



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA E
MECCATRONICA CURRICULUM MECCANICO

Utensili da taglio in materiale ceramico

Relatore: Ch.mo Prof. Enrico Bernardo

Laureando: Davide Longo

Matricola: 1050217

Anno Accademico 2016/2017

Indice

INTRODUZIONE	V
Capitolo 1: STUDIO GENERALE DEL TAGLIO	1
1.1. Macchine utensili	1
1.1.1 Tornio	1
1.1.2 Fresatrice	2
1.2. Utensili da taglio	2
1.3. Usura.....	4
1.3.1. Labbro d'usura	4
1.3.2. Cratere d'usura.....	5
1.3.3. Scheggiatura	5
1.3.4. Tagliente di riporto	5
1.3.5. Monitoraggio dell'utensile	5
1.4. Materiale per utensili da taglio	6
Capitolo 2: MATERIALI CERAMICI	9
2.1. Definizione e generalità	9
2.2. Legami chimici nei materiali ceramici	9
2.2.1. Strutture covalenti.....	10
2.2.2. Strutture ioniche.....	10
2.3. Proprietà meccaniche e termiche dei materiali ceramici	10
2.3.1. Proprietà meccaniche dei materiali ceramici.....	11
2.3.2. Proprietà termiche dei materiali ceramici	12
2.3.3. Frattura fragile	12

Capitolo 3: UTENSILI CERAMICI CON MATRICE A BASE DI ALLUMINA	13
3.1. Allumina: generalità	13
3.2. Principali compositi a base di allumina	14
3.2.1. Al ₂ O ₃ pura	14
3.2.2. Al ₂ O ₃ /Zirconia	14
3.2.3. Al ₂ O ₃ /Carburo di titanio	15
3.2.3.1. Al ₂ O ₃ /TiC-Co	15
3.2.3.2. Al ₂ O ₃ /TiCN	15
3.2.4 Al ₂ O ₃ /Nitruro di titanio	16
3.3. Utensili Al ₂ O ₃ /ZrO ₂	16
3.3.1. Variazione delle proprietà meccaniche in base al contenuto di ZrO ₂	17
3.3.2. Studio del fianco d'usura dell'utensile Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ con il metodo Taguchi	19
3.4. Utensili Al ₂ O ₃ /TiC.....	20
3.4.1. Studio delle lavorazioni degli acciai e usura degli utensili da taglio	
Al ₂ O ₃ /TiC	21
3.4.1.1. Risultati dopo lavorazione acciaio temprato 40Cr	22
3.4.1.2. Risultati dopo lavorazione acciaio temprato T10A	23
3.5. Utensili Al ₂ O ₃ /TiCN-TiN	24
3.5.1. Variazione delle proprietà meccaniche con l'aggiunta di micro-particelle	
di TiN.....	25
3.5.2. Variazione delle proprietà meccaniche in base alla temperatura di	
sinterizzazione.....	25
3.5.3. Variazione delle proprietà meccaniche in base al tempo di sinterizzazione	26
Capitolo 4: UTENSILI IN CERAMICO INNOVATIVO.....	28

4.1. SiAlON-SiC	28
4.2. SiAlON-Si ₃ N ₄	29
4.2.1. Produzione SiAlON-Si ₃ N ₄ multistrato.....	30
4.2.2. Confronto utensili multistrato e utensili comuni in fase di lavorazione	31
4.3. SiAlON-TiCN	34
4.3.1. Studio dell'usura degli utensili rivestiti SiAlON-TiCN.....	35
4.4. Lavorazione della ghisa con utensili SiAlON	37
4.4.1. Struttura e proprietà degli utensili SiAlON	37
4.4.2. Lavorazione e usura del fianco	38
4.4.3. Analisi della rottura.....	39
4.5. Lavorazione di fresatura con utensili SiAlON	41
4.5.1. Analisi delle forze di taglio	41
4.5.2. Usura dell'utensile	43
4.5.3. Rugosità superficiale.....	43
Capitolo 5: UTENSILI RINFORZATI CON WHISKER	45
5.1. Utensili whisker Al ₂ O ₃ -SiC	45
5.5.1. Lavorazioni delle superleghe con utensili rinforzati con whisker	45
5.5.2. Lavorazioni dell'acciaio con utensili rinforzati con whisker	46
5.2. Utensili rinforzati con whisker e nanoparticelle di SiC.....	47
5.3. Prestazioni alle alte temperature degli utensili rinforzati con whisker e nanoparticelle di SiC.....	49
5.4. Analisi danni superficiali di una superlega lavorata con utensili rinforzati con whisker.....	52
5.4.1. Osservazioni generali sulle superfici lavorate	53

5.4.2. Effetto dei parametri di taglio	53
5.4.3. Conclusioni.....	54
Capitolo 6: CONFRONTO FRA UTENSILI IN MATERIALE CERAMICO E	
ACCIAIO	55
6.1. Principali utensili da taglio in acciaio.....	55
6.1.1. Acciai al carbonio e acciai medio-legati	55
6.1.2. Acciai rapidi	55
6.1.3. Carburi metallici	55
6.1.4. Utensili rivestiti.....	56
6.2. Confronto proprietà e caratteristiche	57
CONCLUSIONI	59
BIBLIOGRAFIA.....	60

Introduzione

Negli ultimi anni sempre più aziende stanno cercando di ridurre i costi, analizzando le spese e gli investimenti da compiere.

Un'officina, che si occupa di lavorazioni meccaniche, deve pianificare e studiare nei minimi dettagli il ciclo di lavoro che andrà poi eseguire per completare il pezzo finale. Molti fattori possono influenzare le scelte e decisioni da prendere: l'evoluzione continua del mercato, lavorazioni di materiali sempre più tecnologici, il flusso continuo e costante delle lavorazioni meccaniche e le richieste da parte del cliente.

Nelle lavorazioni con asportazione di truciolo come tornitura e fresatura, la scelta dell' utensile da taglio è fondamentale.

Le lavorazioni per asportazione possono essere consigliate per svariate ragioni: accuratezza dimensionale non raggiungibili con altri processi, caratteristiche geometriche interne ed esterne, come spigoli vivi, filettature interne e operazioni di finitura superficiale.

Si possono riassumere due grandi famiglie di utensili da taglio: utensili da taglio in acciaio e utensili da taglio in materiale ceramico.

Ci soffermeremo nello studio degli utensili da taglio ceramici elencando le principali caratteristiche dalla produzione degli inserti, le tipologie più presenti sul mercato attuale e le caratteristiche e proprietà meccaniche che li distinguono dai più comuni inserti in acciaio. Affronteremo le problematiche delle lavorazioni con asportazione di truciolo e delle soluzioni che sono state adottate per eliminarle.

Prima di iniziare c'è da sottolineare il fatto che esistono svariate tipologie di inserti ceramici, da quelli più comuni che implicano un costo d'acquisto inferiore utilizzati per una certa tipologia di lavorazione, a quelli più costosi che garantiscono una precisione maggiore su pezzi particolarmente complessi (materiale, forma ecc.).

Cercheremo inoltre di capire quali sono i campi di applicazione e perché è consigliato privilegiare un tipo di inserto a un altro in base al tipo di lavorazione e del materiale che andremo a lavorare.

CAPITOLO 1

Studio generale del taglio

1.1 Macchine utensili

1.1.1 Tornio

Il tornio è un centro di lavoro a mandrino orizzontale ed è utilizzato per la lavorazione di un pezzo posto in rotazione ad un determinato numero di giri.

La lavorazione avviene per asportazione di truciolo e prende il nome di tornitura.

La tornitura consiste nella realizzazione di solidi di rivoluzione, cioè di superfici in cui tutte le sezioni perpendicolari all'asse principale hanno forma circolare (superfici cilindriche, coniche, filettature, ecc.).

Con il passare del tempo i vecchi torni a movimentazione manuale stanno lasciando posto ai più moderni torni CNC (torni a controllo numerico), che rappresentano la massima evoluzione del tornio.

La macchina esegue le lavorazioni in un totale automatismo gestita da un computer, il quale coordina, regola e controlla ogni singola movimentazione di tutti gli organi presenti in essa e segnala qualsiasi codice d'errore in fase di lavorazione.

Gli utensili da taglio che andranno a lavorare il pezzo possono essere di diversi materiali, tra i più comuni ci sono quelli in acciaio e in carburi metallici sinterizzati ma la continua evoluzione del mercato, ha fatto sì che nuovi tipi di materiale sono sempre più impiegati nei cicli di lavorazione, tra di loro ci sono gli utensili in ceramico.

Bisogna subito fare una prima distinzione, tra utensili composti da un unico tipo di materiale e utensili rivestiti che prevedono una copertura anti-usura su una base metallica.

La lavorazione di tornitura con inserti ceramici porta allo studio di nuove tecniche e nuovi parametri di lavoro.

La velocità di taglio dovrebbe essere bilanciata al fine di creare sufficiente calore nella zona di taglio (rendendo plastico il truciolo), evitando di esagerare nello sviluppo del calore per non favorire la formazione dell'usura ad intaglio.

L'avanzamento dovrebbe essere selezionato per dare al truciolo il giusto spessore, evitando l'incrudimento del materiale.

Avanzamenti e profondità di taglio maggiori richiedono una riduzione della velocità di taglio.

Come vedremo più avanti questi limiti cambiano a seconda della durezza del materiale del componente e della dimensione del grano.

1.1.2 Fresatrice

La fresatura è una lavorazione di asportazione del materiale che permette di ottenere una vasta gamma di lavorazioni sulla superficie del pezzo (scanalature, spallamenti, smussi, ecc.) mediante l'impiego di un utensile tagliente chiamato fresa, montato su una macchina utensile detta fresatrice.

Nelle fresatrici il moto principale è circolare ed è posseduto dall'utensile. Il moto di avanzamento è sempre posseduto dal pezzo, che viene portato a contatto con l'utensile dalla tavola di lavoro della macchina.

I taglienti della fresa, ruotando, asportano metallo dal pezzo quando questo viene a trovarsi in interferenza con la fresa a causa della traslazione del banco di lavoro su cui il pezzo è ancorato.

Le fresatrici si dividono in due grandi famiglie distinguibili in base alla posizione del pezzo rispetto all'asse di rotazione del mandrino. Le frese ad azione frontale, l'utensile è fissato a un mandrino che ruota attorno a un asse perpendicolare alla superficie del pezzo e le frese ad azione periferica, l'asse di rotazione è parallelo alla faccia del pezzo che deve essere lavorata.

Tuttavia, sempre più aziende investono in veri e propri centri di lavoro che in genere preferiscono un approccio ad azione frontale alla lavorazione.

Di norma il ciclo di lavorazione prevede una prima fase di sgrossatura, eseguita in tempi brevi per evitare spese inutili in termini di tempo, seguita da un ultimo step che prende il nome di finitura, dove si asporta il materiale in eccesso ottenendo le dimensioni volute. La finitura, che riguarda l'asportazione di una parte limitata di metallo, è fondamentale e delicata dato che si deve rispettare le tolleranze geometriche e le finiture superficiali del pezzo finito.

I principali parametri di lavoro nella fresatura sono la velocità di taglio, da cui si ricava la velocità della fresa, e l'avanzamento del pezzo.

La fresatura con inserti ceramici, generalmente consente velocità da 20 a 30 volte superiori a inserti in metallo duro, ma con avanzamenti inferiori, questo permette grandi vantaggi in termini di produttività. A causa del taglio intermittente, la fresatura con utensile ceramico è un'operazione da eseguire senza l'uso del refrigerante.

Inoltre hanno un effetto negativo sull'integrità superficiale e quindi sono sconsigliate in operazioni di finitura.

1.2 Utensili da taglio

Il comportamento di un utensile influenza in maniera determinante le qualità e i costi finali per la realizzazione del prodotto finito.

Un utensile ha il compito di lavorare un materiale nel migliore dei modi impiegando la minor quantità di tempo possibile ed evitando inutili sprechi di denaro.

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 taglio.

Tra i principali requisiti ci sono:

- elevata durezza, soprattutto alle alte temperature
- elevata tenacità, intesa sia come capacità di resistere agli urti che sollecitano l'utensile in condizioni di taglio interrotto, sia come capacità di deformarsi sotto carico prima di rompersi
- 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 lo smaltimento del calore dalla zona di taglio
- Basso coefficiente d'attrito, allo scopo di impedire eccessivi riscaldamenti nella zona di taglio

La costruzione di un utensile da taglio in un solo materiale non consente di soddisfare appieno i principali requisiti di resistenza richiesti.

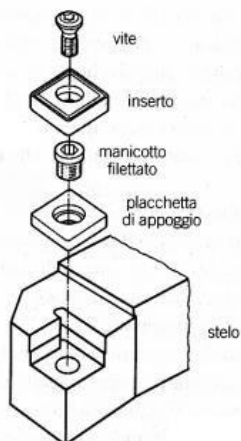
E' necessario costruire degli appositi inserti, che andranno a lavorare il materiale, che soddisfano tali proprietà. Saremo in presenza quindi, di un collegamento tra inserto e stelo; tale collegamento deve risultare il più preciso possibile dato che vibrazioni, urti improvvisi, innalzamento delle temperature possono portare a un difetto di precisione.

Il collegamento più diffuso è sicuramente quello a vite (fig.1).

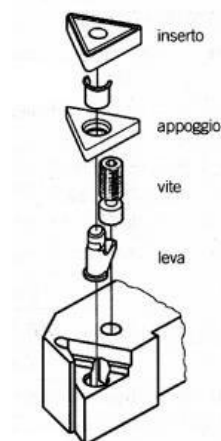
Tra i vantaggi principali, oltre essere semplice da realizzare, ha poche parti di ricambio, ingombri ridotti che favoriscono il deflusso del truciolo e richiede l'utilizzo di inserti forati.

E' possibile trovare negli inserti ceramici anche il collegamento a leva (fig.2).

Impiegato soprattutto con inserti più fragili, esso garantisce una buona stabilità e una redistribuzione delle tensioni.



Bloccaggio a vite (fig.1)



Bloccaggio a leva (fig.2)

Meno diffusi in commercio sono i bloccaggi mediante brasatura, dove la placchetta viene saldobrasata sullo stelo; e i bloccaggi a staffa utili quando la lavorazione sviluppa un truciolo lungo, dato che si può interporre tra inserto e stelo una piastrina rompi truciolo.

1.3 Usura

Gli utensili da taglio durante la lavorazione sono soggetti a forze, temperature elevate e a sfregamento; queste condizioni inducono l'usura degli utensili stessi.

A causa dei suoi effetti sulla qualità della superficie lavorata e sui costi della lavorazione, il degrado dell'inserto è uno degli aspetti più importanti delle lavorazioni meccaniche.

L'usura degli utensili da taglio è influenzata da molti fattori: il materiale da lavorare, il materiale dell'utensile, la geometria dell'inserto, lo spessore del truciolo, i parametri di taglio e dalla lubrorefrigerazione.

Usura è un termine generale, in base al tipo di scorrimenti, pressioni, temperature, sforzi in gioco si può distinguere:

- Usura per abrasione: prodotta dallo scorrimento di una superficie dura e rugosa su una superficie più tenera.
- Usura per adesione: originata dalle elevate pressioni di contatto fra truciolo e utensile che provocano vere e proprie saldature fra le sporgenze delle superfici a contatto.
- Usura per diffusione: prodotta dalla migrazione di atomi attraverso l'interfaccia utensile-truciolo ed è originata da processi di mutua solubilità fra alcuni componenti dei due materiali a contatto.
- Scheggiatura: asportazione di particelle metalliche in prossimità del tagliente per effetto di urti o pressioni eccessive.
- Deformazione plastica: si manifesta quando la temperatura della zona di taglio raggiunge valori tali da causare una riduzione della tensione di scorrimento plastico del materiale dell'utensile ed una deformazione dello stesso.

Ovviamente il profilo del tagliente risulterà alterato da tutti i processi di usura e danneggiamento, portando al degradamento dell'utensile.

1.3.1 Labbro d'usura

L'usura sul fianco prende il nome di labbro d'usura. Questo tipo di deterioramento è in genere attribuito allo sfregamento dell'utensile sulla superficie lavorata, con conseguente usura per abrasione. Inoltre l'aumento della temperatura comporta effetti negativi sulle proprietà del materiale dell'utensile.

Il labbro d'usura influisce negativamente sulla finitura superficiale e la precisione dimensionale. E' utile quindi stabilire un valore limite, una volta raggiunto l'utensile dovrà essere sostituito.

1.3.2 Cratere d'usura

Il cratere d'usura si manifesta sul petto dell'utensile, i fattori determinanti sono la temperatura elevata e lo sfregamento del truciolo a velocità relativamente alte. In genere la posizione della massima profondità del cratere di usura corrisponde con la posizione della massima temperatura all'interfaccia utensile-truciolo.

Un ruolo importante gioca l'affinità chimica tra utensile e pezzo. Al crescere delle velocità di taglio, la temperatura aumenta facilitando la diffusione portando a un rapido sviluppo del cratere.

1.3.3 Scheggiatura

Il termine scheggiatura è usato per descrivere la rottura di una porzione superficiale dell'utensile in prossimità del tagliente, è un fenomeno che produce una perdita improvvisa di materiale dell'utensile, dovuta a un urto meccanico o alla fatica termica.

La scheggiatura può verificarsi in zone già instabili dove sono presenti micro-cricche oppure in prossimità del cratere d'usura che diminuisce fortemente la resistenza all' impatto e agli shock termici elevati.

1.3.4 Tagliente di riporto

Il tagliente di riporto è un agglomerato di materiale che si deposita in prossimità del tagliente dell'utensile durante la lavorazione. Durante l'operazione di tornitura piccole particelle di materiale si saldano sul petto dell'utensile formando un deposito solido di materiale che andrà crescendo. Tra le principali conseguenze ci sono una finitura superficiale scadente e una mancata accuratezza delle tolleranze.

1.3.5 Monitoraggio dell'utensile

Con il largo uso di macchine utensili a CNC e cicli di lavoro sempre più automatizzati sono divenute di grande importanza le prestazioni affidabili e ripetibili degli utensili da taglio. Una volta programmata la macchina, viene fatta operare riducendo al minimo la supervisione diretta da parte di un operaio. Necessariamente, la rottura di un utensile può avere conseguenze molto dannose sulla qualità dei pezzi lavorati e sull'intero ciclo di produzione.

Le tecniche per il monitoraggio dello stato dell'utensile in genere possono essere suddivise in due categorie principali:

- Tecniche dirette: misurazione ottica dell'usura, osservando periodicamente le variazioni del profilo dell'utensile. Svantaggiosa dal punto di vista dell'efficienza dato che bisogna sospendere la produzione per il controllo.
- Tecniche indirette: un sistema di trasduttori e ricevitori monitorano i parametri della macchina (velocità di taglio, avanzamento, numero giri mandrino, ecc.) e li interpreta. Questo sistema è capace di distinguere i casi di rottura, usura, mancanza utensile e contemporaneamente correggerli, mantenendo l'accuratezza dimensionale.

1.4 Materiale per utensili da taglio

La scelta appropriata dei materiali per gli utensili da taglio è di fondamentale importanza. Si deve considerare che durante le lavorazioni per asportazione l'utensile è soggetto a temperature elevate, elevate pressioni e scorrimento del truciolo sulla faccia superiore. Di conseguenza, un utensile da taglio deve avere le seguenti caratteristiche:

- Elevata durezza, soprattutto alle alte temperature
- Elevata tenacità, intesa sia come capacità di resistere agli urti che sollecitano l'utensile in condizioni di taglio interrotto, sia come capacità di deformarsi sotto carico prima di rompersi
- Elevata resistenza alla deformazione plastica che può presentarsi a causa delle elevate sollecitazioni meccaniche e termiche agenti sull'utensile
- Elevata resistenza all'usura, in modo da avere una durata dell'utensile accettabile prima della sua sostituzione
- Elevata conducibilità termica, allo scopo di favorire lo smaltimento del calore dalla zona di taglio
- Elevata inerzia chimica, per evitare che si esalti il fenomeno dell'usura
- Basso coefficiente d'attrito, allo scopo di impedire eccessivi riscaldamenti nella zona di taglio

Numerosi materiali per utensili con queste caratteristiche sono oggi disponibili sul mercato. Si possono suddividere in:

- Acciai al carbonio e acciai medialmente legati
- Acciai rapidi
- Leghe di cobalto
- Carburi metallici
- Utensili rivestiti
- Materiali ceramici a base di allumina
- Nitruro di boro cubico (CBN)
- Ceramici a base di nitruro di silicio

- Diamante
- Materiali rinforzati con whisker

Gli acciai al carbonio non hanno durezza e resistenza all'usura sufficienti per lavorare a velocità di taglio elevate, dove la temperatura aumentano considerevolmente. Di conseguenza, l'utilizzo di questi acciai è limitato a lavorazioni condotte a velocità di taglio molto basse.

Gli utensili realizzati con acciai rapidi sono stati sviluppati per lavorare a velocità maggiore. Grazie alla loro elevata tenacità e resistenza alla rottura sono impiegati per operazioni di taglio interrotto e per essere utilizzati nei casi in cui le macchine utensili sono soggette a vibrazioni a causa della bassa rigidità. Gli acciai rapidi sono oggi la categoria di materiale per utensili più utilizzata.

Utensili in leghe di cobalto sono oggi usati solo in applicazioni speciali quali operazioni di grossatura profonda e continua, ad avanzamenti e velocità di taglio relativamente alte.

I materiali per utensili fin qui descritti sono caratterizzati da tenacità, resistenza all'impatto e resistenza agli shock termini accettabili ma hanno limiti notevoli per quello che riguarda resistenza meccanica e durezza, soprattutto a temperature elevate.

I carburi metallici sono stati introdotti per soddisfare le necessità di velocità di taglio sempre più alte che consentissero velocità di produzione sempre più elevate. Grazie alla loro elevata durezza in un ampio intervallo di temperature, al modulo di elasticità e alla conducibilità termica elevati, essi sono tra i più importanti e versatili ed efficaci materiali per utensili.

I materiali ceramici consistono soprattutto in ossido di allumina a grano fine e di purezza elevata. Sono formati in forme adatte per gli inserti sotto pressione elevata e a temperatura ambiente, poi sinterizzati a temperatura elevata e sono chiamati ceramici bianchi.

Gli utensili in ceramico a base di allumina hanno resistenza all'abrasione e durezza a caldo molto elevate. Sono più stabili chimicamente degli acciai rapidi e dei carburi metallici; presentano quindi minore tendenza all'adesione durante la lavorazione e minore tendenza di formare tagliente di riporto.

Gli utensili in CBN sono realizzati legando un sottile strato di nitrato di boro a un substrato in carburo metallico mediante sinterizzazione sotto pressione. Mentre il carburo metallico impedisce tenacità, lo strato di CBN garantisce resistenza meccanica e resistenza all'usura molto elevate.

I materiali ceramici a base di nitrato di silicio (SiN) consistono in nitrato di silicio con l'aggiunta di allumina, ossido di ittrio e carburo di titanio. Gli utensili realizzati con questi materiali presentano tenacità e durezza a caldo elevate e buona resistenza agli shock termici.

Il diamante impiegato come utensile da taglio, presenta attrito utensile-acciaio basso, elevata resistenza all'usura e capacità di mantenere a lungo affilato il tagliente. Viene usato quando sono richieste finiture superficiali e tolleranze dimensionali accurate.

Sono sempre più diffusi gli utensili in diamante policristallino, l'orientamento casuale dei cristalli di diamante limita la propagazione delle cricche nell'utensile, aumentando quindi considerevolmente la tenacità. Gli utensili in diamante possono essere usati praticamente a qualsiasi velocità di taglio.

Il grafico 1 mette a confronto i diversi tipi di materiale, in base alla velocità di taglio si studia la vita dell'utensile.

Come descritto sopra gli utensili in materiale ceramico possono lavorare a velocità maggiori usurandosi di meno.

Il grafico 2 mostra l'andamento della durezza in funzione della temperatura per i più comuni materiali per utensili.

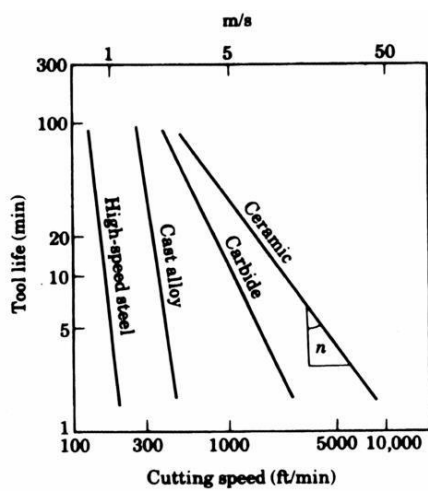


Grafico 1

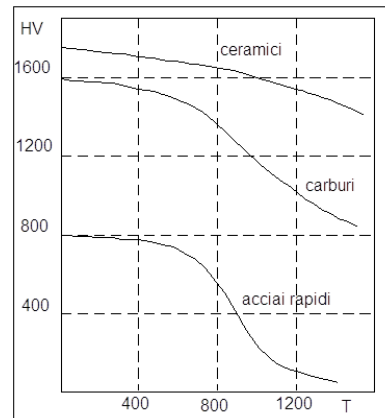


Grafico 2

CAPITOLO 2

Materiali Ceramici

2.1 Definizione e generalità

I materiali ceramici sono materiali inorganici e non metallici. La gran parte di essi sono composti da elementi metallici e non metallici (ossidi, nitruri, carburi) per i quali i legami interatomici sono ionici, covalenti ed intermedi.

I materiali ceramici possono essere suddivisi in due grandi gruppi: i ceramici tradizionali e i ceramici avanzati.

Tipicamente i materiali ceramici tradizionali sono costituiti da tre componenti: argilla, silice e feldspato. Esempi di materiali ceramici tradizionali sono i mattoni e le tegole usati nell'industria edile e la porcellana utilizzata nell'industria elettrica.

Negli ultimi decenni col progredire delle conoscenze sui legami tra proprietà e struttura di tali materiali, è nata una nuova generazione di materiali ceramici, detti "avanzati".

Per ceramici avanzati si intendono quei prodotti inorganici, non metallici, policristallini, provvisti di rilevanti prestazioni strutturali e/o funzionali.

Per prestazioni "strutturali" si intende la capacità del ceramico di resistere alle sollecitazioni meccaniche ed all'usura, in condizioni di temperatura e pressione molto elevate; mentre vengono considerate "funzionali" le eventuali proprietà elettriche, elettroniche, ottiche e magnetiche che essi possono presentare in particolari condizioni ambientali.

Nel campo della lavorazione dei metalli i ceramici strutturali sono apprezzati per l'elevata durezza, la stabilità chimica e l'elevata resistenza alla usura, proprietà che fanno dei ceramici degli ottimi strumenti per il taglio e la formatura dei metalli nei processi tecnologici.

Da anni si costruiscono utensili da taglio per tornio e fresatrice che consentono lavorazioni ad elevata velocità che permettono di incrementare la produttività e contemporaneamente la qualità dei prodotti finiti raggiungendo risparmi notevoli.

In generale le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali ceramici derivano dalla natura dei legami atomici e dal tipo di struttura cristallina.

2.2 Legami chimici nei materiali ceramici

I ceramici si dividono tra materiali a legame prevalentemente ionico e materiali a legame prevalentemente covalente.

I ceramici ionici sono principalmente costituiti da ossidi oppure da alogenuri di elementi metallici ad esempio l'allumina, la zirconia, l'ossido di magnesio.

I ceramici ionico-covalenti o covalenti puri sono diversi. Sono ad esempio costituiti da composti di non-metalli (silice), oppure da elementi puri (carbonio e silicio).

2.2.1 Strutture covalenti

Gli atomi sono legati attraverso la condivisione di elettroni con gli atomi vicini, lungo un certo numero di direzioni. L'energia non è minimizzata da un impaccamento denso di atomi, ma dalla formazione di concatenamenti di atomi, monodimensionali, bidimensionali o tridimensionali.

Il legame covalente risulta essere il più forte, conferendo al materiale resistenza alle alte temperature ed una elevata rigidità. Inoltre, la formazione di maglie tridimensionali garantisce valori di densità piuttosto bassi.

Per questi aspetti, materiali con strutture covalenti sono usati come rinforzi in materiali compositi e come semiconduttori nell'industria elettronica.

2.2.2 Strutture ioniche

Il legame ionico è un legame chimico di natura elettrostatica che si forma quando gli atomi possiedono un'elevata differenza di elettronegatività.

Quando si forma il legame ionico tra gli atomi allo stato solido, le energie degli atomi diminuiscono a causa della formazione degli ioni e del legame tra loro per formare un solido ionico. Questo tipo di solidi ha la tendenza ad assumere una disposizione degli ioni il più compatta possibile per ridurre al minimo l'energia globale del solido.

I limiti all'ottenimento di una struttura densa sono costituiti dalle dimensioni relative degli ioni e dalla necessità di garantire al solido lo stato di neutralità di carica.

Tra le più importanti strutture ad impaccamento denso di ioni, possiamo trovare il nitrato di boro, l'allumina e la Silice.

2.3 Proprietà meccaniche e termiche dei materiali ceramici

La resistenza a trazione nei materiali ceramici è molto variabile e va dai 0,7 MPa fino a un massimo di 7000 Mpa presente nei materiali preparati accuratamente in ambienti controllati. Inoltre, la resistenza a compressione è di norma cinque volte superiore a quella di trazione.

I materiali ceramici sono caratterizzati da un alta fragilità, un alta durezza e una bassa tenacità dovuta al legame ionico-covalente. Sono proprio questi legami che ne determinano una bassa plasticità.

Fatta eccezione per i materiali ceramici tradizionali, quelli avanzati presentano valori di densità che vanno da un minimo di $2,7 \text{ g/cm}^3$ ad un massimo $5,75 \text{ g/cm}^3$.

E' proprio la moderata densità che rende tale materiale molto adatto allo sviluppo di utensili da taglio che richiedono, sempre più, prestazioni di resistenza termica e meccanica invariate, se non migliorate rispetto ai materiali adottati tradizionalmente.

2.3.1 Proprietà meccaniche dei materiali ceramici

Le proprietà meccaniche sono una manifestazione della forza del legame chimico, ma sono fortemente influenzate, in maniera negativa, dai difetti presenti nel materiale.

Le principali cause di innesco della rottura nei materiali ceramici, sono da attribuire alla presenza di cricche superficiali, prodotte durante il processo di finitura, porosità presenti all'interno del materiale e di inclusioni di grani di eccessiva dimensione prodotti durante la lavorazione.

La resistenza a frattura è considerata come l'espressione sperimentale dello sforzo teorico richiesto per separare i piani che contengono gli atomi e formare due nuove superfici. Essa può essere inferiore al livello teorico per la presenza di difetti all'interno del materiale.

La tenacità è la capacità di un materiale di assorbire energia, spendendola nella sua deformazione. La scarsa tenacità di un materiale può portare ad una rottura di tipo fragile che si svolge in due fasi: innesco della cricca (rottura locale) e propagazione della cricca. La figura 1, mostra l'andamento della resistenza meccanica per due ceramici caratterizzati rispettivamente da "alta" e "bassa" tenacità. Nella figura 2, è illustrato l'andamento della tenacità in funzione della lunghezza del difetto in un ceramico "convenzionale" ed in uno "rinforzato". Nel primo caso la tenacità è costante perché è una caratteristica che non si modifica durante il progredire della frattura; nel secondo caso quando la cricca incontra una fibra la tenacità aumenta.

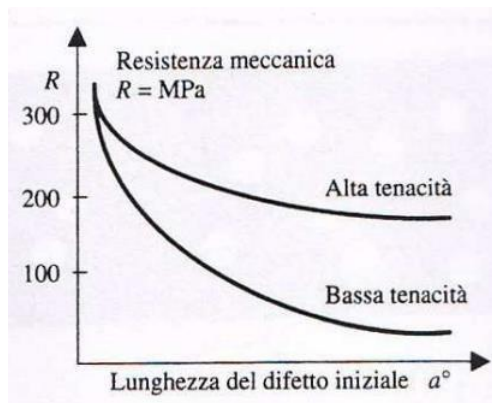


Figura 1

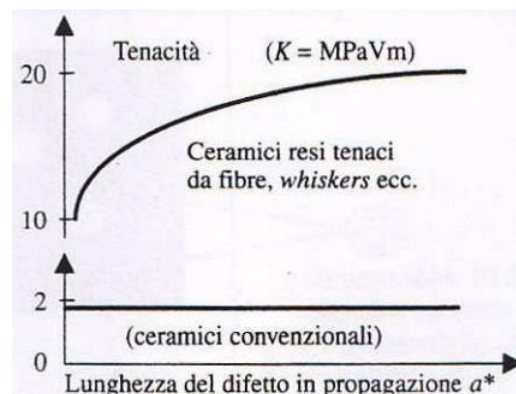


Figura 2

In entrambi i casi, lo scopo è quello di modificare la direzione e l'energia della cricca. In altre parole la cricca deve essere rallentata, deviata nella direzione e se possibile ramificata in cricche più piccole.

Nei materiali ceramici a causa dei legami ione-covalenti degli atomi, durante gli sforzi ciclici, non si ha plasticità. Di conseguenza la rottura per fatica nei materiali ceramici è rara.

2.3.2 Proprietà termiche dei materiali ceramici

Le caratteristiche termiche dei ceramici sono fondamentali per le applicazioni a temperature elevate, lavorazioni con sbalzi termici oppure dove il materiale è soggetto sia a sforzo meccanico che termico.

Il valore del coefficiente di dilatazione termica è strettamente legato alla natura del legame chimico e alla struttura cristallina. Infatti, l'aumento di volume che si osserva con l'innalzamento della temperatura è espressione dell'aumento delle vibrazioni termiche degli atomi rispetto alla loro posizione di riposo, a bassa temperatura. La dilatazione termica è collegata alla vibrazione delle particelle attraverso la forza del legame chimico. Infatti i materiali con coefficiente di dilatazione più basso, presentano anche punti di fusione più elevati, perché entrambi sono espressione della forza del legame.

Oltre alla dilatazione termica è di notevole importanza la "conducibilità termica", cioè il trasferimento di energia termica nel tempo attraverso una certa sezione di materiale.

In generale la maggior parte dei materiali ceramici hanno bassa conducibilità termica a causa del loro forte legame ione-covalente e sono buoni isolanti termici.

In generale, i composti caratterizzati da atomi leggeri (Be, Mg, Al), strutture semplici e compatte e purezza elevata presentano conducibilità termiche elevate.

2.3.3 Frattura fragile

La frattura è la separazione in due o più parti di una struttura o di un componente sottoposti ad una sollecitazione meccanica di tipo statico ad una temperatura che è bassa rispetto al punto di fusione del materiale. I materiali possono presentare due tipi di frattura: frattura fragile e la frattura duttile.

La frattura fragile, tipica dei materiali ceramici, si verifica in campo elastico e quindi non è preceduta da alcuna apprezzabile deformazione plastica; inoltre avviene con basso assorbimento di energia.

Ogni processo di frattura inizia con la formazione di fenditure microscopiche dette cricche, e procede attraverso la loro propagazione. Le modalità di frattura dipendono soprattutto dal meccanismo di propagazione delle cricche. Nella frattura fragile l'estensione delle cricche, una volta che queste hanno raggiunto una determinata dimensione critica, è rapidissima.

CAPITOLO 3

Utensili ceramici con matrice a base di allumina

3.1 Allumina: generalità

L'allumina è uno dei materiali ceramici più importanti. La forma cristallina più diffusa è quella della α -allumina, nota anche come corindone. La struttura è caratterizzata da un impaccamento denso di anioni di ossigeno, corrispondente ad una struttura esagonale compatta. I cationi Al^{3+} occupano siti ottaedrici, così da essere attorniti da sei ioni O^{2-} .

Dato il bilanciamento 2:3 tra cationi e anioni, gli ioni Al^{3+} occupano solo 2/3 dei siti ottaedrici. Un terzo dei siti rimane non occupato, in modo non ordinato; gli ottaedri di coordinazione dei cationi Al^{3+} sono leggermente distorti.

L'allumina viene prodotta attraverso il processo Bayer partendo dalla bauxite. La bauxite è attualmente il minerale alluminifero più importante. E' una roccia costituita principalmente da gibbsite e da bohmite, assieme ad altri idrossidi di Alluminio, sostanze amorfe e prodotti argillosi.

Con il processo Bayer si ottiene l'idrossido di alluminio che viene trattato per l'ottenimento di allumina pura o alluminio metallico.

Le diverse fasi che caratterizzano il processo Bayer possono essere schematizzate nel modo seguente:

1. Macinazione della bauxite;
2. Solubilizzazione ad alte temperature;
3. Separazione degli insolubili;
4. Riprecipitazione di $Al(OH)_3$ per abbassamento della temperatura;
5. Rigenerazione della soluzione;
6. Calcinazione;

L'allumina ha l'aspetto di una polvere bianca con granulometria variabile tra 150 e 50 μm e una frazione del circa 1% < 20 μm .

L'allumina (Al_2O_3) ha un peso molecolare di 101,94 un punto di fusione di 2977°C e una densità di 3,5÷4 t/m³.

I campi di utilizzo dell'allumina sono molteplici, grazie ad una serie di proprietà chimico-fisiche che rendono tale materiale adatto per svariate applicazioni. Le caratteristiche principali dell'allumina sono:

- Buona stabilità termica;
- Resistenza alla corrosione;
- Materiale non soggetto al fenomeno di ossidazione;

- Ottime proprietà dielettriche;
- Ottimo grado di durezza;
- Ottima resistenza all'usura;
- Bassa resistenza ai shock termici;

L'allumina essendo un materiale ad elevata durezza ha una resistenza all'usura e all'abrasione notevole e può agevolmente essere impiegata nelle applicazioni in cui si ha lo scorrimento di due materiali.

3.2 Principali compositi a base di allumina

L'allumina offre un'ottima base, grazie alle sue proprietà, per la ricerca, l'analisi e la realizzazione di utensili da taglio.

Negli ultimi decenni, si sono sviluppati approfonditi studi per la costruzione di utensili in grado di lavorare materiali sempre più tecnologici, con le più avanzate macchine di lavoro.

Le principali tendenze nella ricerca di materiali ceramici si stanno spostando dalla elevata purezza monofase dell' Al_2O_3 a ceramici multifase. La possibilità di rafforzare la matrice di partenza con l'introduzione di particelle di carburi o di whiskers può aumentare notevolmente le proprietà.

3.2.1 Al_2O_3 pura

Utensili da taglio in allumina pura sono stati i primi strumenti ad essere impiegati nell'ambito delle lavorazioni meccaniche. Impiegati per la lavorazione di acciai con bassa durezza e ghisa grigia, non trovano spazio nelle più moderne lavorazioni. Gli utensili in Al_2O_3 pura sono a grana fine ad elevata densità con dimensione grani $< 5\mu m$. Possiedono una buona durezza e una buona resistenza alla compressione, tuttavia hanno una scarsa resistenza alla frattura. E' quindi necessario, con l'aggiunta di elementi, aumentarne le proprietà meccaniche e renderli tali da essere competitivi nel mercato degli utensili da taglio.

3.2.2 Al_2O_3 /Zirconia

I compositi Al_2O_3 /zirconia sono utilizzati per tagli superficiali, semi finiture o operazioni di finitura. Gli inserti di questo tipo sono utilizzati per la tornitura di acciai al carbonio, leghe di acciai, ghisa grigia, ghisa malleabile e ghisa nodulare.

Gli inserti Al_2O_3 / ZrO_2 sono ottenuti disperdendo in modo casuale, in una matrice di allumina, granelli di ZrO_2 di diametro circa 20 nm.

L'aggiunta di nano-particelle di ZrO_2 di ridotta granulometria e la redistribuzione delle fasi comporta ad un aumento delle proprietà meccaniche. Si è registrato, un incremento fino a 706

MPa della resistenza a flessione e una resistenza alla frattura pari a $6,3 \text{ MPa m}^{1/2}$, oltre il 20% in più rispetto ai compositi $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$.

La frattura del $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{ZrO}_2$ è un misto di frattura intergranulare e transgranulare rispetto a una frattura principalmente intergranulare dell' $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$. Le tensioni residue sono generate dal coefficiente di dilatazione termica e la mancata corrispondenza tra fasi differenti, che porta alla generazione di dislocazioni e micro fessure attorno alle nano-particelle. Gli effetti delle nano-particelle sulla propagazione e sul blocco delle dislocazioni contribuiscono al miglioramento della forza e della tenacità dell' $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$.

3.2.3 Al_2O_3 / Carburo di titanio

I compositi di $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ sono ottenuti da una dispersione di grani di carburo di titanio in una matrice di allumina, la miscela viene poi pressata a caldo e risulta di un colore grigio scuro. La microstruttura è composta da una matrice di Al_2O_3 a grana fine con granelli di carburo di titanio dispersi in essa di diametro pari a pochi micron. Questi utensili da taglio sono principalmente impiegati per la lavorazione ad alte velocità di ghisa grigia, dato che rispetto agli inserti di Al_2O_3 pura vedono un aumento fino a $4,9 \text{ MPa m}^{1/2}$ della resistenza alla frattura, grazie alle particelle di TiC. Quando si aggiunge il 2% in volume di carbonio, la tenacità aumenta del 20% rispetto al materiale corrispondente privo di carbonio, mentre la durezza e la resistenza a flessione non diminuiscono di molto. Con la dispersione di particelle di carbonio si ha un aumento della resistenza alla frattura pur mantenendo una buona resistenza all'usura nelle lavorazioni continue. Proprio per questo, gli inserti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ sono impiegati nelle lavorazioni ad alta velocità di acciai duri, superleghe e ghisa. E' possibile trovare in commercio utensili da taglio che partendo da una base di $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ vengono rafforzati con altri elementi per ottenere maggiori valori di resistenza.

3.2.3.1 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC-Co}$

Prevedono uno strato di cobalto depositato sulla matrice $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ prima della pressatura a caldo. Grazie alla presenza di un film di cobalto, questo tipo di utensili presenta una resistenza alla frattura maggiore agli inserti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$.

3.2.3.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$

L'utensile da taglio $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$ è molto apprezzato per il suo coefficiente d'attrito minore rispetto al $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$.

Il materiale ha una composizione pari al 45% di Allumina, 50% di Titanio,

4,5% Nichel+Molibdeno e restante 0,5% di MgO che ha il compito di limitare la crescita dei grani di Allumina durante la sinterizzazione.

Questo tipo di materiale è caratterizzato da una elevata durezza, risultato di una formazione reticolare durante la sinterizzazione.

In generale, le proprietà meccaniche di questo tipo di materiale sono migliori rispetto al $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$, questo perché compositi come $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$ vengono sinterizzati tramite la pressione del gas a differenza della maggior parte dei compositi in carburo di titanio che vengono sinterizzati a caldo, con annesse limitazioni. La sinterizzazione tramite la pressione del gas è la tecnica più utilizzata per la produzione di utensili da taglio ad alte prestazioni.

La densità di un composito $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$ sinterizzato tramite la pressione di un gas raggiunge valori di densità relativa del 99,5%, resistenza alla flessione di 772 MPa, una durezza di 19,6 GPa e una resistenza alla frattura $5,82 \text{ MPa m}^{1/2}$.

3.2.4 Al_2O_3 / Nitruro di titanio

Il nitruro di titanio (TiN) è un altro forte rinforzo che può migliorare la resistenza alla frattura dei ceramici. Il TiN ha un'eccellente stabilità chimica e basso coefficiente di attrito a contatto con leghe a base di ferro e nichel e così esso può essere un potenziale candidato per i componenti resistenti all'usura e inserti per utensili da taglio.

I compositi $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ hanno un elevato modulo elastico rispetto ai compositi allumina-TiC, così il Nitruro di Titanio può vincolare la frattura durante la propagazione della cricca e quindi la tenacità aumenta di pari passo con l'aumento di contenuto di TiN. Può invece essere migliorata la resistenza alla rottura. Infatti, il TiN possiede un elevato coefficiente di espansione termica rispetto all' Al_2O_3 , durante il processo di raffreddamento può causare trazione con conseguente innesco di cricca.

3.3 Utensili $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$

Nonostante le buone proprietà meccaniche-fisiche degli utensili in allumina pura, la loro applicazione come inserti da taglio è molto limitata, la bassa resistenza meccanica e la loro incapacità a resistere ai shock termici ne influenza molto il loro utilizzo.

Negli ultimi decenni, si è ritenuto necessario portare delle modifiche. L'allumina offre un'ottima base di partenza, che è possibile integrare con delle particelle che andranno a modificarne la composizione chimica e le proprietà del prodotto finale.

Uno dei metodi principali per migliorare le proprietà meccaniche-fisiche è il rafforzamento tramite l'introduzione di particelle di zirconia (ZrO_2).

Il meccanismo di questo processo si basa sulla trasformazione polimorfa ricostruttiva.

Giunti a temperatura di sinterizzazione e terminato il processo, si lascia il composto a raffreddare fino a temperatura ambiente, la ZrO_2 passa dalla fase tetragonale alla fase monoclinica. La zirconia in fase tetragonale, influenza sia la durezza che la resistenza, conseguenza dell'espansione volumetrica durante la trasformazione polimorfa e dalla

propagazione di cricche. La fase monoclina aumenta la durezza ma non la tensione di rottura a causa delle cricche formatosi durante il raffreddamento.

E' possibile aumentare la dimensione delle particelle di zirconia e diminuire la temperatura di trasformazione polimorfa introducendo degli additivi come MgO, Y₂O₃, CaO, CeO₂; si ottiene in questo caso zirconia parzialmente stabilizzata.

Andremo quindi a confrontare diversi tipi di materiale con diversa composizione per capire quale tipo di combinazione risulta essere quella che restituisce le migliori proprietà meccaniche.

3.3.1 Variazione delle proprietà meccaniche in base al contenuto di ZrO₂

In generale, un utensile da taglio è composto dal 80-90% di allumina pura con dimensione di grano inferiore 0.5µm , la restante percentuale è data dagli elementi aggiunti per rafforzare la matrice.

Prenderemo in esame cinque tipi di materiale:

- Materiale 1 : Allumina (80%), zirconia parzialmente stabilizzata (20%) ottenuta con l'aggiunta di Y₂O₃ (5.3%)
- Materiale 2 : Allumina (70%), zirconia parzialmente stabilizzata (30%) ottenuta con l'aggiunta di Y₂O₃ (5.3%)
- Materiale 3 : Allumina (80%), zirconia in fase monoclina (20%)
- Materiale 4 : Allumina (80%), zirconia in fase monoclina a grano fine con Y₂O₃ (20%)
- Materiale 5: Allumina (70%), zirconia in fase monoclina a grano fine con Y₂O₃ (30%)

Tabella riassuntiva:

Type and composition of selected compounds				
	Compound composition (mass%)			
	Al ₂ O ₃	ZY5	ZrO ₂ ^(m)	ZrO ₂ ^(m) + Y ₂ O ₃
1	80.0	20.0	-	-
2	70.0	30.0	-	-
3	80.0	-	20.0	-
4	80.0	-	-	20.0
5	70.0	-	-	30.0

I composti dopo esser stati uniformati ed essiccati vengono granulati. I campioni vengono prima pressati e poi sinterizzati in un forno elettrico ad alta temperatura, 1600-1615 °C, con velocità costante di riscaldamento e di raffreddamento. Il tempo di sinterizzazione varia tra i 60 e i 180 minuti .

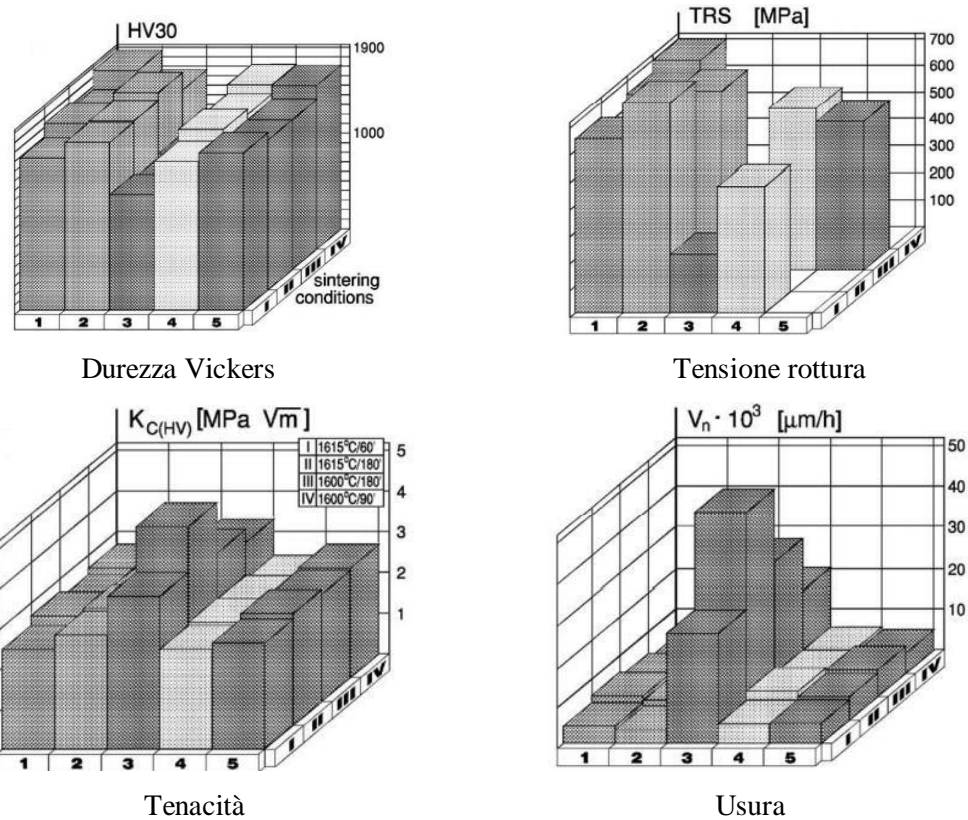
- Sinterizzazione 1: 1615°C per un tempo di 60 minuti
- Sinterizzazione 2 : 1615°C per un tempo di 180 minuti
- Sinterizzazione 3 : 1600°C per un tempo di 180 minuti

- Sinterizzazione 4 : 1600°C per un tempo di 60 minuti

Avremmo quindi quattro diverse condizioni di sinterizzazione per cinque diversi tipi di materiale.

Una volta finito di preparare i provini vengono effettuate svariate prove per: durezza Vickers, tensione rottura, tenacità e resistenza all'usura.

Risultati:



La prova usura dell'utensile è stata condotta per gli inserti in materiale 1 e 2, a una velocità di taglio di 400m/min, velocità d'avanzamento 0.16mm/rev, profondità di passata 1.9mm

The tool life of the selected cutting inserts

Inserts	Tool life, <i>T</i> (min)	
	I (1615 °C for 60 min)	II (1600 °C for 90 min)
1 (20 mass% ZY5)	17.3	13.3
2 (30 mass% ZY5)	18.6	10.9

Questo tipo di esperimento è stato condotto per vedere l'influenza della trasformazione polimorfa ricostruttiva sulle proprietà dell'utensile.

Dalle prove notiamo, che l'utensile da taglio realizzato con il materiale di tipo 1, sinterizzato a 1615°C per 60 minuti ha le migliori proprietà meccaniche.

Questo tipo di composito ha una bassissima usura, oltre l'80% in più della resistenza a rottura se comparato all'allumina e una migliore tenacità e durezza.

Il miglioramento delle proprietà è dato dalla presenza di zirconia parzialmente stabilizzata in fase tetragonale nei ceramici con minimo l'80% di allumina.

Al contrario gli utensili da taglio prodotti con il materiale 3 registrano un netto decadimento delle proprietà meccaniche, il tutto si deve attribuire alla fase monoclina presente nella matrice. Si può concludere affermando che per ottenere le migliori proprietà meccaniche in un composito Al_2O_3/ZrO_2 bisogna evitare la formazione della fase monoclina. La zirconia parzialmente stabilizzata è quella che conferisce al composito le migliori proprietà meccaniche.

3.3.2 Studio del fianco d'usura dell'utensile ZrO_2 con il metodo Taguchi

Oggigiorno, l'obiettivo dell'industria meccanica è realizzare prodotti di alta qualità che rispettino le dimensioni progettuali, soddisfacendo le complesse esigenze del mercato con il minor spreco di materiale possibile, riducendo i costi e i tempi. La tornitura è sicuramente una delle lavorazioni meccaniche più diffuse, specialmente per la fase di finitura del pezzo.

La lavorazione di un componente ha come conseguenza l'usura degli strumenti di lavoro, quindi risulta fondamentale la scelta dei parametri iniziali della macchina, che come vedremo influenzeranno di gran lunga la vita utile dell'utensile da taglio.

Il metodo Taguchi si basa sulla scelta di fattori di controllo, su cui intervenire in sede di progettazione, che hanno come obiettivo finale la massima qualità e la minimizzazione dei tempi e dei costi di lavorazione. Attenzione, nel nostro caso, ci prefissiamo di studiare l'usura dell'inserito in base ai parametri di lavoro. E' possibile quindi determinare la miglior combinazione di valori iniziali per ottenere il minor numero di sprechi e la massima qualità.

Nella tornitura, sono di fondamentale importanza la finitura superficiale del pezzo, la lavorabilità del materiale, la potenza macchina e l'usura del tagliente. E' importantissimo ricordare che l'usura del tagliente può compromettere la lavorazione, ed essere decisivo per quanto riguarda la buona riuscita o meno del prodotto finale.

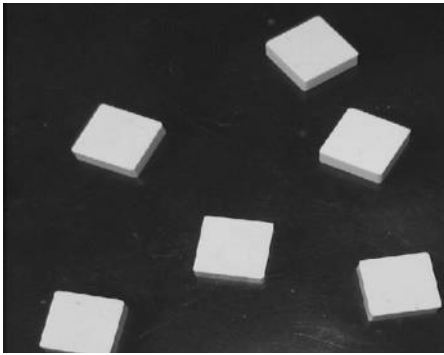
Numerosi studi e prove pratiche sono state fatte per trasferire lo studio del professore Taguchi nel mondo delle lavorazioni meccaniche, ottenendo importantissimi risultati.

Prima di iniziare un test è necessario scegliere il materiale da lavorare, l'utensile e la macchina per confermare la teoria.

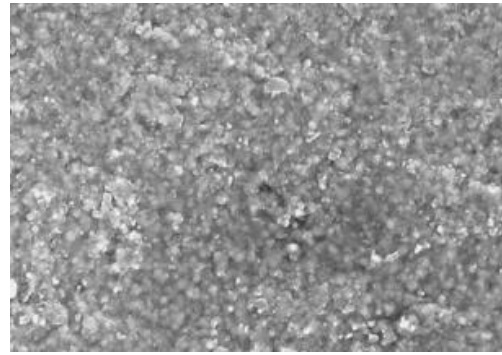
Come materiale prenderemo un acciaio AISI 4340, montato su un tornio alimentato da un motore di 11kW con un range di 47-1600 giri/minuto. La lavorazione avviene in completa assenza di lubrorefrigerazione e le analisi sull'utensile da taglio avvengono dopo cinque minuti di lavoro. La scelta dell'utensile è fondamentale.

Si parte da una matrice a base di allumina che viene modificata con l'aggiunta di polvere di zirconia e MgO. La prima serve per aumentare la durezza e la resistenza alla frattura e il secondo funge da inibitore per la crescita del grano. Il composito, attraverso una pressa idraulica, viene compresso in uno stampo. Una volta estratto, una mola diamantata porta in

tolleranza l'utensile, secondo le regole ISO. Infine, gli inserti vengono lavati e lucidati con una pasta diamantata per un tempo medio-lungo. Infine, viene verificata al microscopio la grana; solo così capiremo se il processo produttivo ha restituito un buon prodotto.



Inserti in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$



Microstruttura inserto

I tre parametri che andremo a studiare sono profondità di passata, velocità di taglio e velocità d'avanzamento. Dopo diverse prove con provini identici variando i tre parametri iniziali si analizzano i dati registrati dai vari sensori posti sulla macchina, confrontandoli con il modello matematico del Professore Taguchi. Dopo le opportune medie e calcoli matematici, si è giunti a interessanti conclusioni che possono portare a svariate e importanti soluzioni in molti campi delle lavorazioni meccaniche.

Ricordiamo, la condizione ottimale è la minimizzazione dell'usura del tagliente che ha come conseguenze miglior finitura e maggior durata della vita dell'utensile. Si è notato che tutti i tre parametri hanno una influenza negativa sull'usura dell'utensile, ma il parametro che più la penalizza è la profondità di passata con il 46%, la velocità di taglio 34% e la velocità d'avanzamento per il 15%. I risultati ottenuti dalle varie prove, una volta messi a confronto con i dati teorici, risultano pressoché identici.

Possiamo concludere che è possibile prevedere una combinazione di parametri iniziali ottimali che hanno come obiettivo la qualità e il risparmio di denaro e tempo.

Nel caso della tornitura è fondamentale scegliere con estrema accuratezza la profondità di passata, velocità di taglio e velocità d'avanzamento per minimizzare il più possibile l'usura dell'utensile; ne deriva una migliore qualità finale del pezzo e un risparmio di tempo e denaro.

Le conoscenze acquisite possono essere trasferite ad altri tipi di lavorazione che hanno come impiego utensili ceramici, tipo la fresatura e la rettifica.

3.4 Utensili allumina/TiC

Si è visto come l'allumina è un ottima base di partenza per realizzare utensili da taglio con buone prestazioni in grado di lavorare pezzi anche difficili. E' necessario però, vista la bassa durezza e la bassa resistenza agli shock termici, introdurre in una matrice d'allumina una

seconda fase di particelle di carburo di titanio. L'introduzione di una seconda fase ne aumenta le proprietà meccaniche e la resistenza alla propagazione delle fratture. Con l'aggiunta di particelle di TiC la durezza e la resistenza all'usura aumentano, si registra anche una buona stabilità ad alte temperature e resistenza agli shock termici.

E' noto come sbalzi termici possono provocare gravi danni alla struttura dell'utensile.

Uno shock termico, può indurre nell'utensile una situazione di stress che è sufficiente a causare rotture e propagazioni di cricche.

La maggior parte degli utensili viene sinterizzata tramite pressatura a caldo, vedremo come nuove tecniche di sinterizzazione potrebbero portare in futuro a dei miglioramenti delle proprietà meccaniche.

3.4.1 Studio delle lavorazioni degli acciai e usura degli utensile da taglio Al_2O_3/TiC

Le principali lavorazioni, oggi, vengono effettuate su acciai molto duri o temprati. L'elevata durezza dell'acciaio può portare a una veloce usura dello strumento di lavoro. Rispetto ai più comuni utensili da taglio, l'inserito in Al_2O_3-TiC è caratterizzato da una elevata durezza, resistenza all'usura, stabilità termica ed elevata tenacità che lo rende ideale per le lavorazioni di acciai ad elevate velocità di taglio.

In questi anni numerosi studi hanno cercato di trovare una relazione tra durezza del pezzo da lavorare e usura dell'utensile, prima si pensava che solo le forze in gioco contribuissero ma come vedremo anche le modalità di realizzazione dell'utensile possono influire sulle sue proprietà meccaniche.

Il metodo tradizionale è la pressatura a caldo, tuttavia durante il processo, il trasferimento del calore avviene tramite lo stampo. Questo significa che c'è trasferimento di calore dalla superficie del pezzo al cuore, con conseguente differenza di temperatura superficie-cuore. Seppur minima, questa traslazione di calore, induce sul pezzo uno stress termico che potrebbe influenzare negativamente le proprietà.

In confronto, l'impiego di un forno a microonde specifico consente al materiale di assorbire energia elettromagnetica in volume trasformandola in calore. Questo meccanismo elimina lo stress termico, infatti si ha una distribuzione omogenea del calore all'interno del materiale. Inoltre, questa tecnologia ci permette di ottenere una grana fine e quindi un miglioramento delle proprietà termiche.

Si metta a confronto tre tipi di utensile da taglio:

- Utensile 1: Al_2O_3-TiC sinterizzato in forno a microonde per 10 min a $1700^\circ C$ (AT33)
- Utensile 2: Al_2O_3-TiC pressato a caldo, attualmente è il più impiegato ed è facilmente reperibile sul commercio (LT55)
- Utensile 3: Utensile in carburo cementato (YS8)

Properties of the cutting tools.

Tools	Chemical composition	Density (g/cm ³)	Vickers hardness HV20 (GPa)	Fracture toughness (MPa m ^{1/2})
AT33	≈90%(Al ₂ O ₃ + TiC)/6%(Mo + Ni)/rest	4.41	21.3 ± 0.3	5.28 ± 0.74
LT55	≈85%(Al ₂ O ₃ + TiC)/10%(Mo + Ni)/rest	4.92	20.8 ± 0.4	5.88 ± 0.32
YS8	≈94%WC/6%Co	12.87	15.3 ± 0.7	13.12 ± 0.21

Da tabella si nota come Al₂O₃ e TiC siano la fase principale. L'aggiunta di Mo e Ni contribuisce alla resistenza alla deformazione plastica e durante il processo di sinterizzazione contribuisce a limitare l'accrescimento del grano e quindi a migliorarne le proprietà.

Le prove sono state eseguite su un tornio con completa assenza di lubrorefrigerazione e i materiali da lavorare erano due:

- Materiale 1: 40Cr
- Materiale 2: T10A

Parametri di taglio:

Cutting parameters.

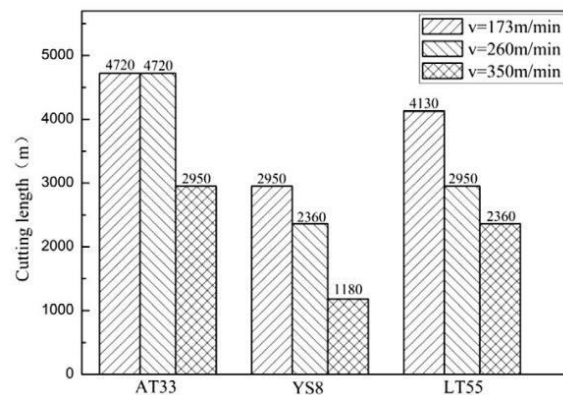
Work materials	Cutting speed V (m/min)	Feed rate f (mm/rev)	Depth of cut a _p (mm)
40Cr	173/260/350	0.1	0.1
T10A	69/104/155	0.1	0.1

3.4.1.1 Risultati dopo lavorazione acciaio temprato 40Cr

Dopo aver effettuato le varie prove con i tre tipi di utensile sull'acciaio 40Cr, l'utensile in carburo cementato presenta la vita utile più breve a tutte e tre le velocità di taglio.

La causa è sicuramente da attribuire alla scarsa durezza del materiale.

Di seguito il diagramma che indica la vita utile dell'utensile in base alle velocità di taglio.

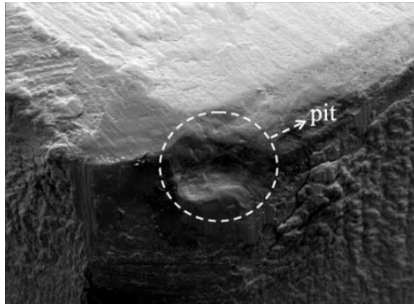


E' chiaro inoltre che l'inserto sinterizzato in forno ha ottenuto i migliori risultati. Dal grafico, si può notare, che per gli utensili ceramici (AT33 e LT55) quando la velocità di taglio è pari al

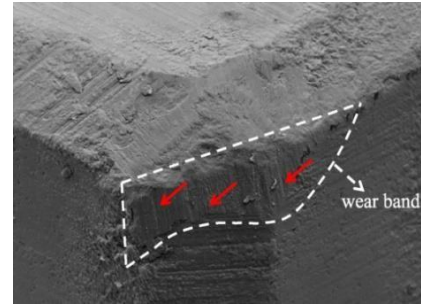
350m/min la vita utile ha un calo improvviso. L'usura per abrasione risulta essere la più influente, aumentando la velocità di taglio la vita utile dell'utensile cala drasticamente.

E' stato osservato sull'utensile LT55 la formazione di un cratere d'usura, la concentrazioni di cricche da stress possono esserne la causa.

Per l'inserto AT33 si è sviluppata una scanalatura sul fianco, caratteristica tipica dell'abrasione. L'abrasione si verifica quando il materiale più morbido dell'utensile è costretto lavorare sotto sforzo a contatto con il materiale molto più duro del pezzo.



Formazione cratere inserto LT55

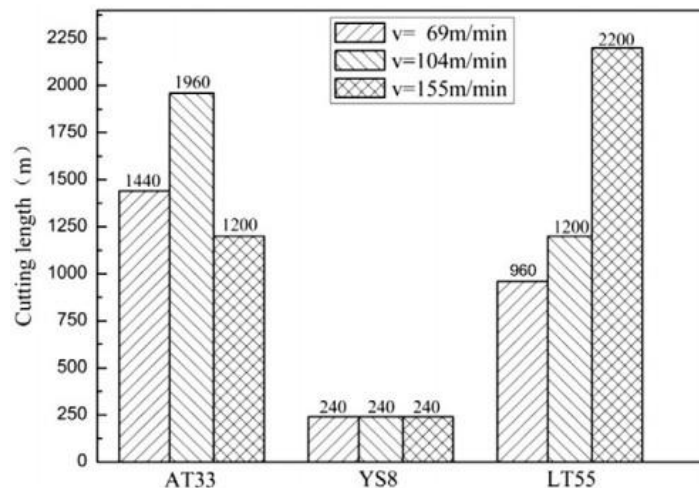


Usura sul fianco inserto AT33

3.4.1.2 Risultati dopo lavorazione acciaio temprato T10A

Il secondo materiale usato per i test è l'acciaio T10A, materiale ampiamente impiegato per la costruzione di parti meccaniche, che può raggiungere elevati valori di durezza dopo il trattamento di tempra.

Dopo i relativi test alle diverse velocità di taglio si può redare il grafico vita utensile in funzione delle diverse velocità di taglio.



Ormai, risulta chiaro la completa inefficienza dell'utensile YS8 per le lavorazioni di acciai temprati ad alte velocità di taglio.

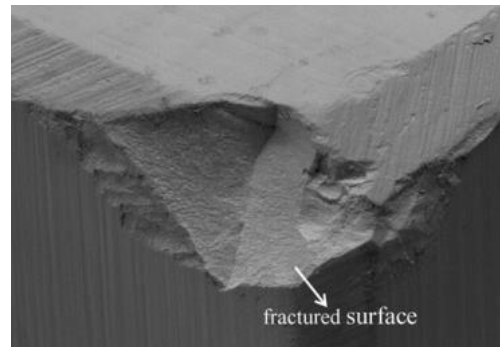
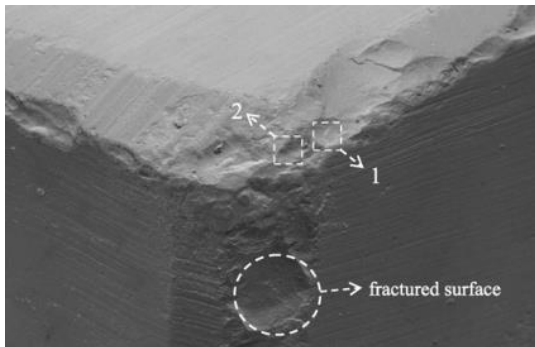
E' interessante scoprire come l'utensile LT55 a una velocità di taglio più alta, ha durata di vita utile più lunga. Quando si lavora un acciaio temprato ad alte temperature, è inevitabile lo

sviluppo di calore nell'interfaccia utensile-pezzo con conseguente deterioramento delle proprietà meccaniche. Questo ci fa capire come un utensile sinterizzato a pressione, a velocità di taglio elevate, si usura meno di un utensile sinterizzato a forno.

In generale la frattura di uno strumento è legata alla fragilità del materiale, dalle forze di taglio che si sviluppano durante la lavorazione e dalla durezza del pezzo da lavorare.

La situazione cambia se il materiale viene lavorato a velocità inferiore.

Come possiamo notare dalle due figure, l'utensile AT33 ha un usura molto meno evidente del suo concorrente. Questo perché è caratterizzato da una usura transgranulare segno di elevate proprietà meccaniche.



Si ritiene inoltre che le proprietà meccaniche subiscono un aumento dei valori se il materiale viene sinterizzato in forno, data una miglior distribuzione delle particelle e la presenza limitata di cricche da stress termici.

E' ancora presto per dare una sentenza, però si può dedurre dai primi test che sicuramente per un acciaio temprato di durezza intorno ai 50HRC, l'utensile in carburo cementato è quello che ha ottenuto il peggior risultato dopo la lavorazione. Si ha la conferma con il secondo test, con materiale T10A, che gli inserti in carburo cementato non sono adatti per lavorazioni di acciai duri.

I meccanismi d'usura che si presentano nell'utensile AT33 sono adesione e abrasione. La frattura è perlopiù transgranulare, segnale di buone proprietà meccaniche, l'assenza di pori e la distribuzione della grana ci conferma che la sinterizzazione a forno è un ottimo metodo di produzione utensili.

Lo studio di questo nuovo tipo di sinterizzazione è solo agli inizi, dato che lavorazioni di materiali molto duri, vedi l'acciaio temprato T10A ha evidenziato ancora grandi carenze in termini di vita utile dell'utensile.

3.5 Utensili allumina/TiC-TiN

Molti test sono stati fatti sulla produzione di utensili da taglio, approfondendo ciò che riguarda la temperatura e il tempo di sinterizzazione. La maggior parte degli utensili in commercio vengono prodotti tramite pressatura a caldo.

I risultati hanno dimostrato che diversi fattori possono influenzare le proprietà meccaniche del prodotto finale, l'aggiunta di micro-particelle di materiali rafforzativi, la variazione di temperatura e la variazione del tempo di sinterizzazione sono tra queste.

Utensili in allumina sono conosciuti come materiali buoni ma con scarse proprietà meccaniche quando si parla di lavorazioni ad alta velocità, una delle soluzioni studiate è l'introduzione di particelle di TiC e TiN che possono portare a un netto miglioramento delle proprietà conferendo maggior durezza, elevata tenacità e resistenza all'usura. Il TiN, oltretutto, contribuisce dando maggior stabilità chimica e abbassando il coefficiente d'attrito a contatto con materiali ferrosi.

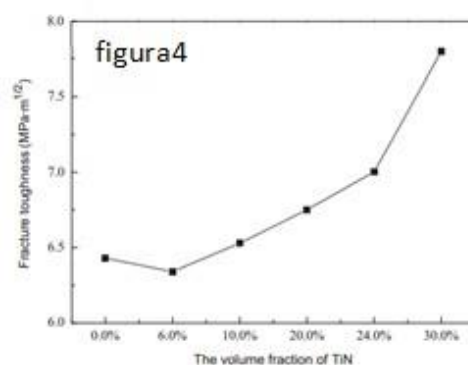
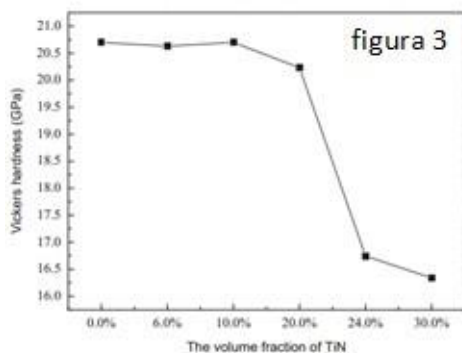
Partendo da una matrice base di α -Al₂O₃ con dimensione grani pari a 0.5 μ m, si ha una modifica con l'introduzione di particelle di dimensioni inferiori a 0.5 μ m di TiC e TiN. L'aggiunta di particelle di MgO serve per inibire la crescita del grano durante la sinterizzazione.

I compositi ottenuti sono da prima omogeneizzati per 48h e poi essiccati in un forno sottovuoto. La fase finale prevede la pressatura sottovuoto a caldo. La temperatura di sinterizzazione varia tra i 1500-1700 °C e il tempo tra i 15 e i 45 minuti. Chiaramente variando temperatura e tempo variano le proprietà ed è ciò che noi vogliamo studiare.

3.5.1 Variazione delle proprietà meccaniche con l'aggiunta di micro-particelle di TiN

Come mostra la figura 3, la durezza Vickers rimane costante per i valori da 0-10% in volume di TiN, poi c'è un decadimento dei valori di durezza. La causa è da attribuire alla differenza di durezza tra il TiN e il TiC. La durezza del TiN è inferiore; quando il contenuto di TiN aumenta viene a meno il carburo di titanio, abbassando quindi la durezza complessiva del composito.

La figura 4 mostra la resistenza a frattura, essenzialmente cresce con il crescere di contenuto di TiN. Questo vale perché il nitrato di titanio ha modulo di elasticità maggiore rispetto al resto; c'è da aggiungere anche che il TiN possiede un alto coefficiente di espansione termica, che può causare tensioni di trazione durante il raffreddamento aumentandone la tenacità.

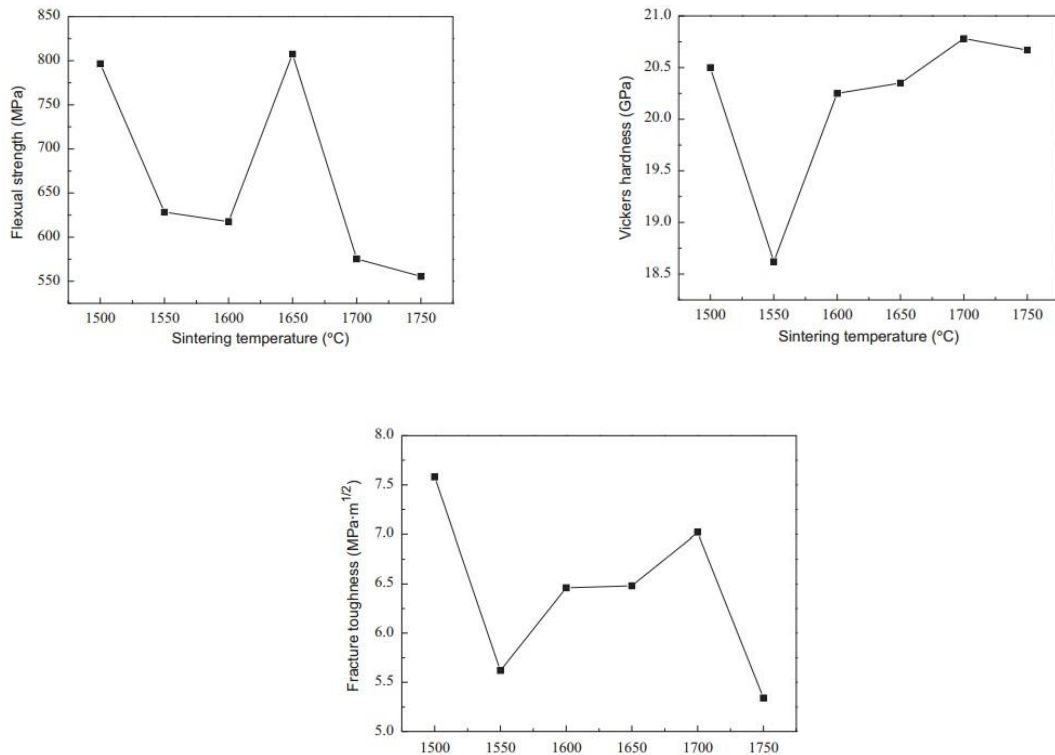


3.5.2 Variazione delle proprietà meccaniche in base alla temperatura di sinterizzazione

All'interno di un certo range il composito ha modo di stabilizzarsi e densificare meglio, comportando a un miglioramento delle proprietà meccaniche.

Tuttavia bisogna prestare attenzione, temperature troppo basse possono portare a una insufficiente sinterizzazione, temperature troppo alte portano al degrado del nitrato di titanio e all'accrescimento del grano in modo incontrollato.

Dai grafici sottostanti che descrivono le proprietà in base alla temperatura di sinterizzazione, la linea che ne descrive l'andamento subisce subito una diminuzione, poi un aumento e infine un'altra diminuzione.

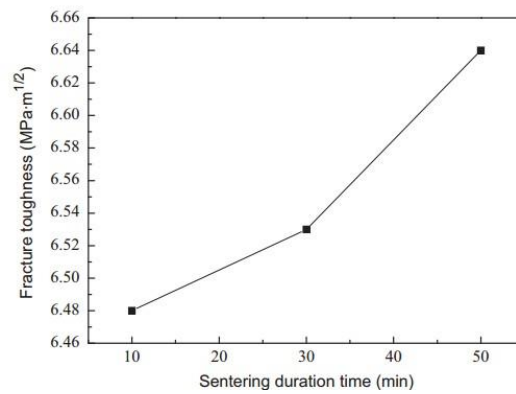
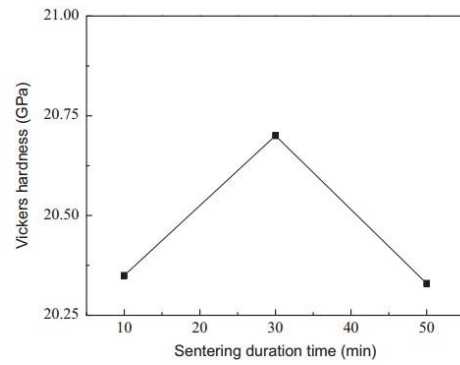
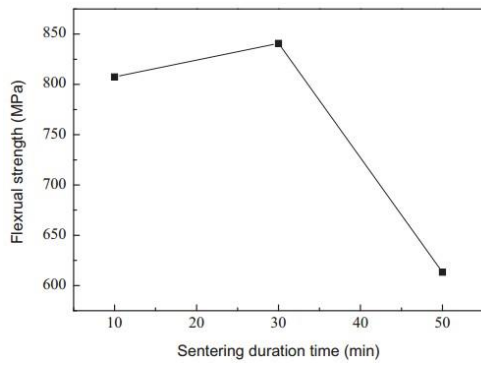


Il risultato che si può dedurre è che esiste un range di temperatura ottimale per ottenere le migliori proprietà meccaniche. Usciti dall'intervallo non saremo sicuri di ottenere le proprietà utili che ci occorrono in fase di lavorazione.

3.5.3 Variazione delle proprietà meccaniche in base al tempo di sinterizzazione

Dai grafici sottostanti si vede che la resistenza a flessione e la durezza Vickers da prima aumentano e poi diminuiscono con l'aumentare del tempo di sinterizzazione.

Al contrario la resistenza alla frattura aumenta con l'aumentare del tempo, questo vale perché secondo recenti studi la densità del composito in fase di sinterizzazione con l'allungare del tempo viene migliorata. Una densità maggiore comporta a un incremento della resistenza alla frattura.



Deve esistere quindi un compromesso tra resistenza alla flessione, durezza e resistenza alla frattura. Vale anche qui studiare un determinato range di tempo per il processo di sinterizzazione che sia in grado di ottenere un prodotto finale con le migliori caratteristiche.

CAPITOLO 4

Utensili in ceramico innovativo

4.1 SiAlON-SiC

L'evoluzione del mercato richiede pezzi sempre più complessi e difficili da lavorare.

Gli utensili da taglio con matrice a base d'allumina hanno ottime proprietà meccaniche, ma a volte non bastano e quindi si è ritenuto necessario studiarne altri tipi. Si cercano utensili capaci di resistere agli sforzi meccanici, chimici, termici e che permettono lavorazioni ad alte velocità di materiali duri.

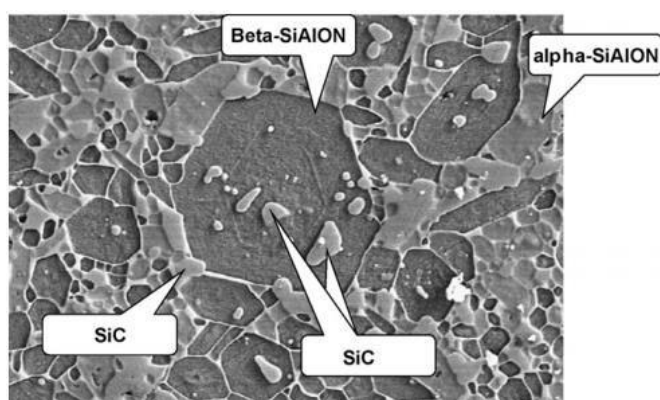
Negli ultimi anni si stanno sviluppando degli utensili in ceramico innovativo, utensili multifase come il SiAlON, che vengono sempre più studiati e impiegati. L'aggiunta di particelle di carburo di silicio sembra essere uno dei metodi principali per il rafforzamento e l'incremento delle proprietà meccaniche di quest'ultimi.

L'obiettivo è quello di incrementare la durezza e allo stesso tempo di mantenere alta la tenacità, aumentando la resistenza all'usura e quindi la vita utile dell'utensile.

Il carburo di silicio è noto per la sua elevata durezza e la sua compatibilità con il nitrato di silicio in fase di sinterizzazione.

Per ottenere una densità teorica pari al 99% del composito, il SiC deve essere pari e non superiore al 30% in volume, in caso contrario una quantità maggiore potrebbe ostacolare la sinterizzazione.

La microstruttura della matrice SiAlON è composta da una base che vede al suo interno grani in fase β aciculari e grani fase α globulari. Le particelle di SiC si trovano ai contorni e all'interno della fase β .

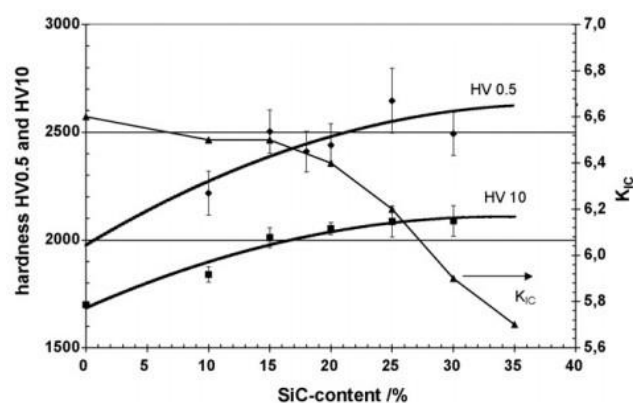


Sembra che le particelle più piccole di SiC vengono incorporate nei grani SiAlON durante la fase di sinterizzazione mentre le particelle più grandi restano a bordo grano.

Una maggior quantità di SiC nel composto, comporta la diminuzione della fase β aciculare, questo perché le particelle di SiC ostacolano l'accrescimento del grano.

Se il contenuto è pari al 25% in volume di SiC, la durezza può incrementare del 20-25%. Attenzione, la durezza non cresce linearmente con la quantità di SiC, per un valore superiore al 25% non è stato registrato nessun miglioramento. L'aumento del contenuto di SiC porta a maggiori quantità di additivi in fase di pre-sinterizzazione nel composto. Gli additivi in fase di sinterizzazione creano fase vetrosa che abbassa la durezza della matrice.

Esiste anche una relazione tra quantità di SiC e tenacità. Fino a una dose del 15% di SiC la tenacità rimane costante, all'aumentare del contenuto la tenacità diminuisce.



Utensili SiAlON-SiC presentano una elevata resistenza all'usura quando la quantità di SiC è pari al 10%, significa maggior vita utile dell'utensile, miglior finitura e risparmio di tempo e denaro.

In conclusione, la quantità di particelle di SiC ha una grandissima influenza sulle proprietà meccaniche, se da una parte ne aumenta la durezza dall'altra ne abbassa la tenacità. In fase di progettazione bisogna trovare il giusto compromesso per ottenere le proprietà migliori.

4.2 SiAlON-Si₃N₄

Il Si₃N₄ è attualmente il materiale ceramico principale usato come rinforzo negli utensili da taglio in ceramico innovativo, grazie alla sua elevate resistenza alla rottura, buona conducibilità termica, basso coefficiente di dilatazione termica e maggiore resistenza agli shock termici.

Partendo già da una buona base, infatti, il materiale SiAlON ha un ottima resistenza agli shock termici a causa del suo basso coefficiente di dilatazione termica; il materiale ottenuto con l'aggiunta di particelle di Si₃N₄ in una matrice di SiAlON, il SiAlON-Si₃N₄ è adatto per le lavorazioni ad alta velocità di superleghe.

Tuttavia, vista la bassa durezza e tenacità, si è costretti a introdurre in fase di preparazione del composito particelle di SiC, WC, TiCN per migliorarne le caratteristiche meccaniche. E' possibile inoltre l'aggiunta di ulteriori micro-particelle di Si₃N₄, si è registrato infatti un aumento della resistenza a flessione, della tenacità e resistenza alla frattura.

Lo studio del comportamento di usura degli utensili è fondamentale non solo per una corretta lavorazione ma anche per lo sviluppo di utensili da taglio multistrato.

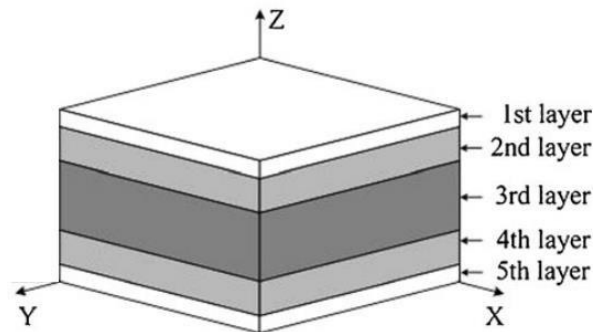
L'introduzione del concetto di materiale multistrato, ha fornito un nuovo metodo d'approccio per migliorarne le proprietà termiche e meccaniche.

Nelle lavorazioni di tornitura di superleghe i tipi di usura più frequenti sono crateri d'usura, usura del fianco e scheggiatura. I meccanismi di deterioramento più presenti avvengono per adesione, abrasione e diffusione. L'usura adesiva è il meccanismo principale del consumo della faccia dell'utensile e l'alterazione del fianco è causato dall'usura abrasiva.

4.2.1 Produzione SiAlON-Si₃N₄ multistrato

L'analisi di un utensile da taglio multistrato può portare in fase di produzione e applicazione a dei vantaggi. L'obiettivo è quello di realizzare degli strati che inducono in superficie uno stato di tensione di compressione residua. L'idea di base è quella di progettare diversi strati di materiali con diversi coefficienti di dilatazione termica, in modo che in fase di produzione si abbiano tensioni residue. E' dimostrato che le tensioni residue possono essere facilmente indotte da materiali con diversi coefficienti di dilatazione termica.

Qui sotto l'esempio di un utensile multistrato :



In virtù della differenza di coefficiente di dilatazione tra il Si₃N₄ ($3.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) e il TiCN ($8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), lo strato tre (3rd layer) sarà occupato dal TiCN e gli strati 1 e 5 dal Si₃N₄. E' possibile impiegare sia la faccia 1 e 5 come superfici da taglio.

In fase di produzione dell'inserto è necessario introdurre delle micro-particelle di additivi (Al₂O₃, AlN, Y₂O₃) che promuovono la densificazione durante la sinterizzazione.

Per il nostro studio andremo quindi a sviluppare quattro diversi tipi di compositi:

Composites	Si ₃ N ₄ (0.5 μm)	Si ₃ N ₄ (0.02 μm)	Al ₂ O ₃ (0.5 μm)	Al ₂ O ₃ (0.1 μm)	AlN (0.5 μm)	TiC _{0.7} N _{0.3} (0.5 μm)	Y ₂ O ₃
SAAT10	53.25	17.75	0	10	5	10	4.0
ST10	61.50	20.50	3.2	0	0	10	4.8
ST15	57.75	19.25	3.2	0	0	15	4.8
ST20	54.00	18.00	3.2	0	0	20	4.8

Da ciò che abbiamo detto in precedenza, notiamo subito quale composito prenderà posto nello strato intermedio, chiaramente è il ST20 che ha contenuto di TiCN maggiore.

Una volta creati i compositi, vengono stratificati e messi in un forno per la sinterizzazione a una temperatura intorno ai 1750 °C per 60 min.

Otteniamo due utensili da taglio così stratificati :

Specimen code	1st (5th) layer	2nd (4th) layer	3rd layer
GSS1	ST10	ST15	ST20
GSS2	SAAT10	ST15	ST20

Ne seguono le varie prove di verifica della durezza e delle caratteristiche meccaniche, per confrontare post lavorazione quale utensile si è comportato meglio.

Come lavorazione si effettua una tornitura di una superlega con utensili multistrato.

4.2.2 Confronto utensili multistrato e utensili comuni in fase di lavorazione

Utensili multistrato FMG (GSS1, GSS2) sono stati messi a confronto con utensili fabbricati con diversi tipi di composito (SAAT10 e ST10) e utensile SiAlON disponibile in commercio (KY1540). Nella tabella sottostante sono descritte le proprietà dei cinque tipi di utensile che andremo a studiare. Sono presenti la resistenza a flessione, la resistenza a frattura e la durezza Vickers.

Tools	Flexural strength (σ_f , MPa)	Fracture toughness (K_{IC} , MPa m ^{1/2})	Vicker's hardness (HV, GPa)
GSS1	980±60	9.54±0.52 ^a	16.91±0.30 ^a
GSS2	810±30	9.33±0.46 ^a	16.98±0.24 ^a
ST10	860±90	8.19±0.91	16.29±0.23
SAAT10	645±95	7.80±0.55	16.59±0.31
KY1540		7.45±0.61	18.24±0.25

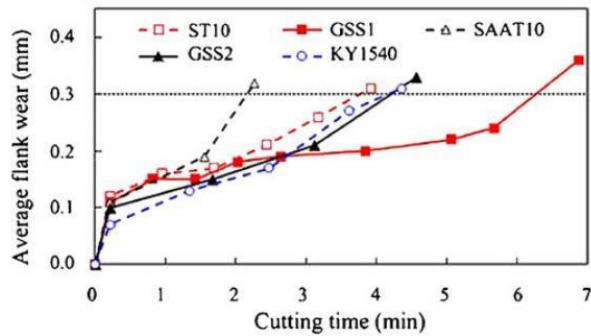
Lo stato di usura degli utensili è stato misurato periodicamente ed il test è stato fatto su diverse velocità di taglio (80,120, 200 m/min).

I ceramici multistrato FMG hanno esibito prestazioni migliori rispetto al resto dei campioni, soprattutto a basse velocità di taglio, 80 e 120 m/min.

La durata dell'utensile SAAT10 ha evidenziato un'usura più veloce rispetto al resto, a causa della sua bassa resistenza alla flessione e alla frattura.

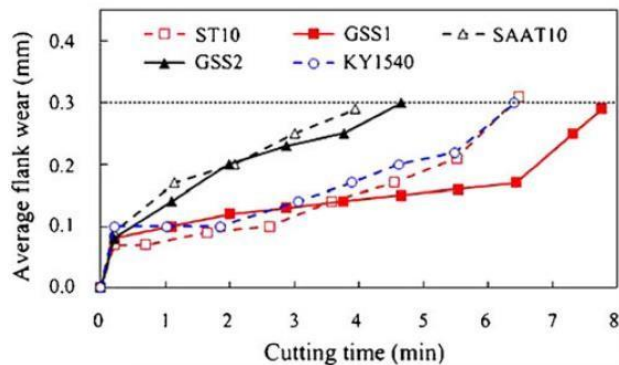
L'esperimento ha dimostrato che la vita utile dell'utensile è principalmente influenzata dalla velocità di taglio.

Grafico usura- tempo a velocità di taglio 80 m/min:



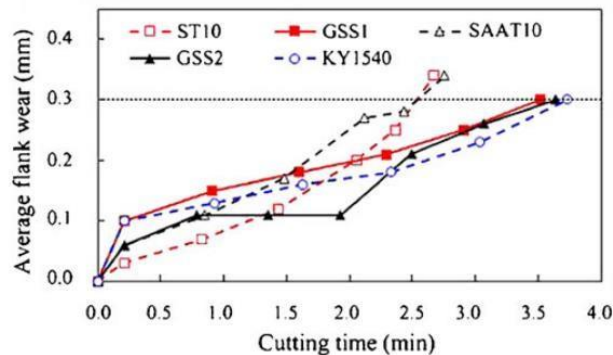
Come si può notare gli strumenti in ceramica non sono adatti per le lavorazioni di una superlega a basse velocità di taglio. Il tempo di taglio è breve e l'usura è elevata.

Grafico usura-tempo a velocità di taglio 120 m/min:



L'aumento della velocità di taglio ha causato un innalzamento della temperatura sulla superficie utensile-pezzo. Finché la temperatura non subisce un forte incremento la durata della vita dell'utensile risulta migliorata. Attenzione però, maggior velocità di taglio con conseguente aumento della temperatura non significa minor usura.

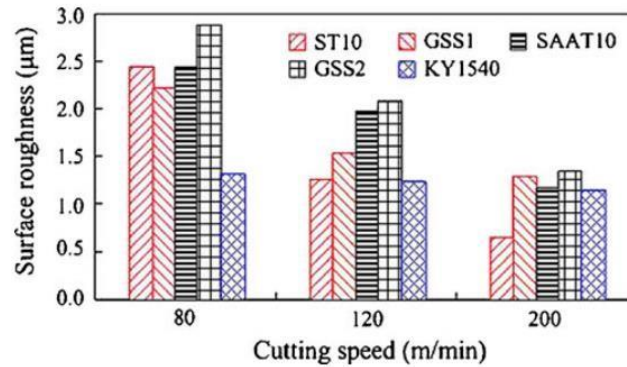
Infatti dal grafico che segue, per velocità pari a 200 m/min la vita utile dell'utensile cala drasticamente.



La rugosità superficiale è uno dei parametri per valutare l'accuratezza del prodotto finito e della lavorazione in generale. E' noto come questo parametro sia correlato all'usura, alla resistenza alla fatica e alle proprietà meccaniche dell'utensile.

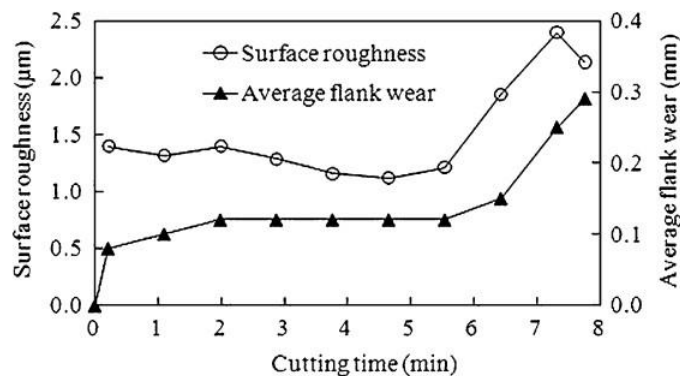
La velocità di taglio è uno dei principali fattori che influenza la finitura superficiale.

La figura mostra la relazione tra rugosità e velocità di taglio.



Come è facilmente intuibile dal grafico, all'aumentare della velocità di taglio la rugosità diminuisce, questo vale per tutti i tipi del materiale usati per produrre gli utensili in questione.

Dal grafico che segue :



L'usura dell'utensile ha conseguenze importanti per la rugosità superficiale.

Nella fase iniziale del taglio si nota come la rugosità superficiale sia maggiore rispetto a quella nella fase centrale. Questa situazione è da attribuire alle sbavature e ai fattori instabili (micro-fessure) presenti sulla superficie dello strumento.

Nella fase centrale il processo è ben avviato, le forze in gioco si stabilizzano e non è presente il rischio di problemi o di urti improvvisi.

In fase finale, l'usura del fianco causa un incremento della rugosità e delle forze di taglio.

Possiamo concludere affermando che gli utensili da taglio multistrato hanno una durata maggiore rispetto ai suoi concorrenti, dovuta ai meccanismi di rafforzamento impiegati nella loro produzione.

Il fattore principale della loro resistenza sono essenzialmente le tensioni indotte durante la fase di realizzazione dell'utensile, dovute alla stratificazione di diversi materiali con diverso coefficiente di dilatazione.

I meccanismi d'usura più frequenti sono l'usura adesiva e l'usura abrasiva, alte velocità di taglio portano a una minore usura e quindi a una più bassa rugosità superficiale sul pezzo.

4.3 SiAlON-TiCN

Una delle soluzioni adottate per aumentare le proprietà meccaniche degli utensili SiAlON è quella di rivestire con un film di TiCN le superfici dello strumento da taglio.

Rispetto agli inserti SiAlON, un utensile rivestito presenta una miglior durezza superficiale, con relativi vantaggi in fase di lavoro.

Al momento, le lavorazioni con utensili da taglio in ceramico delle superleghe sono le più diffuse, soprattutto per quanto riguarda il settore aerospaziale, i campi medici e i settori d'élite. Gli utensili in SiAlON sembrano essere predisposti per questo tipo di lavorazioni, grazie alle loro elevate proprietà meccaniche uniche: elevata durezza, resistenza alla frattura ed elevata tenacità.

Durante il processo di tornitura che si esegue ad alta velocità e a secco, l'elevata temperatura che si genera causerà ossidazione, dissoluzione chimica e usura del materiale.

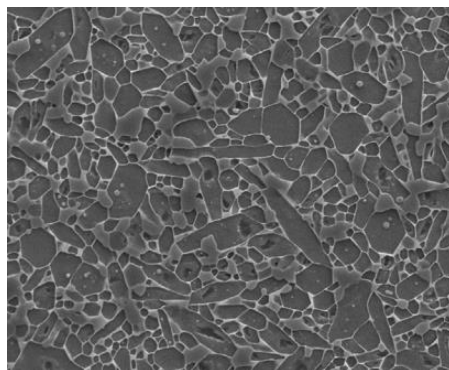
Si è pensato quindi, di rivestire lo strato superficiale dell'utensile con un rivestimento di un materiale duro e resistente all'abrasione, in modo da proteggere e aumentare la resistenza dell'inserto.

Un potenziale materiale di rivestimento è il carbonitruro di titanio. Quest'ultimo è un materiale con elevata durezza che presumibilmente renderà l'utensile resistente all'usura.

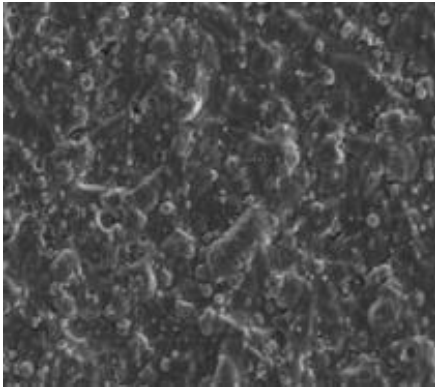
Al giorno d'oggi, il rivestimento è depositato sull'utensile tramite la tecnica physical vapour deposition (PVD).

La figura, mostra la morfologia degli utensili SiAlON. Si nota la presenza, in maggioranza di grani allungati (β -SiAlON), che sono utili a migliorare la tenacità e la resistenza alla rottura.

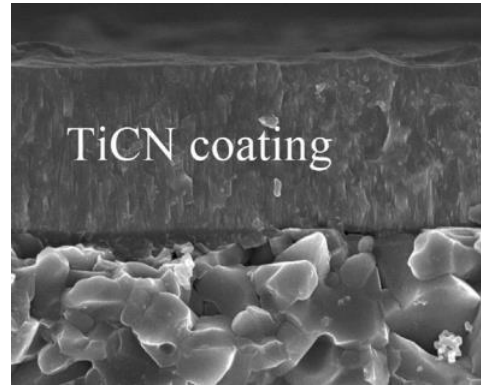
Pertanto questa tipologia di utensili hanno elevate proprietà meccaniche.



Le figure sottostanti illustrano la morfologia e la sezione trasversale del rivestimento TiCN applicato.



Superficie del rivestimento



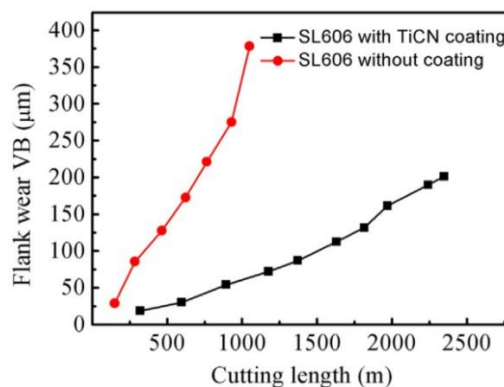
Sezione trasversale del rivestimento

Come si può vedere, la superficie del rivestimento non è liscia, al contrario mostra quasi una andatura ondeggiante. Dalla figura che rappresenta la sezione trasversale, si intuisce come la microstruttura del rivestimento ha una forma colonnare. E' una delle caratteristiche principali della deposizione con la tecnica PVD. Lo spessore del rivestimento è di $4\mu\text{m}$.

Eseguiti i primi test, si può subito affermare che la durezza superficiale dell'utensile rivestito è di gran lunga maggiore rispetto all'utensile SiAlON. Inoltre, è stato verificato che il film di rivestimento ha ottime proprietà adesive con il materiale matrice, contribuendo così a creare un utensile da taglio dalle proprietà elevate.

4.3.1 Studio dell'usura degli utensili rivestiti SiAlON-TiCN

L'analisi dell'utensile post lavorazione ha evidenziato diversi aspetti di notevole importanza. Mettiamo a confronto due tipi di utensili differenti. Un utensile SiAlON e un utensile rivestito SiAlON-TiCN.



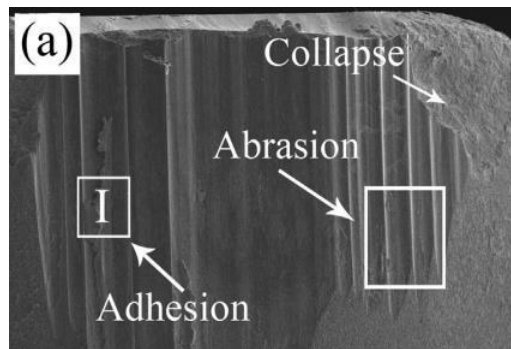
La figura mette in relazione l'usura del fianco con la lunghezza di taglio.

Si osserva che l'usura dell'utensile non rivestito aumenta in maniera esponenziale all'aumentare della lunghezza di taglio. Quando la lunghezza di taglio è 1000 m, l'usura dell'utensile è già pari a $375\mu\text{m}$. Il valore limite è $300\mu\text{m}$, quindi l'utensile deve essere cambiato.

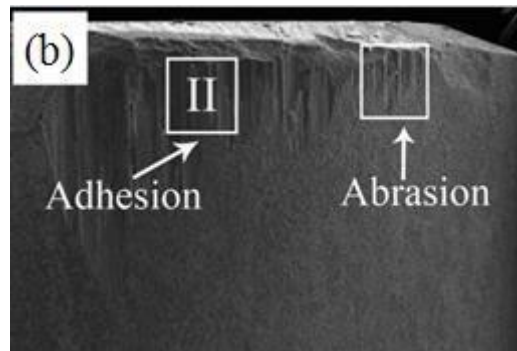
Diversa è la situazione per l'utensile rivestito, l'usura procede molto lentamente ed è chiaro che la vita utile è quasi raddoppiata.

Si può attribuire tutto ciò, alla maggior resistenza all'usura e all'elevata durezza del rivestimento conferitogli dal TiCN.

Sappiamo anche che i principali meccanismi di rottura di un utensile SiAlON sono causati dall'usura abrasiva sul fianco e dalla rottura degli smussi dell'utensile.



Come mostrato in fig(a), si notano chiaramente i segni dell'abrasione sul fianco e la rottura dell'angolo. Ciò che è da sottolineare è il fenomeno dell'adesione di particelle di materiale lavorato sul fianco dell'utensile. La ragione di questo fenomeno è la dissoluzione chimica che si presenta durante la lavorazione quando si raggiungono le alte temperature. L'usura adesiva gioca un ruolo fondamentale nella rottura degli utensili non rivestiti.



La fig(b) mostra l'usura dell'utensile rivestito con TiCN.

La zona dove si verifica l'usura per abrasione è molto più ridotta rispetto alla precedente, sta a confermare che gli utensili rivestiti presentano una resistenza all'usura maggiore. Bisogna comunque dire che l'usura dell'utensile resta una delle cause principali che porta la rottura dello strumento.

Possiamo quindi concludere con assoluta certezza che il rivestimento in TiCN aumenta di gran lunga le proprietà meccaniche del materiale, conferendogli elevata durezza aumentandone la resistenza.

In un mercato dove si prediligono le lavorazioni continue di materiali sempre più difficili da lavorare, questo tipo di utensile sembra essere il più adatto sia per prestazioni che per facilità di produzione.

4.4 Lavorazione della ghisa con utensili SiAlON

Le lavorazioni ad alta velocità sono ampiamente eseguite su materiali con elevata durezza, come le superleghe e materiali per stampi, grazie l'impiego di strumenti sempre più efficienti e prestazionali.

Le proprietà meccaniche degli utensili da taglio sono i fattori chiave per garantire una lavorazione ideale. Pertanto, la scelta di un buon inserto con elevate proprietà meccaniche è fondamentale. Negli ultimi anni, lo sviluppo di nuovi inserti ha portato la qualità del prodotto finito a livelli eccellenti. Tuttavia resta il fatto che il problema più grande da affrontare, cioè l'usura dell'utensile, sia il fattore principale e influente durante l'operazione di finitura.

Gli utensili da taglio SiAlON offrono prestazioni migliori rispetto ai più comuni inserti con matrice a base d'allumina. Caratterizzati da una elevata tenacità, alta conducibilità termica, resistenza all'usura e stabilità alle alte temperature sono i candidati ideali per le lavorazioni ad alte velocità della ghisa.

Gli utensili α/β -SiAlON sono composti da una doppia fase α e β che ne conferisce elevata durezza e resistenza alla frattura, sembrerebbe quindi che il tasso d'usura diminuirebbe e la vita utile dello strumento aumentasse.

L'obiettivo è quello di dimostrare che esiste una correlazione tra proprietà meccaniche e forze di taglio. Andremo quindi a testare due utensili da taglio, morfologicamente diversi, per dimostrare quanto detto.

4.4.1 Struttura e proprietà degli utensili SiAlON

La struttura predominante è quella della doppia fase α/β . Le immagini riportano la microstruttura e la composizione dei due campioni, in figura 5 è rappresentata la microstruttura del campione A e in figura 6 il campione B.

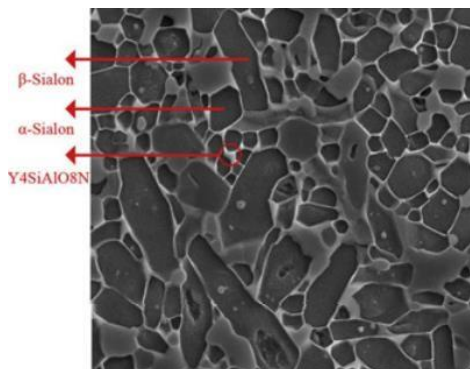


Figura 5-Campione A

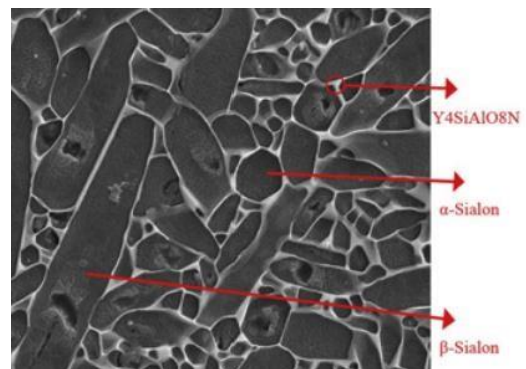


Figura 6-Campione B

Come si può notare le fasi predominanti sono α/β SiAlON. Inoltre viene rilevato a bordo grano Y_4SiAlO_8N , nel campione A è più presente rispetto al suo concorrente.

I grani allungati β -SiAlON sono utili a migliorarne la resistenza a frattura a differenza dei grani equiassiali α -SiAlON che ne aumentano la durezza.

E' intuitivo vedere come nel campione B sia maggiore la presenza di grani allungati e di come quest'ultimi siano più grossi; determina quindi una differenza di proprietà.

La tabella presenta la densità e le proprietà meccaniche dei due campioni.

Inserts	Density (g/cm ³)	Mechanical properties	
		Hardness HV10/GPa	Fracture toughness MPa · m ^{1/2}
Sample A	3.21	16.46 ± 0.23	5.42 ± 0.68
Sample B	3.22	15.60 ± 0.12	6.25 ± 0.41

La densità dei due campioni è molto simile anche se la composizione è differente.

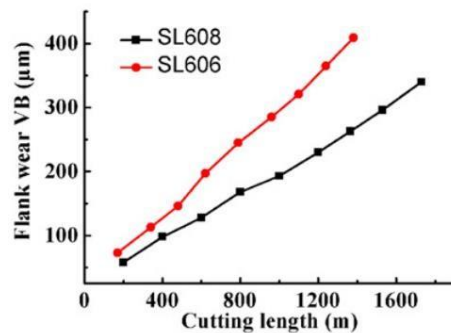
La tabella dimostra ciò quanto affermato prima. Il campione B con prevalente fase β -SiAlON mostra una resistenza alla frattura maggiore rispetto al suo rivale. Per il rovescio della medaglia il campione A, con prevalente fase α -SiAlON, ha una durezza maggiore.

4.4.2 Lavorazione e usura del fianco

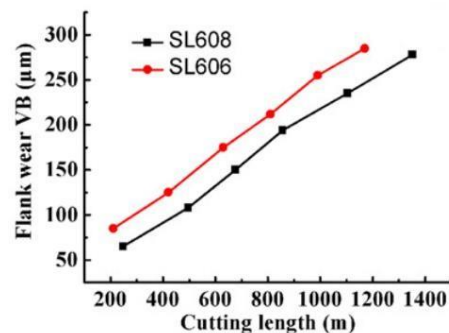
I campioni sono stati testati con una lavorazione di tornitura. Viene lavorata una barra di ghisa grigia ad alte velocità di taglio in condizioni asciutte. Le velocità di taglio sono rispettivamente 300 m/min, 450m/min e 600m/min.

L'inserto è da buttare quando l'usura sul fianco è pari a 500 μ m.

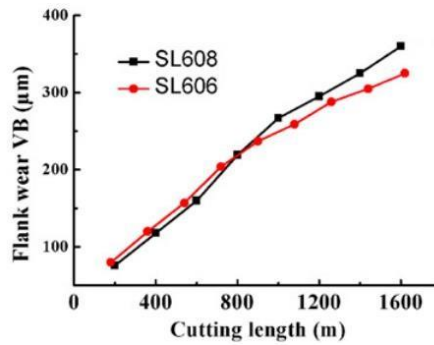
I seguenti diagrammi tracciano l'usura sul fianco in funzione della lunghezza di taglio, per tre diverse velocità di taglio, per il campione A (SL606) e per il campione B (SL608).



Velocità di taglio 300 m/min



Velocità di taglio 450 m/min



Velocità di taglio 600m/min

Alla velocità di 300m/min l'usura del campione A è maggiore rispetto a B. A 450 m/min si può notare come l'utensile A si stia avvicinando sempre più alla linea del suo concorrente. Ciò che stupisce a 600 m/min è di come l'utensile B si usuri più velocemente. In realtà è grazie alla presenza maggiore di fase α -SiAlON nel campione A che gli conferisce elevata durezza, il segreto del minor tasso d'usura alle alte velocità di taglio.

Quindi una fase prevalentemente α -SiAlON può contribuire alla resistenza all'usura, grazie alla durezza che conferisce al materiale.

4.4.3 Analisi della rottura

Una fase prevalentemente α -SiAlON comporta a una diversa metodologia d'usura del fianco. La Figura 7 illustra, come il fianco usurato del campione A, presenta tracce di abrasione leggera. Indica che il meccanismo di usura dominante è principalmente l'abrasione. Inoltre test EDS dimostrano che una piccola quantità di materiale lavorato si trova sulla superficie usurata, ne consegue un'usura di tipo adesiva.

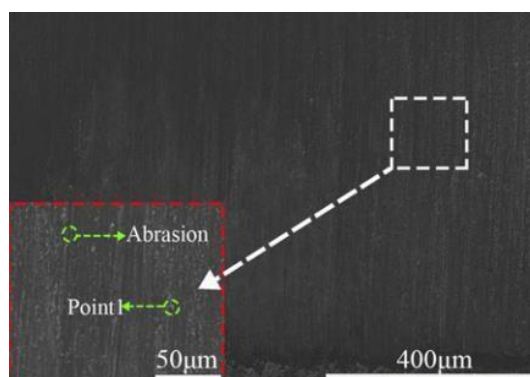


Figura 7

Nel campione B, la situazione cambia. La Figura 8 mostra come la superficie dell'utensile sia altamente consumata e ruvida dopo il processo di taglio.

Una grande quantità di materiale proveniente dal pezzo da lavorare si deposita sul fianco, durante la lavorazione. Si può con certezza affermare che l'usura adesiva sia la principale causa di rottura dell'utensile.

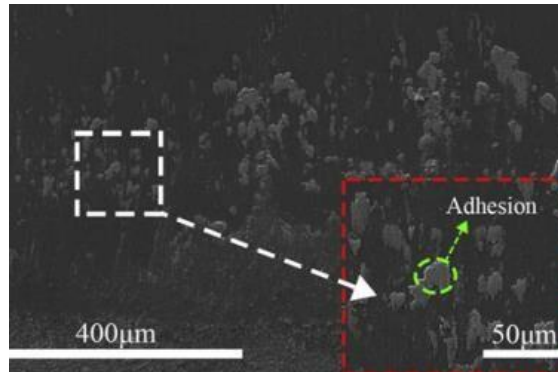


Figura 8

L'analisi cambia quando le velocità di taglio aumentano. L'usura del campione B risulta essere più liscia, (Figura 9), mentre il fianco dell'utensile A, (Figura 10), è molto più ruvido e consumato.

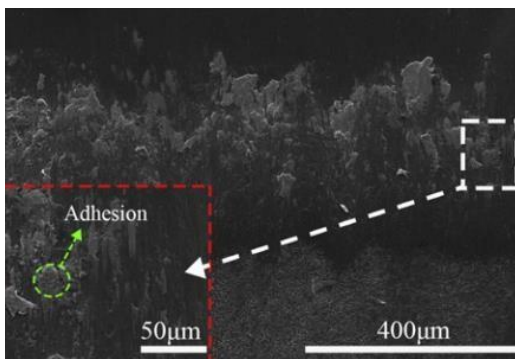


Figura 9

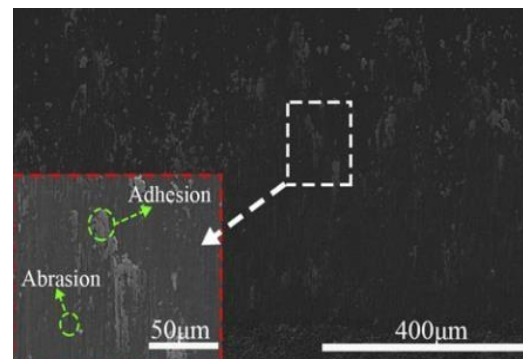


Figura 10

Ovviamente i meccanismi d'usura predominanti sono usura adesiva e usura abrasiva.

Tuttavia l'usura abrasiva che si verifica nel campione B è maggiore rispetto al campione A. Il viceversa vale per l'usura adesiva.

L'incremento della velocità di taglio comporta all'aumento dell'usura adesiva per quanto riguarda il campione A. L'utensile B mostra fin da subito chiari segni d'usura adesiva e abrasiva, la situazione non fa altro che peggiorare quando le velocità di taglio aumentano, soprattutto l'abrasione del fianco ne risulta essere molto aggravata.

Possiamo concludere affermando che non esiste un'unica soluzione al problema, il mercato risulta essere ricco di offerte di diversi tipi di utensili proprio per soddisfare le esigenze dell'operatore.

Quando si lavora un pezzo in ghisa, dobbiamo prima fisare i parametri di taglio che andremmo poi ad utilizzare, abbiamo visto come la velocità di taglio influisce moltissimo sulla vita utile

dell'utensile. Un'elevata usura del fianco può comportare a una cattiva finitura in fase di lavorazione e quindi non soddisfare le esigenze richieste sul prodotto finale.

La scelta dell'utensile resta comunque la soluzione migliore. Abbiamo dimostrato come la differenza di microstruttura di due materiali può influire sulle proprietà meccaniche dell'utensile. L'usura risulta ampiamente influenzata dal tipo di fase che prevale nella struttura. Nella lavorazione della ghisa l'usura adesiva e usura abrasiva sono i meccanismi principali di deterioramento dell'utensile.

4.5 Lavorazione di fresatura con utensili SiAlON

Oggi giorno, il mercato chiede la realizzazione di prodotti sempre più complessi da realizzare. La maggior parte delle aziende si sta modernizzando con l'acquisto di macchinari che possano compiere più operazioni, evitando di perdere tempo prezioso in cambi utensili e spostamenti. Il centro di lavoro, è un macchinario che ci permette di lavorare il pezzo da più angolazioni. E' quindi fondamentale studiare anche il comportamento degli utensili, le forze e i meccanismi d'usura durante la lavorazione di fresatura.

Le lavorazioni ad alta velocità portano a forze di taglio minori, maggior rimozione di materiale e di conseguenza riduzione dei costi e maggior ricavi.

Le superleghe sono materiali ampiamente utilizzati nella componentistica d'élite, grazie alla loro resistenza alla corrosione e alle alte temperature. Tuttavia sono noti per essere materiali difficili da lavorare, a causa della loro resistenza al taglio, alla loro tendenza all'incrudimento e allo loro bassa conducibilità termica.

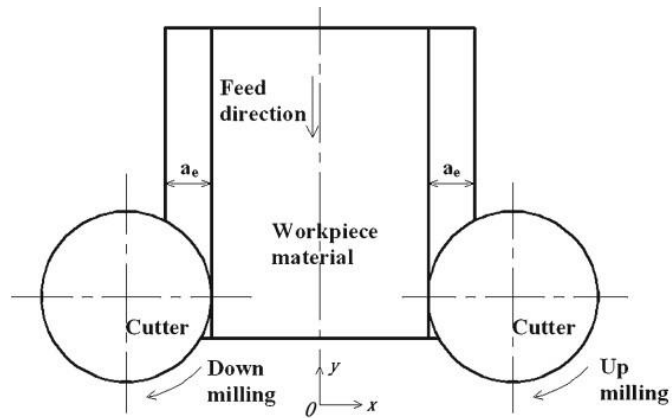
Gli utensili SiAlON hanno una eccellente resistenza agli shock termici, una elevata resistenza alla frattura ed elevata tensione di rottura che li rendono i principali strumenti impiegati per le lavorazioni delle superleghe.

Andremo quindi ad analizzare le forze di taglio che sono coinvolte nella lavorazione, i meccanismi d'usura e le problematiche in fase di fresatura.

4.5.1 Analisi delle forze di taglio

Andiamo a studiare l'effetto del tipo di fresatura, del numero di giri della fresa e il livello d'usura sull'andamento della forza di taglio.

Deve essere prima chiara la differenza tra fresatura concorde e discorde.

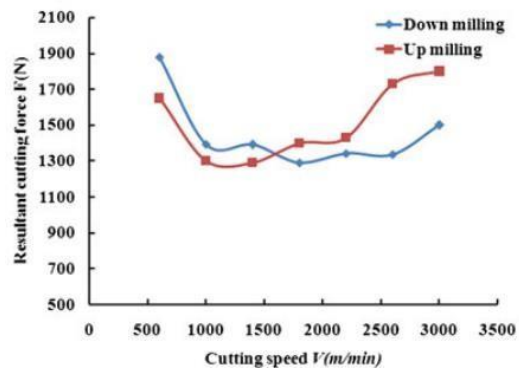


Nella fresatura concorde(down milling), l'utensile avanza nella direzione di rotazione. Ciò che è veramente importante da sottolineare, lo spessore del truciolo diminuisce dall'inizio del taglio, raggiungendo il valore zero alla fine del taglio.

Nella fresatura discorde (up milling) la rotazione della fresa è opposta al suo avanzamento. Lo spessore del truciolo parte da zero fino al valore massimo.

Queste considerazioni ci torneranno utili quando studieremo l'usura del tagliente.

La figura, sottostante ci presenta l'evoluzione della forza di taglio al variare della velocità di taglio.



Si vede come la forza di taglio in un primo momento diminuisce e poi aumenta con la velocità di taglio.

Fino ad una velocità di 1500 m/min, la forza di taglio è maggiore nella fresatura concorde, aumentando la velocità la forza risulta essere più grande nel caso di fresatura discorde.

Gioca un ruolo importante la temperatura d'esercizio. A temperature relativamente basse di lavorazione il materiale mantiene alte le sue proprietà, la durezza in primis.

Elevati sforzi meccanici, durezza del materiale ed elevate forze di taglio contribuiscono all'usura dell'utensile.

Aumentando la velocità e considerando il basso coefficiente di conducibilità termica del materiale in lavorazione, la temperatura nella zona di taglio raggiunge elevati valori che causa una riduzione della resistenza e della durezza del materiale. Questo comporta a un incremento dell'angolo di taglio dell'utensile diminuendo le forze in gioco richieste per la lavorazione.

Nel frattempo gli utensili mantengono inalterate e stabili le loro proprietà ad alte temperature, ne consegue un minor tasso d'usura.

Infine si registra un aumento netto delle forze di taglio quando la velocità supera i 3000 m/min, la causa principale è da attribuire all'elevato tasso d'usura dell'utensile e all'improvviso decadimento delle proprietà meccaniche.

4.5.2 Usura dell'utensile

I meccanismi principali dell'usura dell'utensile sono lo sfaldamento e la scheggiatura.

All'aumentare delle velocità di taglio lo sfaldamento tende a diminuire. E' evidente che lo sfaldamento in situazione di fresatura discorde è più grave.

Per quanto riguarda il fianco dell'utensile, si registra che all'incremento delle velocità di taglio l'usura complessiva aumenta portando lo strumento alla rottura.

In generale, l'usura del fianco risulta essere maggiore nella fresatura concorde.

Quando le velocità di taglio sono basse la temperatura sviluppata durante la lavorazione ha poca influenza sul livello d'usura. Ma gli sforzi meccanici e l'elevata forza di taglio causano sul fianco dell'utensile intagli e rotture.

Perciò non è consigliato effettuare lavorazioni al di sotto dei 1000 m/min.

All'aumentare della velocità di taglio, si innalza anche la temperatura rendendo il materiale meno duro e più facile da lavorare. Il livello d'usura diminuisce e lo sfaldamento e la scheggiatura sono meno critici. Ciò che gioca un ruolo fondamentale è l'adesione di micro-particelle di materiale lavorato sul fianco dell'utensile.

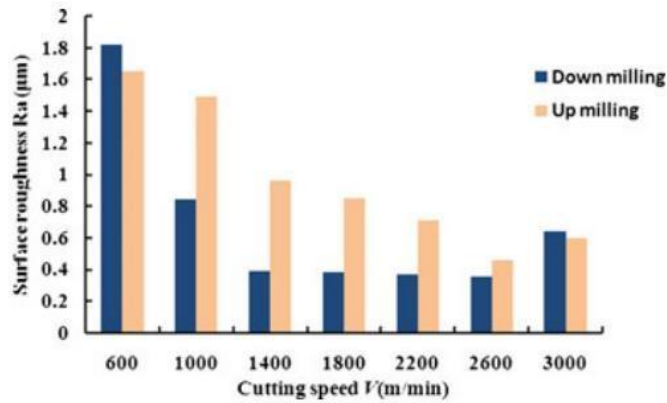
Durante la lavorazione con il metodo della fresatura concorde, lo spessore del truciolo e le forze di taglio, diminuiscono dal valore massimo a zero provocando fin da subito tensioni meccaniche. A causa delle proprietà del materiale e dalle forze in gioco si può affermare con certezza che la fresatura discorde registra il tasso maggiore d'usura dell'utensile.

4.5.3 Rugosità superficiale

La rugosità superficiale influenza molto la resistenza alla corrosione e la resistenza al creep e ne determina la durata dei componenti realizzati. Perciò può dare un giudizio sulle prestazioni in fase d'esercizio.

La figura confronta la rugosità superficiale a diverse velocità di taglio.

Essenzialmente si può notare come la rugosità tenda a diminuire all'aumentare delle velocità di taglio, fatta eccezione per 3000m/min.



Quando le velocità di taglio sono basse, l'usura dell'utensile porta a una superficie molto rugosa. Alle maggiori velocità di taglio, la temperatura provoca un rammollimento del materiale, ne risulta una lavorazione più delicata che porta benefici alla finitura superficiale. Come illustrato dalla figura, la rugosità superficiale è minore nel caso della fresatura concorde. Nella fresatura discorde, il truciolo aumenta di spessore partendo da zero, quando l'utensile entra in contatto con il pezzo, al valore massimo, quando l'utensile lascia il pezzo. In questa fase c'è lo scorrimento e sfregamento tra i componenti in esercizio e la superficie lavorata, provocando un effetto di incrudimento del materiale responsabile di una cattiva finitura superficiale.

Al contrario, nella fresatura concorde il truciolo passa da dimensione massima a zero al termine del taglio, nessun fenomeno di indurimento del materiale avviene e la rugosità ha valori bassi. A 3000 m/min è interessante vedere come le alte temperature raggiunte in fase di lavorazione portano a un decadimento delle proprietà meccaniche. Possiamo pensare quindi che la finitura superficiale sia anche influenzata dalle temperature oltre alla causa principale che è l'usura dell'utensile.

CAPITOLO 5

Utensili rinforzati con whisker

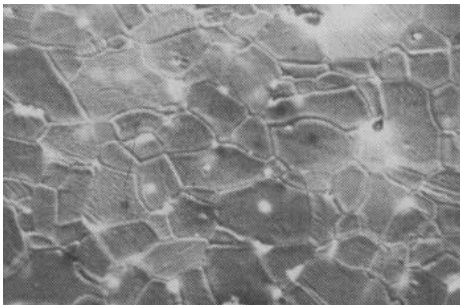
5.1 Utensili whisker $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$

L'impiego di utensili con matrice a base d'allumina è stato largamente discusso nei capitoli precedenti. Gli innumerevoli vantaggi degli utensili in materiale ceramico, li hanno resi strumenti ampiamente utilizzati nelle lavorazioni moderne. Grazie alle loro proprietà fisiche e meccaniche: alta resistenza all'usura, resistenza alla deformazione termica e all'inerzia chimica; sono preferiti ai classici utensili da taglio in acciaio. Tuttavia, alcune proprietà possono essere ancora migliorate.

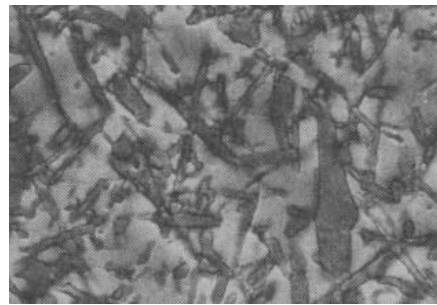
Utensili rafforzati con whisker offrono un'ottima combinazione di resistenza alla frattura e all'usura, che li rendono interessanti nell'impiego di applicazioni moderne.

Gli utensili rinforzati con whisker di carburo di silicio sono composti da una matrice di partenza di Al_2O_3 e dal 30-40% in vol. di whisker di SiC ; è possibile trovare degli additivi aggiunti in fase di preparazione del composito per favorire la densificazione.

La durezza, la resistenza alla frattura e la resistenza agli shock termici sono tutte proprietà che risultano migliorate se messe a confronto con gli utensili commerciali con matrice a base d'allumina.



Microstruttura Al_2O_3



Microstruttura Al_2O_3 rinforzato con whisker SiC

5.1.1 Lavorazione delle superleghe con utensili rinforzati con whisker

Utensili rinforzati con whisker hanno dimostrato un ottimo comportamento durante le lavorazioni di superleghe.

In un utensile rinforzato l'usura deve avvenire in modo graduato evitando collassi improvvisi.

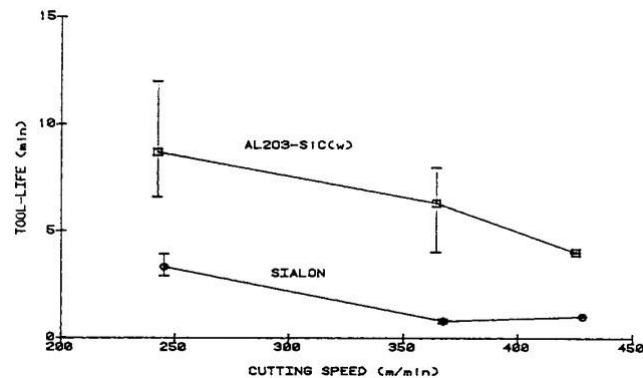
Con una lavorazione di tornitura, sono messi a confronto tre tipi di utensile: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$,

SiAlON , Al_2O_3 rinforzato con whisker di carburo di silicio.

Mantenendo i parametri della macchina costanti si è visto come l'utensile rinforzato registri una vita utile nettamente superiore agli altri.

L'utensile $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ pur avendo una buona resistenza all'usura, presenta purtroppo un'insufficiente tenacità alla frattura che lo esclude in primis come materiale per le lavorazioni di superleghe.

Se pur già largamente discusso nei capitoli precedenti di come gli SiAlON sono ampiamente utilizzati per il taglio di superleghe, gli utensili rinforzati con whisker sembrano presentare resistenza maggiore all'usura.



Il grafico qua sopra riporta la vita utile dell'utensile in funzione della velocità di taglio.

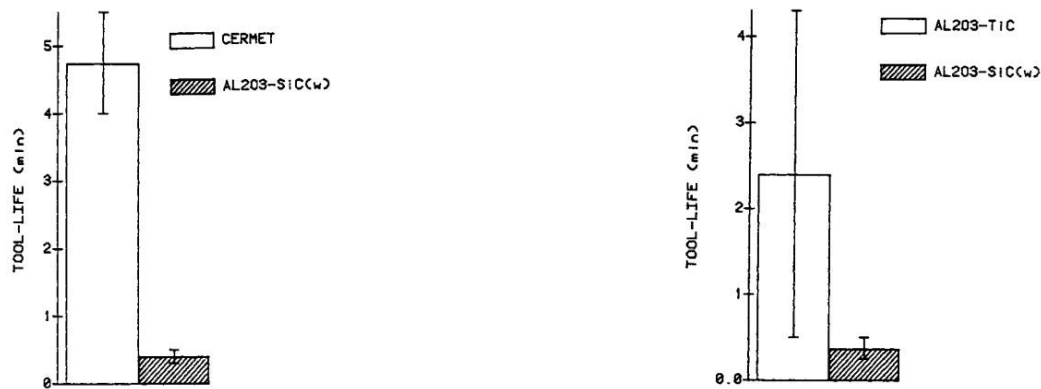
Alle alte velocità l'utensile rinforzato con whisker presenta una durata di vita utile più lunga rispetto al suo principale concorrente.

I risultati ottenuti ci fanno riflettere sull'obiettivo finale: la finitura del pezzo che influisce sulle prestazioni del componente in fase d'esercizio.

Il minor tasso d'usura e la vita utile che risulta quasi raddoppiata rispetto al suo rivale, ne fa dell'utensile whisker $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$ una valida alternativa ai più comuni SiAlON.

5.1.2 Lavorazione dell'acciaio con utensili rinforzati con whisker

Bisogna fare delle importanti considerazioni per quanto riguarda le lavorazioni dell'acciaio. Se fino ad ora abbiamo lodato gli utensili rinforzati con whisker, dobbiamo anche tenere in considerazione le pessime prestazioni che si registrano quando i materiali lavorati sono acciai o leghe ferrose.



I due grafici mettono a confronto due tipi di utensile con un utensile whisker Al_2O_3 -SiC.

E' facilmete intuibile come l'utensile rinforzato non sia adatto per la lavorazione degli acciai. Il tasso d'usura è elevatissimo ne consegue una vita utile bassissima.

Possiamo quindi escludere definitivamente l'impiego degli utensili rinforzati con whisker per le lavorazioni d'acciai, visto la loro più totale inefficienza.

5.2 Utensili rinforzati con whisker e nanoparticelle di SiC

Negli ultimi decenni si son studiati diversi metodi per incrementare le proprietà degli utensili aggiungendo differenti tipi di materiale in fase di preparazione del composito.

Utensili in ceramico hanno dimostrato di essere una valida alternativa ai più comuni utensili in acciaio, grazie alle loro proprietà di resistenza all'usura e all'ottimo comportamento alle alte temperature.

Tra i principali utensili che abbiamo visto risaltano gli utensili con matrice a base d'allumina rinforzati con nanoparticelle, ceramico innovativo, SiAlON e gli utensili rinforzati con whisker. Tutti questi tipi di utensili offrono già ottime qualità ma la continua evoluzione del mercato ci obbliga a sperimentare nuove tecniche di rafforzamento.

In questo paragrafo parleremo degli effetti sulle proprietà meccaniche dell'aggiunta di nanoparticelle e whisker in utensili con matrice a base di Al_2O_3 .

Numerosi studi sono stati condotti e hanno dimostrato un aumento delle proprietà dovute all'aggiunta di additivi, di diversa granulometria, in fase di preparazione del composito.

Il rinforzo della matrice con whisker di SiC, che non è altro che una fibra con alto modulo di elasticità e alta resistenza a trazione, comporta a un aumento della durata della vita dell'utensile, soprattutto nelle lavorazioni ad alte velocità di taglio.

Recenti studi hanno portato alla creazione di utensili rinforzati con nanoparticelle e whisker di SiC nella medesima matrice di Al_2O_3 .

Le nanoparticelle e i whisker sono stati aggiunti alla matrice attraverso un metodo di dispersione e miscelazione per poi essere sinterizzati mediante pressatura a caldo.

Si parte da una base di Al_2O_3 pura al 99% e con granulometria media pari a $0.5\mu\text{m}$.

Le nanoparticelle di SiC hanno una densità pari a 3.21 g/cm^3 e la dimensione della particella è pari 50nm . I whisker di SiC hanno un diametro che va dai $200\text{-}500\text{ nm}$ e una lunghezza pari a $10\text{-}50\mu\text{m}$.

L'operazione è abbastanza complessa, bisogna prestare particolare attenzione a disperdere bene gli elementi aggiunti per densificare al meglio il prodotto finale.

Nello studio che andremo affrontare sono stati creati tre diversi tipi di compositi, con differenti quantità di elementi nella loro composizione.

La tabella mette in evidenza le diverse quantità di elementi nei diversi campioni.

Composite	Al_2O_3	SiC_w	SiC_{np}	Y_2O_3	MgO
AW25	74	25	0	0.5	0.5
AP25	74	0	25	0.5	0.5
AW20P5	74	20	5	0.5	0.5

La microstruttura vista al microscopio del composito AW20P5 si presenta così:

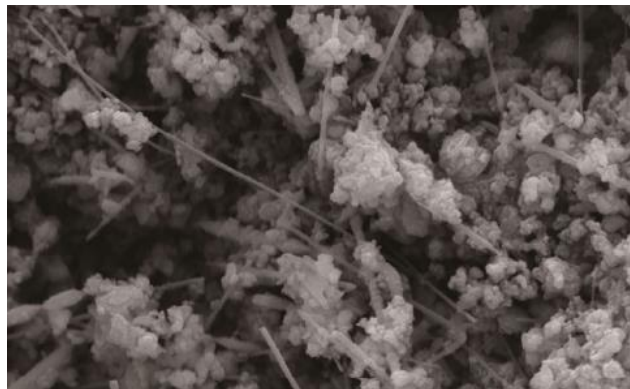
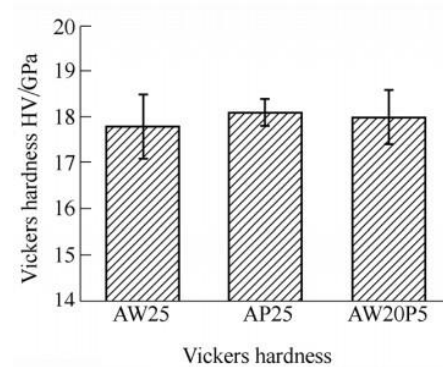
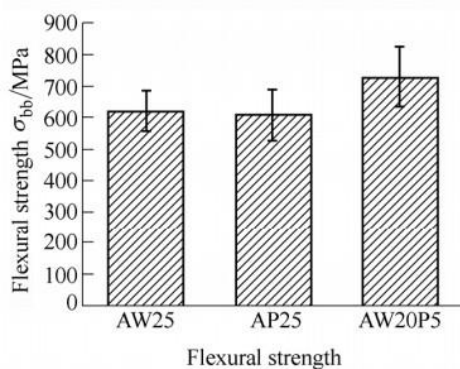
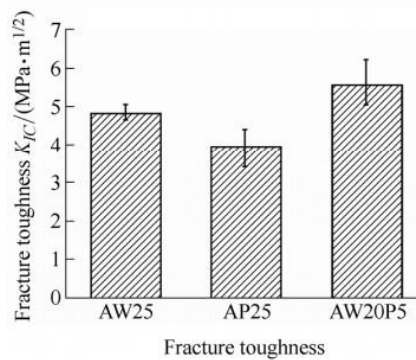


figura 1

Le proprietà meccaniche si possono discutere grazie ai diagrammi tracciati.





Dal diagramma della resistenza a flessione notiamo che non c'è grande differenza tra l'utensile AW25 e AP25. Invece l'utensile AW20P5 che contiene sia whisker e nanoparticelle di SiC risulta essere il più resistente.

La situazione si presenta analoga nel diagramma della resistenza alla frattura. AW20P5 è ancora il migliore, seguito da AW25 che è rinforzato solo con whisker.

Nel diagramma della durezza Vickers l'utensile più duro risulta essere quello rinforzato solamente con nanoparticelle di SiC. La durezza elevata è da attribuire alla grana fine e a una microstruttura più densa.

E' intuibile anche come una matrice rinforzata solo con whisker, a causa delle fibre grosse e la minor densità non risulta particolarmente dura.

Infatti basta confrontare con AW20P5, la durezza risulta migliorata con l'introduzione di nanoparticelle di SiC.

La figura 1, rappresenta la microstruttura del composito rinforzato con whisker e nanoparticelle. L'introduzione delle nanoparticelle contribuisce a omogeneizzare e a densificare la struttura; implica maggiore durezza. L'aumento della resistenza alla frattura e alla flessione è da attribuire alle fibre di SiC.

5.3 Prestazioni alle alte temperature degli utensili rinforzati con whisker e nanoparticelle di SiC

Negli ultimi anni, lo sviluppo di utensili da taglio in materiale ceramico ha portato a un rapido progresso per quanto riguarda il comportamento alle alte temperature.

Dai paragrafi precedenti ci risulta come i materiali rinforzati con whisker e nanoparticelle abbiano buone proprietà a temperatura ambiente.

Durante le lavorazioni ad alta velocità, gli strumenti lavorano ad elevate temperature e le proprietà meccaniche degli utensili risultano fondamentali sulle prestazioni.

Alle alte temperature le proprietà possono subire delle modifiche a causa della variazione della microstruttura o del comportamento dei materiali usati come rinforzi.

Di conseguenza è necessario studiare l'influenza dell'innalzamento della temperatura sulla resistenza e sulla durezza.

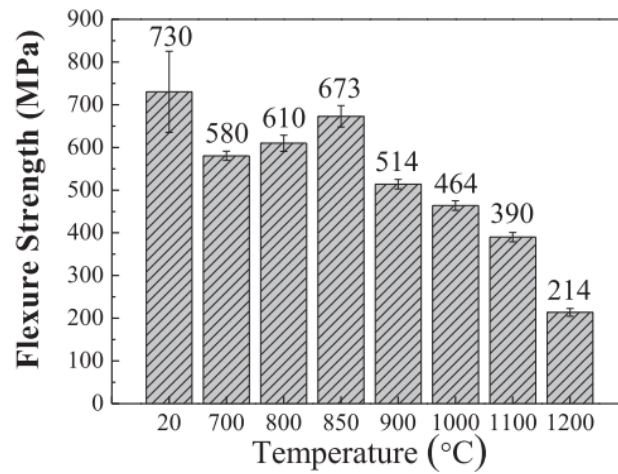
Il materiale preso in esame è AW20P5 del paragrafo precedente.

Nella tabella riassumiamo la composizione:

Material	Al ₂ O ₃	SiC _w	SiC _{np}	Others
AW20P5	74	20	5	1

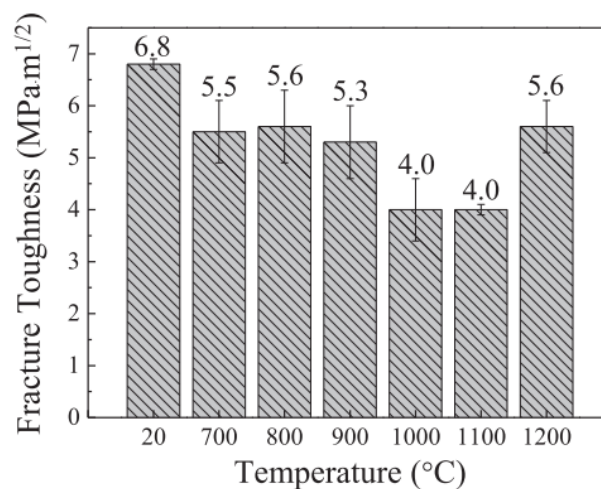
Il metodo utilizzato per calcolare la resistenza a flessione del provino a più temperature è il test di flessione a tre punti.

Il diagramma che segue indica la resistenza a flessione del provino a diverse temperature.



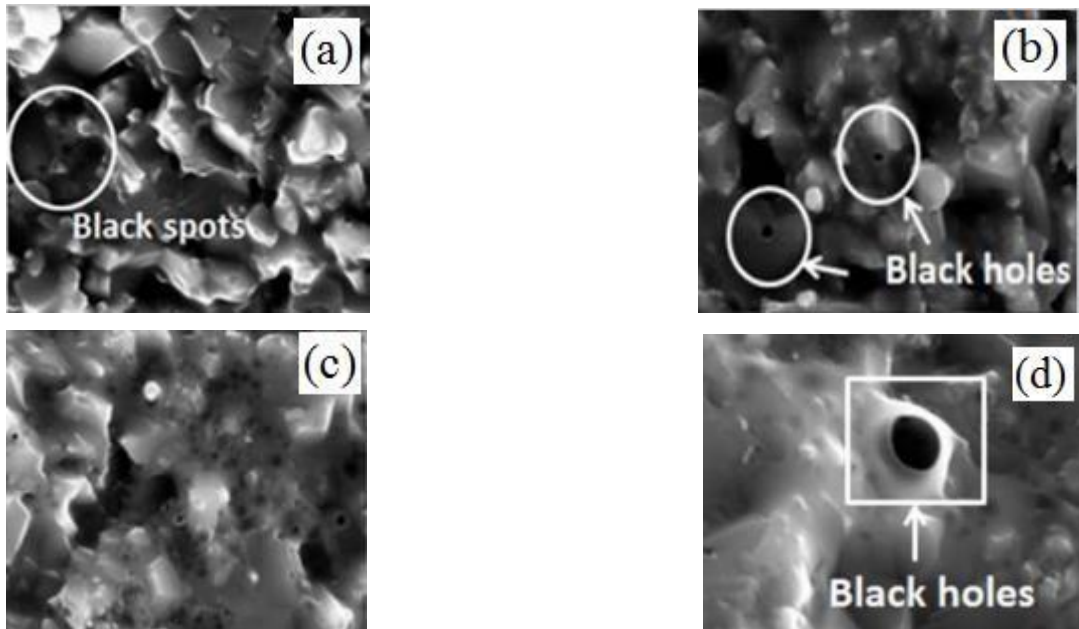
A temperatura ambiente si registra la massima resistenza. All'aumentare della temperatura si registra una diminuzione. Intorno ai 850°C si ha il picco massimo di resistenza per quanto riguarda le temperature d'esercizio.

I medesimi test sono stati effettuati per vedere l'andamento della resistenza alla frattura.



Con l'innalzamento della temperatura la resistenza alla frattura diminuisce. A una temperatura pari a 1200°C si ha un improvviso aumento causato dalla manifestazione di evidente plasticità nel materiale.

Si è studiato come il SiC sia il responsabile del decadimento delle proprietà meccaniche alle alte temperature. La temperatura di ossidazione del SiC è relativa alla sua granulometria. Più piccolo è il grano, maggiore è l'attività superficiale e più bassa è la temperatura d'ossidazione. A una temperatura di 900°C il SiC ossidato interagisce con l'allumina dando forma alla mullite. A 1200°C l'ossidazione del carburo di silicio è in forma predominante attaccando la microstruttura di base.



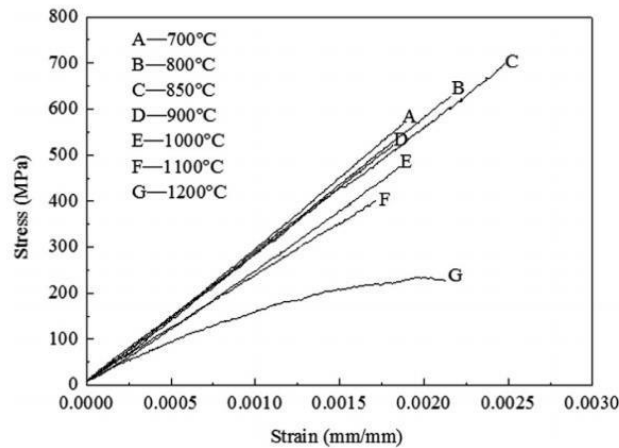
In figura (a), alla temperatura di 900°C una piccola quantità di macchie nere inizia a manifestarsi nella microstruttura. Con l'innalzamento della temperatura, come mostra la figura(c), a 1100°C la presenza di queste macchie nere aumenta portandole ad assumere la forma di veri e propri buchi. La ragione della formazione di queste macchie che poi collassano in buchi, è il monossido di carbonio che tende a uscire sulla superficie dopo la reazione di ossidazione del carburo di silicio.

La formazione di mullite, che ha inizio a 900°C, favorisce la nascita di tensioni residue di compressione, a causa del suo basso valore di dilatazione termico.

Tuttavia i pori che si generano, diminuiscono la resistenza della struttura cosicché da indurre uno stato tensionale che provoca un degrado delle proprietà meccaniche.

Dai diagrammi precedenti, dove si mette in relazione le proprietà con la temperatura si nota che dopo i 900°C si verifica il decadimento delle caratteristiche dello strumento.

Le curve sforzo-allungamento ottenute a diverse temperature, mostrano che il modulo d'elasticità diminuisce con l'aumentare della temperatura. E' proprio la diminuzione del modulo d'elasticità che ha portato alla diminuzione della resistenza a flessione.



Dai 700°C-1100°C il materiale ha mostrato un'elevata fragilità perché le curve sono quasi linee rette. A 1200°C il campione ha mostrato evidenti segni di plasticità.

A 1200°C inoltre si è registrato un aumento anomalo della resistenza alla frattura, questo fenomeno è da implicare alla diminuzione degli stress meccanici dovuti allo scorrimento più facilitato tra superficie e grano.

5.4 Analisi danni superficiali di una superlega lavorata con utensili rinforzati con whisker

Abbiamo più volte sottolineato la difficoltà di lavorare materiali duri come superleghe a causa delle temperature elevate di taglio e il livello di resistenza che presentano in fase di lavorazione. Le proprietà fisiche e meccaniche forniscono dati essenziali per la progettazione ingegneristica poiché le caratteristiche superficiali possono influenzare il rendimento in fase d'esercizio del componente realizzato.

L'impiego principale di questo tipo di materiale sono la costruzione di componenti impiegati nel settore aerospaziale, campo medico e altri settori d'élite; i requisiti minimi sono una elevata resistenza alla fatica e al creep.

Per questo motivo la superficie post lavorazione deve essere priva di danni o difetti.

Negli anni passati si aveva la tendenza ad affrontare la lavorazione con utensili in acciaio, l'usura rapida dell'utensile, le basse velocità di taglio, la bassa produttività e gli elevati costi hanno saggiamente spostato l'attenzione a soluzioni alternative. L'impiego di utensili ceramici rinforzati con whisker sicuramente rispettano i requisiti dell'attuale mercato, bassi costi, velocità ed efficienza produttiva. Andremo quindi a studiare le conseguenze sulle proprietà fisiche, meccaniche e superficiali dovute all'impiego di questo tipo di utensili su una superlega base Nichel.

La superlega che useremo per lo studio è una Inconel 718, base nichel rafforzata da carburi di niobio e titanio.

Andremo ad analizzare le proprietà superficiali del pezzo finito dopo esser stato lavorato con tre tipologie di utensile, nuovo, medio usurato e usurato in condizioni di lavorazione a secco e con l'impiego di lubrorefrigerante.

5.4.1 Osservazioni generali sulle superfici lavorate

Dopo le operazioni di tornitura sulla superficie del pezzo si presenta una buona finitura superficiale, ma una attenta analisi al microscopio evidenzia dei danni relativi alla struttura. Possiamo distinguerli in due grandi famiglie: difetti in scala grande e in scala piccola.

Un difetto può essere causato da un processo di taglio instabile, ad esempio quando si verifica una frequenza di vibrazioni.

Si catalogano come difetti di grande scala tutti quelle anomalie grossolane visibili sulla superficie, invece le micro-fratture, rottura dei carburi e deformazione dei grani sono i difetti in scala piccola.

Dopo la lavorazione sulla superficie del pezzo si presentano diversi tipi di difetti, che variano a seconda dei parametri di taglio e dell'usura dell'utensile.

La formazione del truciolo può talvolta creare dei danneggiamenti superficiali quando c'è un continuo sfregamento tra utensile-pezzo.

In generale si è registrato uno stato di deterioramento sulla superfici prodotte da un utensile in evidente stato avanzato d'usura, indipendente dai parametri di taglio.

Inoltre sembrerebbe che una lavorazione a secco porti una maggiore rugosità sulla superficie del pezzo. Infatti la combinazione peggiore è utensile usurato e lavorazione a secco, a causa dell'innalzamento della temperatura l'utensile si usura più facilmente e la lavorazione risulta pessima.

Per quanto riguarda le micro-fratture e le deformazione dei grani dei carburi, la situazione peggiore si ha con la lavorazione a basse velocità di taglio, piccoli avanzamenti con l'impiego di lubrorefrigerante.

5.4.2 Effetto dei parametri di taglio

I parametri di taglio: velocità di taglio, velocità d'avanzamento, profondità di passata, influiscono moltissimo sul risultato finale.

La scelta di adoperare un utensile nuovo con impiego di lubrorefrigerante a basse velocità di taglio scaturisce una cattiva finitura superficiale.

La formazione del tagliente di riporto e il deposito di particelle di materiale lavorato tendono essere maggiori quando si scelgono basse velocità d'avanzamento.

La forte tendenza del tagliente di riporto di formarsi a basse velocità è data principalmente dall'aumento di deformazione plastica nella zona di interfaccia pezzo-utensile.

La soluzione a questo problema è cercare di aumentare la temperatura rendendo il materiale più viscoso e quindi facile da lavorare.

Di conseguenza bisogna studiare ogni parametro, aumentare la velocità di taglio è la scelta ideale.

A causa della scarsa conducibilità delle superleghe, durante la lavorazione si possono raggiungere elevate temperature, 800-1100°C.

Il liquido refrigerante gioca un ruolo fondamentale nel determinare la qualità del pezzo finito.

In generale le lavorazioni con l'impiego del lubrorefrigerante ad alte velocità di taglio sembrerebbero risultare migliori rispetto a lavorazioni a secco, dipende sempre e comunque anche dall'usura dell'utensile.

5.4.3 Conclusioni

Il vantaggio di utilizzare utensili whisker è la possibilità di raggiungere velocità di taglio più elevate rispetto ai più comuni utensili in carburo cementato.

Tuttavia raggiungere un buon livello di finitura per quanto riguarda le superleghe base Nichel rimane impegnativo.

Un'ampia gamma di difetti possono essere riscontrati sulla superficie del pezzo dopo la lavorazione, dalle alterazioni della microstruttura a una elevata rugosità che porta a una diminuzione delle proprietà superficiali del prodotto finito.

A basse velocità di taglio aumenta la possibilità che si formi il tagliente di riporto e che si abbia una deformazione dei grani di carburo.

I parametri di taglio influenzano la finitura ma l'usura dell'utensile ha un ruolo predominante sul bilancio positivo o meno della lavorazione.

I difetti maggiori si presentano quando l'usura del tagliente è massima e la lavorazione è condotta senza l'utilizzo di liquidi refrigeranti.

Possiamo concludere affermando che l'impiego di utensili rinforzati con whisker è molto limitato, oltre essere costosi da realizzare, sono difficili da studiare. La scelta dei parametri di taglio rende più complicate le cose e in fase di lavorazione è possibile sempre che si presentino problemi.

Nel mondo del lavoro è quindi preferibile l'utilizzo di utensili SiAlON per la lavorazione delle superleghe perché la combinazione di buone proprietà meccaniche e facilità di impiego li rendono la scelta principe.

CAPITOLO 6

Confronto fra utensili in materiale ceramico e acciaio

6.1 Principali utensili da taglio in acciaio

6.1.1 Acciai al carbonio e acciai medio-legati

Gli acciai al carbonio sono i materiali per utensili più antichi e sono stati ampiamente utilizzati per punte di trapano, maschi e alesatori.

Gli acciai medio-legati sono stati sviluppati più tardi per applicazioni simili e gli utensili realizzati con essi sono caratterizzati da durata più lunga.

Anche se sono poco costosi e facilmente formabili, questi acciai non hanno durezza e resistenza all'usura sufficienti per lavorare a velocità di taglio elevate, dove le temperature aumentano notevolmente. Di conseguenza, l'utilizzo di questi acciai è limitato a lavorazioni condotte a velocità di taglio molto basse.

6.1.2 Acciai rapidi

Gli utensili realizzati con acciai rapidi (HSS) sono stati sviluppati per lavorare a velocità maggiore. Prodotti per la prima volta all'inizio del Novecento, gli acciai rapidi sono tra i più legati tra gli acciai per utensili.

Grazie alla loro elevata tenacità e resistenza alla rottura, gli acciai sono particolarmente adatti per operazioni di taglio interrotto e per essere utilizzati nei casi in cui le macchine sono soggette a vibrazioni a causa della bassa rigidità.

Esistono due tipologie di acciai rapidi: gli acciai al molibdeno e gli acciai al tungsteno .

Gli acciai al molibdeno contengono circa il 10% di Mo, con cromo, vanadio, tungsteno e cobalto come elementi leganti.

Gli acciai al tungsteno contengono dal 12 al 18% di W, con cromo, vanadio e cobalto.

In generale, i primi hanno resistenza maggiore all'abrasione e sono soggetti a minori distorsioni durante trattamento termico.

Gli utensili in acciaio rapido possono essere anche rivestiti per aumentare le prestazioni e possono essere trattati termicamente.

6.1.3 Carburi metallici

I materiali per utensili fin qui descritti sono caratterizzati da tenacità, resistenza all'impatto e resistenza agli shock termici accettabili per molte applicazioni, ma hanno limiti notevoli per quello che riguarda resistenza meccanica e durezza, soprattutto a temperature elevate.

I carburi metallici, chiamati anche metalli duri, sono stati introdotti per soddisfare le necessità di velocità di taglio sempre più alte che consentissero velocità di produzione sempre più elevate. Grazie alla loro elevata durezza in un ampio intervallo di temperature, al modulo di elasticità e alla conducibilità termica elevati e alla bassa dilatazione termica, i carburi metallici sono tra i più importanti, versatili ed efficaci materiali per utensili.

Esistono due categorie principali di carburi metallici utilizzati nelle lavorazioni per asportazione, i carburi di tungsteno e i carburi di titanio.

Il carburo di tungsteno (WC) è un materiale composito che consiste di particelle di carburo di tungsteno legate insieme in una matrice di cobalto. La quantità di cobalto modifica in modo significativo le proprietà degli utensili in carburo. All'aumentare del tenore di cobalto, resistenza meccanica, durezza e resistenza all'usura diminuiscono, mentre la tenacità aumenta. Il carburo di titanio ha resistenza all'usura maggiore rispetto al carburo di tungsteno, ma non è così tenace. Il TiC è adatto a lavorare materiali duri, soprattutto acciai e ghise.

6.1.4 Utensili rivestiti

Alcuni materiali possono essere usati come rivestimento su un substrato di acciaio rapido o di carburi metallici per realizzare utensili rivestiti. Grazie alle loro proprietà, gli utensili rivestiti possono lavorare ad alte velocità di taglio, riducendo quindi i tempi richiesti per la lavorazione e di conseguenza i costi. In pratica, è stato osservato che gli utensili rivestiti possono avere una durata anche 10 volte superiore a quella degli utensili non rivestiti.

Materiali per rivestimenti sono comunemente il nitrato di titanio, il carburo di titanio, il carbonitrato di titanio e l'ossido di allumina. I rivestimenti sono generalmente depositati in spessori tra 2 e 10 μm mediante tecniche di deposizione chimica o deposizione fisica.

I rivestimenti devono presentare le seguenti caratteristiche:

- elevata durezza alle alte temperature;
- stabilità e inerzia chimica nei confronti del materiale del pezzo da lavorare;
- bassa conducibilità termica;
- buona adesione al substrato, per evitare sfaldature e scheggiature;
- porosità molto bassa o assente;

L'efficacia dei rivestimenti risulta aumentata nel caso di durezza, tenacità e conducibilità termica elevate del substrato, che può essere un carburo metallico o un acciaio rapido.

6.2 Confronto proprietà e caratteristiche

proprietà	acciai rapidi	carburi metallici	ceramici
Durezza	46-62 HRC	1200-1800 HV	2100-2400 HV
resistenza a compressione(Mpa)	4100-4500	3100-5800	2800-4500
resistenza alla flessione (Mpa)	2400-4800	1000-2600	340-950
modulo di elasticità E (GPa)	207	460-650	310-410
densità ρ Kg/m ³	8600	10000-15000	4000-4500
temperatura di fusione °C	1300	1400	2000
coefficiente di dilatazione termica $10^{-6}/^{\circ}C$	12	4-6.5	7.5-9

La tabella riporta le principali proprietà dei materiali per utensili più usati.

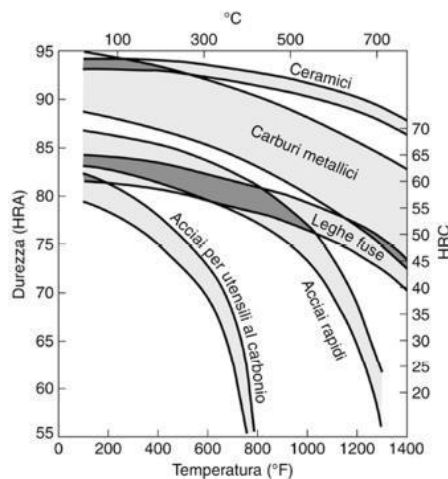
La prima grande differenza la notiamo sui valori della durezza. I materiali ceramici hanno durezza più elevata rispetto ai materiali in acciaio. Questo comporta a minor usura e maggiore vita utile dell'utensile.

Tuttavia l'elevata durezza comporta a una minor resistenza alla frattura e alla flessione.

Per questo motivo, gli utensili in ceramico sono montati su macchinari con un basamento in ghisa e componenti ben saldi, in modo da smorzare l'amplificazione di eventuali vibrazioni.

Una delle caratteristiche fondamentali, che abbiamo menzionato più volte nel nostro lavoro, è la possibilità di lavorare alle alte temperature.

Gli acciai presentano temperature di fusione sui 1300-1400°C mentre i ceramici arrivano ai 2000°C.



Dal grafico, si può notare come i materiali ceramici mantengono elevate le loro proprietà anche alle alte temperature.

Seguono i carburi metallici che grazie ai rivestimenti possono vantare buone proprietà.

Le lavorazioni di superleghe, conosciuti come materiali molto duri, necessitano di arrivare a una temperatura d'esercizio elevate in modo da rendere il materiale più morbido. Il grande vantaggio degli utensili in materiale ceramico di mantenere le proprietà alle alte temperature ne fanno la scelta cardine per questo tipo di lavorazione.

Il mercato degli utensili da taglio offre una vastissima gamma per applicazioni di qualsiasi genere.

Per quanto riguarda gli utensili in materiale ceramico c'è da dire che rispetto ai comuni utensili in acciaio mancano di certe proprietà, come il coefficiente di dilatazione elevato che li rende materiali estremamente fragili.

Studi recenti stanno cercando soluzioni per limitare questo divario, i materiali multistrato, grazie alla loro composizione di diversi strati, possono vantare un ottimo coefficiente di dilatazione termica.

Utensili rinforzati con whisker tendono ad avere una resistenza alla flessione maggiorata grazie alla fibre che introduciamo durante la preparazione del composito.

Gli utensili HSS sono i primi concorrenti e oggigiorno sono gli utensili più venduti.

Grazie alla loro possibilità di lavorare alle alte velocità hanno ottime proprietà meccaniche mantenute alle alte temperature.

Inoltre il basso costo d'acquisto e la facilità di produzione li rendono ancora più appetibili sul mercato.

Gli innumerevoli vantaggi offerti dai materiali ceramici grazie alle loro caratteristiche li stanno rendendo sempre più diffusi nelle officine meccaniche. Tuttavia, questi fattori fanno sì che gli utensili da taglio in ceramico siano più difficili da produrre. Inoltre, i ceramici hanno alcune proprietà negative che aggravano le lavorazioni. Queste proprietà includono la loro estrema fragilità e le reazioni avverse quando si lavora con materiali in ossido.

Stiamo parlando di un mercato in continua evoluzione dove sempre più materiali e combinazioni vengono provate e studiate per raggiungere proprietà migliori.

La continua evoluzione del mercato e dei materiali da lavorare dà spazio a idee e soluzioni nuove. Non ci sarà da meravigliarsi se ogni anno nuovi materiali e nuovi tipi d'utensile saranno messi in produzione per far fronte alle richieste del mercato.

Conclusion

In questo lavoro, dopo una breve introduzione sullo studio generale del taglio, soffermandoci sulle principali macchine utensili utilizzate e sui problemi relativi alle lavorazioni e ai principali meccanismi d'usura, abbiamo approfondito lo studio sugli utensili da taglio in materiale ceramico.

Nei capitoli successivi ci siamo occupati prima dell'approfondimento sulle caratteristiche e le proprietà principali dei materiali ceramici, per poi discutere ed elencare le diverse tipologie, lodando i vantaggi e discutendone i punti chiave, dei principali utensili da taglio in materiale ceramico.

Tra i più diffusi troviamo gli utensili ceramici con matrice a base d'allumina. Le diverse combinazioni con altri materiali portano a un aumento delle proprietà e al miglioramento del prodotto finale.

Il mercato attuale si basa sull'efficienza e sull'innovazione, una risposta viene data dagli utensili in ceramico innovativo e dagli utensili rinforzati con whisker.

Quest'ultima famiglia di utensili permette di lavorare materiali molto difficili come superleghe e leghe ferrose molto dure.

Gli strumenti in ceramico si stanno ritagliando una grande fetta del mercato attuale per quanto riguarda gli utensili da taglio, apprezzati per la loro elevata durezza e resistenza alle alte temperature, rispondono sempre di più ai requisiti richiesti dalle officine meccaniche.

Rispetto ai materiali tradizionali, possono vantare una maggiore resistenza all'usura, questo permette di ottenere una migliore finitura in corso di lavorazione e ottenere un prodotto finito di eccellente qualità, che ripaga l'investimento effettuato per l'acquisto di questa tipologia di utensili che presenta un costo elevato.

E' facile immaginare la previsione futura di utilizzo di questo tipo di utensili, materiali sempre più difficili da lavorare, macchinari sempre più potenti, prodotti da realizzare complessi, che verranno impiegati in settori tecnologicamente avanzati portano a dedurre che la tipologia degli utensili in ceramico potrà essere la chiave per le lavorazioni future.

Bibliografia

- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, “Tecnologia Meccanica” Pearson Prentice Hall (2008)
- B.Doloi, B. Mondal, Reeta Das. Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis (2011)
- X.Q.You, T.Z. Si, N. Liu, Effect of grain size on thermal shock resistance of Al₂O₃–TiC ceramics (2007)
- Y.H. Fei, C.Z. Huang, H.L. Liu. Mechanical properties of Al₂O₃–TiC–TiN ceramic tool materials (2014)
- Jia Liu, Cuiying Ma, Guizhao Tu, Ying Long. Cutting performance and wear mechanism of Sialon ceramic cutting inserts with TiCN coating (2016)
- Bernd Bitterlich, Sebastian Bitsch, Kilian Friederich. SiAlON based ceramic cutting tools (2008)
- Guangming Zheng, Jun Zhao, Zhongjun Gao, Qingyuan Cao. Cutting performance and wear mechanisms of Sialon–Si₃N₄ graded nano-composite ceramic cutting tools (2012)
- Guizhao Tu, Shanghua Wu, Jia Liu, Ying Long, Bo Wang. Cutting performance and wear mechanisms of Sialon ceramic cutting tools at high speed dry turning of gray cast iron (2016)
- Xuefei Liu, Hanlian Liu, Chuanzhen Huang, Limei Wang, Bin Zou, Bin Zhao. Synergistically toughening effect of SiC whiskers and nanoparticles in Al₂O₃-based composite ceramic cutting tool material (2016)
- Liu Xuefei, Liu Hanlian, Huang Chuanzhen, Zhao Bin, Zheng Longwei. High temperature mechanical properties of Al₂O₃-based ceramic tool material toughened by SiC whiskers and nanoparticles (2017)
- J.M. Zhou, V. Bushlya, J.E. Stahl. An investigation of surface damage in the high speed turning of Inconel 718 with use of whisker reinforced ceramic tools (2012)
- Hanlian Liu, Qiang Shi, Chuanzhen Huang, Bin Zou, Liang Xu, Jun Wang. In-situ fabricated TiB₂ particle-whisker synergistically toughened Ti(C, N)-based ceramic cutting tool material (2015)
- C.F. Gutiérrez-González, M. Suarez, S. Pozhidaev, S. Rivera, P. Peretyagin, W. Solís, L.A. Díaz, A. Fernandez, R. Torrecillas. Effect of TiC addition on the mechanical behaviour of Al₂O₃–SiC whiskers composites obtained by SPS (2016)
- Huiwen Xiong, Zhiyou Li, Kechao Zhou. TiC whisker reinforced ultra-fine TiC-based cermets: Microstructure and mechanical properties (2016)

