensile a temperatura ambiente. Ciò è confermato dalle caratteristiche dello specifico rivestimento usato in entrambi gli utensili (AlTiCrN multistrato) che predilige, infatti, impieghi ad alte temperature.

Da un'attenta analisi inoltre si può notare che, per lunghi tempi di lavorazione, l'usura nell'utensile a temperatura ambiente aumenta in modo quasi costante, mentre in quello a 600°C tale crescita rallenta e il tasso di usura diminuisce. Questo importante risultato fa ipotizzare che, aumentando ulteriormente i tempi di lavorazione, la perdita di volume si andrà a stabilizzare; per cui essendo l'utensile trattato in questa tesi un HSS, e parallelamente in quella di Gloria Cordisco, per condizioni di lavoro difficili come ad esempio lunghi tempi di lavorazione, si favorisce la scelta di un utensile mantenuto ad alte temperature.

Ovviamente non si sta dicendo che l'utensile a temperatura ambiente abbia pessime prestazioni, ma qualora si decidesse di impiegare un utensile per tempi di lavorazione brevi

e a basse temperature, sarebbe più appropriato scegliere come substrato un generico acciaio rivestito adeguatamente ottenendo comunque dei risultati efficaci ma risparmiando in termini di costi.

Tuttavia, per definire il limite vita di un utensile è necessario identificare le sue finalità. Infatti, se l'utensile lavora metalli duri, una volta che il rivestimento si è usurato completamente è necessario sostituire lo strumento intero, se invece lo scopo è allungare la vita media dell'utensile (condizioni di lavoro non estreme), posso utilizzarlo fino a quando l'usura non diventa troppo aspra in modo tale da compromettere le capacità di taglio.

Bibliografia

1. **A. Inspektor, M. Greenfield.** Reutte : s.n., 2005. p. 763.
2. **Trent, E.M.** Metal Cutting. [Third ed. Butterworth-Heinemann]. London : s.n., 1991.
3. **P. Prichard, T. Muller, T.J. Long.** Increased Productivity by Effective Thermal Management in Metal Cutting of Titanium. [presented at Int. Manuf. Technol. Show (IMTS2010)]. Chicago, USA : s.n., 2010.
4. **3685:1993, ISO.** Tool-life testing with single-point turning tools. [International Organization for Standardization]. Geneva : s.n., 1993.
5. **Quinto, D.T.** [Int. J. Refract. Met. Hard Mater]. 1996.
6. **(Ed.), J.R. Davis.** Tool Materials ASM Specialty Handbook. [ASM]. Cleveland : s.n., 1995.
7. **Upadbyaya, G.S.** Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties, and Testing, Noyes Publications. Westwood : s.n., 1998.
8. **Astakhov, V.P.** Metal Cutting Mechanics. [CRC Press]. Boca Raton : s.n., 1999.
9. **S. Kalidas, R.E. DeVor, S.G. Kapoor.** [Surf. Coat. Technol]. 2001.
10. **C. Ducros, F. Sanchette.** [Surf. Coat. Technol]. 2006.
11. **A. Inspektor, M. Greenfield.** [Proc. 16th International Plansee Seminar]. Reutte : G. Kneringer, P. Rödhammer, H. Wildner (Eds.), 2005.
12. **P.Eh. Hovsepian, W.D. Münz.** [, P45th Annual Technical Conference of Soc. of Vacuum Coaters SVC]. Lake Buena Vista, Florida, USA : s.n., 2002.
13. **A., L. R. Zoppi.** Tecnologia meccanica. s.l. : CittàStudi, 2018.
14. **Steels, High Speed.** [Online] Novembre 2008. <https://www.totalmateria.com>.
15. **Söderberg.** Wear mechanisms and tool life of high speed steels related to microstructure. Uppsala : s.n., 1982.
16. **A.Licciulli.** Tribologia e applicazioni tribologiche. 2004.

17. **Cagliari, U. D.** Usura. [Online] people.unica.it.

Ringraziamenti

Inizio col ringraziare il mio Relatore Marcello Cabibbo, per avermi accompagnata nella realizzazione di tale elaborato, per la disponibilità e l'umanità mostrata nel periodo difficile che abbiamo affrontato.

Arrivare alla fine di questo percorso è sempre stato un pensiero lontano, quasi un sogno.

Se ripenso a ciò che mi sto lasciando alle spalle, sento che mi porto dentro, uno strano sentimento che attraversa ogni parte del mio corpo facendo, mano a mano, riaffiorare momenti che definirei indelebili. È come se fossi arrivata alla fine di un viaggio, sapete quel momento in cui ci si rende conto che è stato talmente tanto intenso da non voler più ripartire. Allo stesso tempo il profumo di casa inizia a stuzzicare i pensieri, allora a malincuore ti dirigi verso la fine portando con te un bagaglio colmo di emozioni e con la voglia matta di ricominciare a viaggiare di nuovo.

Io nella mia valigia ho messo i miei errori, tutti gli sbagli a livello umano e accademico, le vittorie e le rivincite; ci ho messo l'amicizia e l'amore, tante emozioni e lacrime.

Sono fiera di tutto questo, perché ne esco profondamente segnata e devo dire grazie a me stessa per averlo permesso, ma grazie anche a chi ora gioisce con me!

Grazie a te Mamma, perché mi ha insegnato a rimanere umile e a non avere timore di nessuno. Non ricordo i tuoi abbracci, ma ricordo tutte le volte in cui hai creduto in me ancora prima degli altri. Hai sempre saputo che ce l'avrei fatta!

Tenendo in mano questo piccolo libricino mamma, non posso fare altro che pensare a te, e lo dedico alla persona che sei e alla mamma eccezionale che sei sempre stata.

Papà tu sei stato la mia carica, hai gioito anche della mia più piccola ed insignificante vittoria facendola sembrare come la migliore che potessi ottenere. Senza troppe parole venivi da me e mi stringevi, mi stringevi così forte da darmi anche quel poco di serenità che ti rimaneva e

a me bastava; tu mi hai insegnato l'amore e io vorrei solo regalarti del tempo e un po' di pace.

La mia laurea è anche la vostra!

Filippo, speravo di farcela insieme a te. Ti auguro di trovare finalmente ciò che ti fa stare sinceramente bene. Con te non servono molte parole, ma dal profondo del mio cuore ti dico che ti voglio bene, non dimenticarlo mai!

Beatrice, sei il mio angolo di pace nella casetta che condividiamo, con la tua purezza mi hai insegnato a guardare la parte buona della vita. Amyra tu sei stata l'unica in grado di far uscire il peggio di me, ma credimi è stato illuminante, e oggi non posso fare altro che ricordare i nostri momenti con un'enorme risata. Federica, dentro quella piccola bambola ho scoperto un cuore gigante bisognoso di affetto, pertanto quando vorrai, ti basterà bussare nella porta accanto e mi troverai pronta ad accoglierti, sarò una spalla proprio come tu lo sei con me!

Grazie a voi perché mi sopportate ogni giorno.

Ringrazio gli amici che mi hanno donato risate e spensieratezza, siete stati una boccata d'aria nelle giornate tormentate!

Pietro, grazie perché ci sei sempre stato, per avermi voluto davvero bene e in modo sincero. Sei per me un grandissimo amico, uno di quelli che non se ne andranno mai dal mio cuore. Tu sei stato in grado di trasmettermi gioia con la tua originalità, e di trasmettermi fiducia con quei tuoi abbracci intensi pieni di un affetto che solo una persona come te è in grado di regalare. Auguro a te il meglio, perché te lo meriti!

Andrea sei semplicemente stato il mio punto di partenza, mi hai teso la mano permettendomi di intraprendere un percorso diverso nella profondità delle mie paure e mi hai accompagnata senza mai lasciarmi sola. So quanto sei fiero di me, ma io devo dirti grazie perché mi hai rimproverata quando dovevi, mi hai dato la tua forza nei momenti di crisi, abbiamo vissuto

le mie ansie insieme e mi hai aiutata a superare i miei limiti, sappiamo entrambi quante volte ho rischiato di cadere! Mi dici sempre che sono io la forte tra i due e probabilmente hai ragione, ma tu sei la mia bussola e posso anche essere forte, ma senza di te so per certo che mi sarei persa già da un po'.

Non mi sono dimenticata di te Gloria, oggi il nostro viaggio termina ufficialmente e ne inizia un altro più importante. Avrei tanto voluto averti di nuovo affianco a me, ma i sogni non sempre si avverano, quindi mi limiterò a proteggere questi anni, anzi i nostri anni, nel mio cuore e nelle mie memorie. Ti auguro di trovare quella felicità che tanto brami, ti auguro di essere soddisfatta di te, e di diventare una donna forte e decisa. Io ti sarò sempre vicina, e dirti grazie ad oggi non serve, ti basterà guardarmi negli occhi per capire che sei stata per me la miglior compagnia d'avventure, e se ti concentri un po' meglio vedrai che mi mancherai da morire.

NOTA

Questa tesi è stata scritta in sinergia con la collega Gloria Cordisco, a cui si è spesso fatto riferimento nel corso della ricerca, la quale si è occupata del comportamento dell'utensile rivestito a 600°C per gli stessi tempi che sono stati esaminati nella presente tesi.