

Materiali per utensili da taglio

*Caratteristiche, applicazioni e criteri di
scelta nelle lavorazioni meccaniche*



Sandro Valenza

Materiali per utensili da taglio

Evoluzione tecnologica, struttura e criteri di scelta

Nel processo di asportazione di truciolo l'utensile costituisce l'interfaccia diretta tra macchina utensile e materiale lavorato. In questa piccola regione di contatto si concentrano le condizioni termo-meccaniche più severe dell'intero processo produttivo, rendendo il materiale utensile uno degli elementi tecnologicamente più critici delle lavorazioni meccaniche.

A queste sollecitazioni intrinseche del processo si aggiungono le variabili tipiche del sistema reale di lavorazione: rigidità della macchina utensile, qualità del serraggio del pezzo e dell'utensile, stabilità dell'attrezzaggio, presenza di vibrazioni, eventuali interruzioni di taglio e variabilità delle caratteristiche del materiale lavorato. L'insieme di questi fattori determina condizioni operative estremamente complesse che mettono a dura prova l'integrità e le prestazioni del materiale utensile.

In questo contesto non è sufficiente che un utensile sia semplicemente "duro". Un materiale destinato alla costruzione di utensili da taglio deve possedere una combinazione equilibrata di proprietà fondamentali: durezza elevata, resistenza all'usura, stabilità alle alte temperature, resistenza alla deformazione plastica e adeguata tenacità per sopportare carichi meccanici variabili senza fratture premature. Inoltre deve mantenere nel tempo la geometria del filo tagliente, elemento determinante per la qualità della lavorazione e per la stabilità del processo.

La storia dei materiali per utensili da taglio è strettamente legata all'evoluzione della tecnologia delle lavorazioni meccaniche. Ogni nuova famiglia di materiali è stata sviluppata per superare i limiti prestazionali della precedente: aumentare le velocità di taglio, migliorare la resistenza all'usura, consentire la lavorazione di materiali sempre più resistenti o abrasivi, oppure garantire qualità superficiali più elevate e maggiore stabilità dimensionale del pezzo lavorato.

Dagli acciai rapidi che hanno dominato la tecnologia del taglio per molti decenni, ai carburi cementati, fino ai cermet, alle ceramiche tecniche e ai materiali superduri come CBN e diamante policristallino, l'evoluzione dei materiali utensile riflette direttamente il progresso dell'industria meccanica e delle sue esigenze produttive. L'introduzione di nuove tecnologie di produzione, nuovi materiali strutturali e strategie di lavorazione sempre più spinte ha reso necessario lo sviluppo di utensili in grado di operare in condizioni operative sempre più severe.

La scelta del materiale utensile non può quindi essere considerata una decisione puramente commerciale o basata su criteri generici. Al contrario, essa richiede una valutazione ingegneristica che tenga conto delle caratteristiche del materiale lavorato, delle condizioni di taglio, della stabilità del sistema macchina-utensile-attrezzaggio e degli obiettivi produttivi del processo.

Comprendere la struttura, il comportamento tribologico e i limiti operativi dei diversi materiali per utensili da taglio significa quindi poter selezionare la soluzione tecnologica più adatta alle specifiche condizioni di lavorazione, ottimizzando contemporaneamente produttività, durata utensile e qualità del pezzo lavorato.

HSS – High Speed Steel (Acciai Rapidi)

Natura del materiale

Gli acciai rapidi, comunemente indicati con la sigla **HSS (High Speed Steel)**, sono acciai altamente legati progettati per mantenere elevata durezza e capacità di taglio anche a temperature relativamente elevate. Il nome stesso deriva dalla loro capacità, rispetto agli acciai tradizionali, di operare a velocità di taglio significativamente più alte senza perdere rapidamente le proprie caratteristiche meccaniche.

Dal punto di vista metallurgico gli HSS appartengono alla famiglia degli acciai da utensili altamente legati, caratterizzati da un contenuto relativamente elevato di elementi formatori di carburi. Tra gli elementi più comuni si trovano:

- Tungsteno (W)
- Molibdeno (Mo)
- Vanadio (V)
- Cromo (Cr)
- Cobalto (Co) in alcune varianti

Questi elementi svolgono funzioni specifiche: formano carburi durissimi, stabilizzano la durezza alle alte temperature e contribuiscono alla resistenza all'usura.

Evoluzione tecnologica

Gli acciai rapidi nascono all'inizio del XX secolo come evoluzione degli acciai utensili al carbonio. Questi ultimi presentavano un limite importante: già intorno ai 200–300 °C iniziavano a perdere durezza, rendendo impossibile aumentare significativamente le velocità di taglio.

L'introduzione di tungsteno e successivamente di molibdeno ha permesso di sviluppare acciai in grado di mantenere durezza anche a temperature molto più elevate, fenomeno noto come resistenza al rosso.

Nel tempo si sono sviluppate diverse famiglie di HSS, tra cui:

- acciai al tungsteno (serie T)
- acciai al molibdeno (serie M, oggi i più diffusi)
- acciai rapidi al cobalto (per maggiore stabilità termica)

Negli ultimi decenni si sono diffusi anche gli HSS prodotti mediante metallurgia delle polveri, che consentono una distribuzione molto più uniforme dei carburi e prestazioni superiori rispetto agli acciai rapidi tradizionali.

Processo di produzione

La produzione tradizionale degli HSS segue il processo tipico degli acciai da utensili:

1. Fusione in forno elettrico
2. Colata in lingotti
3. Forgiatura o laminazione per affinare la struttura
4. Lavorazione meccanica dell'utensile
5. Trattamenti termici di tempra e rinvenimento multiplo

Nel caso degli HSS da metallurgia delle polveri, il materiale viene prodotto atomizzando il metallo fuso in polvere, successivamente compattata e sinterizzata. Questo processo consente di ottenere una microstruttura molto più fine e omogenea.

Struttura microstrutturale

La microstruttura tipica di un acciaio rapido è costituita da:

- matrice martensitica temprata
- carburi complessi finemente dispersi

- eventuale presenza di austenite residua

I carburi presenti possono essere di diverse tipologie, tra cui:

- carburi MC (ricchi in vanadio)
- carburi M₆C (ricchi in tungsteno o molibdeno)
- carburi M₂₃C₆

Questi carburi sono responsabili della resistenza all'usura e della capacità del materiale di mantenere il filo tagliente.

Proprietà principali

Gli acciai rapidi presentano un insieme di proprietà che li rendono ancora oggi molto diffusi in molte applicazioni utensili.

Tra le principali caratteristiche si possono evidenziare:

- durezza elevata dopo tempra (circa 62–67 HRC)
- buona tenacità rispetto ai materiali sinterizzati
- buona resistenza all'usura
- capacità di mantenere durezza a temperature fino a circa 550–600 °C

Questa combinazione di proprietà rende gli HSS particolarmente adatti a utensili soggetti a sollecitazioni meccaniche significative.

Meccanismi di usura

Durante il taglio dei metalli gli utensili in HSS sono soggetti a diversi meccanismi di usura, tra cui:

Usura adesiva

dovuta all'adesione tra truciolo e superficie dell'utensile.

Usura abrasiva

provocata dalle particelle dure presenti nel materiale lavorato.

Arrotondamento del filo

causato dall'elevata temperatura e dal continuo attrito.

Diffusione ad alta temperatura

fenomeno che diventa significativo quando la temperatura nella zona di taglio cresce oltre certi valori.

Applicazioni industriali

Nonostante l'ampia diffusione dei materiali sinterizzati, gli acciai rapidi mantengono ancora oggi un ruolo importante in numerosi utensili.

Le applicazioni più tipiche includono:

- punte elicoidali per foratura
- maschi per filettatura
- frese sagomate e utensili speciali
- creatori per ingranaggi
- utensili riaffilabili

In particolare nella maschiatura e nella dentatura mediante creatori, la possibilità di riaffilatura rappresenta un vantaggio importante rispetto ai materiali più fragili.

Vantaggi

Gli HSS presentano diversi vantaggi pratici:

- elevata tenacità
- buona resistenza agli urti
- tolleranza alle vibrazioni
- facilità di riaffilatura
- costo relativamente contenuto

Queste caratteristiche li rendono particolarmente adatti a lavorazioni in condizioni non perfettamente stabili.

Limiti

Il principale limite degli acciai rapidi è rappresentato dalla loro resistenza termica inferiore rispetto ai materiali sinterizzati.

Di conseguenza:

- le velocità di taglio sono più basse
- la durata utensile può risultare inferiore nelle lavorazioni ad alta produttività
- non sono adatti a lavorazioni su materiali molto duri o abrasivi.

Considerazioni ingegneristiche di scelta

La scelta di un utensile in HSS rimane ancora oggi pienamente giustificata in diversi contesti produttivi.

È particolarmente indicato quando:

- la lavorazione presenta interruzioni di taglio
- la macchina non è estremamente rigida
- l'utensile deve essere riaffilato più volte
- il lotto produttivo non giustifica utensili più costosi.

In queste condizioni la maggiore tenacità dell'HSS può garantire un comportamento più affidabile rispetto ai materiali più duri ma anche più fragili.

Metallo duro – Carburo cementato

Natura del materiale

Il **metallo duro**, noto anche come carburo cementato, è un materiale composito ottenuto per metallurgia delle polveri costituito principalmente da carburo di tungsteno (WC) legato da una fase metallica, generalmente cobalto (Co).

A differenza degli acciai rapidi, il metallo duro non è un acciaio e non deriva da processi di fusione e lavorazione plastica tradizionali. È invece un materiale sinterizzato in cui particelle estremamente dure di carburo sono inglobate in una matrice metallica che conferisce una certa tenacità al sistema.

Dal punto di vista concettuale si tratta quindi di un materiale bifase, in cui:

- la fase ceramica (WC) garantisce durezza e resistenza all'usura
- la fase metallica (Co) conferisce coesione e tenacità

Questo equilibrio tra durezza e tenacità ha reso il metallo duro il materiale più diffuso per utensili da taglio nell'industria moderna.

Evoluzione tecnologica

Il carburo cementato nasce negli anni '20 e '30 del Novecento come risposta alla crescente esigenza di aumentare le velocità di taglio rispetto a quelle consentite dagli acciai rapidi.

Le prime formulazioni erano costituite essenzialmente da WC e Co, ma nel tempo la tecnologia si è evoluta introducendo nuove varianti e miglioramenti strutturali.

Tra le principali evoluzioni si possono citare:

- introduzione di carburi complessi come TiC, TaC e NbC
- controllo sempre più preciso della dimensione dei grani di WC
- sviluppo di gradi a grano ultrafine
- introduzione di rivestimenti superficiali mediante processi CVD e PVD

I rivestimenti hanno rappresentato una svolta importante, poiché permettono di migliorare ulteriormente la resistenza all'usura e la stabilità termica dell'utensile senza modificare la struttura del substrato.

Tra i rivestimenti più diffusi si trovano:

- TiN (nitruro di titanio)
- TiCN (carbonitrato di titanio)
- Al₂O₃ (ossido di alluminio)
- TiAlN (nitruro di titanio-alluminio)

Questi strati svolgono funzioni di barriera termica e di riduzione dell'attrito nella zona di taglio.

Processo di produzione

Il metallo duro viene prodotto mediante un processo tipico della metallurgia delle polveri.

Le principali fasi sono:

1. produzione delle polveri di carburo di tungsteno
2. miscelazione con la polvere del legante metallico (generalmente cobalto)
3. macinazione e omogeneizzazione della miscela
4. pressatura della polvere in uno stampo
5. sinterizzazione ad alta temperatura (circa 1350–1450 °C)

Durante la sinterizzazione il cobalto fonde e agisce come fase legante, cementando tra loro le particelle di carburo.

Il risultato è un materiale molto compatto e con proprietà meccaniche estremamente elevate.

Struttura microstrutturale

La microstruttura del metallo duro è costituita da:

- grani di carburo di tungsteno estremamente duri
- matrice metallica di cobalto

La dimensione dei grani può variare da alcuni micron fino a dimensioni ultrafini inferiori al micron.

La microstruttura influenza in modo diretto le proprietà del materiale:

- grani più fini → maggiore durezza e resistenza all'usura
- maggiore contenuto di cobalto → maggiore tenacità

Il controllo di questi parametri consente di sviluppare gradi specifici per diverse applicazioni.

Proprietà principali

Il metallo duro presenta proprietà significativamente superiori rispetto agli acciai rapidi in termini di durezza e resistenza all'usura.

Tra le caratteristiche più importanti si possono evidenziare:

- durezza molto elevata
- ottima resistenza all'usura abrasiva
- stabilità a temperature fino a circa 800–1000 °C
- buona resistenza alla deformazione plastica

Queste proprietà permettono di utilizzare velocità di taglio molto più elevate rispetto agli utensili in HSS.

Meccanismi di usura

Durante il taglio dei metalli gli utensili in metallo duro sono soggetti a diversi meccanismi di usura.

I più comuni sono:

Usura di fianco (flank wear)

progressiva abrasione della superficie laterale dell'utensile a contatto con il pezzo.

Usura a cratere

formazione di una cavità sulla faccia di taglio causata dall'attrito con il truciolo e dai fenomeni di diffusione.

Micro-scheggiature del filo

piccole fratture localizzate dovute a sollecitazioni meccaniche o vibrazioni.

Diffusione ad alta temperatura

trasferimento di elementi chimici tra utensile e materiale lavorato.

Applicazioni industriali

Il metallo duro rappresenta oggi il materiale più utilizzato per utensili da taglio nella produzione meccanica.

Le principali applicazioni includono:

- tornitura di acciai strutturali e legati
- fresatura di acciai e ghise
- lavorazioni di sgrossatura e finitura
- lavorazioni su centri di lavoro CNC
- produzioni in serie e grande serie

È particolarmente efficace nelle lavorazioni a taglio continuo, dove la stabilità del processo consente di sfruttare appieno le sue caratteristiche.

Vantaggi

I principali vantaggi del metallo duro sono:

- elevata resistenza all'usura
- possibilità di lavorare a velocità di taglio elevate
- ampia disponibilità di gradi e geometrie
- ottimo rapporto tra produttività e costo utensile

Queste caratteristiche ne hanno fatto il materiale di riferimento nell'industria moderna.

Limiti

Nonostante le sue elevate prestazioni, il metallo duro presenta alcuni limiti.

Tra i principali:

- minore tenacità rispetto agli acciai rapidi
- sensibilità agli urti e alle vibrazioni
- possibilità di scheggiature del filo in condizioni instabili

Per questo motivo richiede macchine utensili sufficientemente rigide e parametri di lavorazione corretti.

Considerazioni ingegneristiche di scelta

La scelta di utensili in metallo duro è oggi la soluzione più comune nelle lavorazioni meccaniche industriali.

È particolarmente indicato quando:

- si richiedono elevate velocità di taglio
- la lavorazione è relativamente stabile
- il volume produttivo è medio-alto
- si vuole massimizzare la produttività del processo

In queste condizioni il metallo duro rappresenta il miglior compromesso tra durata utensile, qualità della lavorazione e costo per pezzo prodotto.

Cermet

Natura del materiale

Il termine **cermet** deriva dalla combinazione delle parole *ceramic* e *metal* e indica una famiglia di materiali compositi costituiti da una fase ceramica dura e resistente all'usura legata da una fase metallica che ne garantisce la coesione strutturale.

Nei cermet impiegati per utensili da taglio la fase ceramica è generalmente composta da carburi o carbonitruri di titanio, in particolare:

- TiC (carburo di titanio)
- TiCN (carbonitruro di titanio)

A questi possono essere aggiunti altri carburi come:

- WC
- Mo₂C
- TaC

La fase metallica legante è solitamente costituita da nichel, cobalto o da loro combinazioni.

La presenza della fase ceramica conferisce al materiale un'elevata durezza e una grande resistenza all'usura, mentre la fase metallica fornisce la minima tenacità necessaria per l'impiego come utensile.

Evoluzione tecnologica

I cermet sono stati sviluppati per migliorare alcune prestazioni dei carburi cementati, in particolare nella lavorazione degli acciai.

Uno dei problemi tipici degli utensili in metallo duro durante la lavorazione degli acciai è la formazione del tagliente di riporto, dovuta alla forte affinità chimica tra il ferro del pezzo e il carburo di tungsteno dell'utensile.

I cermet a base di titanio presentano invece una minore affinità chimica con il ferro, riducendo significativamente questo fenomeno.

Nel corso degli anni la tecnologia dei cermet si è evoluta introducendo:

- carbonitruri di titanio più stabili
- strutture multicomponente
- miglior controllo della microstruttura
- gradi con maggiore resistenza alla frattura

Questi sviluppi hanno ampliato il campo di utilizzo dei cermet soprattutto nelle lavorazioni di finitura.

Processo di produzione

Come i carburi cementati, anche i cermet vengono prodotti mediante metallurgia delle polveri.

Il processo comprende generalmente le seguenti fasi:

1. preparazione delle polveri ceramiche (TiC, TiCN ecc.)
2. aggiunta delle polveri metalliche leganti
3. miscelazione e macinazione per ottenere una distribuzione uniforme
4. pressatura della miscela in stampi
5. sinterizzazione ad alta temperatura

Durante la sinterizzazione la fase metallica fonde parzialmente e lega tra loro le particelle ceramiche formando una struttura compatta.

Il risultato è un materiale con caratteristiche intermedie tra quelle dei carburi cementati e quelle delle ceramiche tecniche.

Struttura microstrutturale

La microstruttura dei cermet è costituita da:

- particelle di carbonitruro di titanio estremamente dure
- fase metallica che riempie gli spazi intergranulari

Spesso si osserva una struttura cosiddetta **core-rim**, in cui i grani ceramici presentano un nucleo centrale circondato da una zona periferica con composizione leggermente diversa.

Questa struttura contribuisce a migliorare la resistenza all'usura e la stabilità del filo tagliente.

Proprietà principali

I cermet presentano alcune proprietà distintive rispetto ai carburi cementati.

Tra le più rilevanti si possono evidenziare:

- elevata durezza
- ottima resistenza all'usura
- buona stabilità del filo tagliente
- bassa affinità chimica con il ferro
- ridotta tendenza alla formazione del tagliente di riporto

Grazie a queste caratteristiche gli utensili in cermet sono particolarmente apprezzati nelle lavorazioni di finitura.

Meccanismi di usura

Gli utensili in cermet sono soggetti a diversi meccanismi di usura, tra cui:

Usura abrasiva

provocata dalle particelle dure presenti nel materiale lavorato.

Usura di fianco

dovuta allo scorrimento tra utensile e superficie del pezzo.

Microfratture del filo

che possono verificarsi quando il materiale è sottoposto a sollecitazioni meccaniche elevate o a vibrazioni.

Rispetto ai carburi cementati, la minore affinità chimica con l'acciaio riduce significativamente i fenomeni di adesione.

Applicazioni industriali

I cermet sono utilizzati principalmente nelle lavorazioni di finitura e semifinitura degli acciai.

Le applicazioni tipiche includono:

- tornitura di acciai medio-legati
- lavorazioni di finitura con avanzamenti moderati
- lavorazioni dove è richiesta un'ottima qualità superficiale

In molti casi i cermet permettono di ottenere superfici con rugosità inferiori rispetto agli utensili in metallo duro.

Vantaggi

Tra i principali vantaggi dei cermet si possono evidenziare:

- eccellente qualità superficiale del pezzo lavorato
- buona stabilità dimensionale del filo
- minore formazione di tagliente di riporto
- buona resistenza all'usura nelle lavorazioni di finitura

Queste caratteristiche li rendono particolarmente indicati per operazioni di tornitura finale su acciai.

Limiti

Il principale limite dei cermet è rappresentato dalla tenacità relativamente bassa. Di conseguenza:

- sono sensibili agli urti
- non tollerano bene le vibrazioni
- non sono adatti alle lavorazioni con taglio fortemente interrotto
- non sono ideali per operazioni di sgrossatura pesante

Per ottenere buone prestazioni richiedono condizioni di lavorazione relativamente stabili.

Considerazioni ingegneristiche di scelta

Gli utensili in cermet trovano il loro campo di applicazione ideale nelle lavorazioni di finitura degli acciai, dove la stabilità del filo e la qualità della superficie sono fattori prioritari.

Sono particolarmente indicati quando:

- il taglio è continuo
- la macchina utensile è sufficientemente rigida
- si richiede una finitura superficiale elevata
- il materiale lavorato è un acciaio non eccessivamente duro

In queste condizioni i cermet rappresentano una valida alternativa ai carburi cementati nelle operazioni di finitura.

CBN – Nitruro di Boro Cubico

Natura del materiale

Il CBN (**Cubic Boron Nitride**) è un materiale superduro sintetico appartenente alla famiglia dei materiali abrasivi avanzati. È costituito da nitruro di boro con struttura cristallina cubica, analoga a quella del diamante, e rappresenta il secondo materiale più duro conosciuto dopo il diamante stesso.

Dal punto di vista chimico il CBN è formato da atomi di boro e azoto disposti in un reticolo cristallino estremamente stabile. Questa struttura conferisce al materiale una durezza molto elevata e una notevole resistenza alle alte temperature.

Una delle caratteristiche più importanti del CBN è la sua stabilità chimica nei confronti del ferro, proprietà che lo distingue nettamente dal diamante e che ne consente l'impiego nella lavorazione di materiali ferrosi.

Evoluzione tecnologica

Il nitruro di boro cubico è stato sviluppato nella seconda metà del XX secolo nell'ambito della ricerca sui materiali superduri sintetici.

L'obiettivo era quello di ottenere un materiale con durezza paragonabile a quella del diamante ma privo dei limiti di stabilità chimica che impediscono al diamante di essere utilizzato efficacemente nelle lavorazioni dei materiali ferrosi.

La sintesi del CBN ha rappresentato un importante progresso tecnologico perché ha permesso lo sviluppo di utensili in grado di operare su materiali molto duri e in condizioni di temperatura estremamente elevate.

Con il tempo si sono sviluppate diverse tipologie di utensili a base di CBN, tra cui:

- inserti con piccola punta in CBN saldata su supporto in metallo duro

- utensili in PCBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride), ottenuti mediante sinterizzazione di cristalli di CBN con leganti ceramici o metallici

Queste soluzioni consentono di sfruttare le proprietà del CBN mantenendo al tempo stesso una struttura utensile sufficientemente robusta.

Processo di produzione

Il CBN non si trova in natura e viene ottenuto esclusivamente tramite sintesi artificiale.

La produzione avviene generalmente mediante processi HPHT (High Pressure High Temperature), che riproducono condizioni di pressione e temperatura molto elevate.

Durante questo processo il nitrato di boro viene trasformato nella sua forma cristallina cubica, caratterizzata da una durezza estremamente elevata.

Per la produzione di utensili si utilizzano spesso materiali PCBN, ottenuti mediante:

1. miscelazione di polveri di CBN con leganti metallici o ceramici
2. pressatura ad alta pressione
3. sinterizzazione ad alta temperatura

Il materiale risultante viene successivamente saldato o brasato su un substrato di metallo duro per formare l'inserto da taglio.

Struttura microstrutturale

La microstruttura dei materiali PCBN è costituita da:

- cristalli di nitrato di boro cubico estremamente duri
- fase legante metallica o ceramica

La percentuale di CBN e la natura del legante influenzano in modo significativo le proprietà del materiale.

In generale:

- maggiore contenuto di CBN → maggiore durezza e resistenza all'usura
- maggiore quantità di legante → maggiore tenacità

Questa variabilità consente di sviluppare gradi specifici per diverse condizioni di lavorazione.

Proprietà principali

Il CBN possiede una combinazione di proprietà che lo rende uno dei materiali più avanzati per utensili da taglio.

Tra le principali caratteristiche si possono evidenziare:

- durezza estremamente elevata
- eccezionale resistenza all'usura
- elevata stabilità alle alte temperature
- buona conducibilità termica
- stabilità chimica nei confronti dei materiali ferrosi

Grazie a queste proprietà il CBN può mantenere le proprie prestazioni anche in condizioni di lavoro molto severe.

Meccanismi di usura

Gli utensili in CBN sono soggetti principalmente a meccanismi di usura di tipo abrasivo e diffusivo.

Tra i fenomeni più comuni si possono citare:

Usura abrasiva

dovuta allo scorrimento di materiali molto duri sulla superficie dell'utensile.

Usura di fianco

progressiva riduzione del filo tagliente nella zona a contatto con il pezzo.

Microfratture del filo

che possono verificarsi in presenza di vibrazioni o di carichi meccanici elevati. Rispetto ad altri materiali utensile, il CBN presenta una notevole resistenza all'usura anche a temperature molto elevate.

Applicazioni industriali

Gli utensili in CBN vengono utilizzati principalmente in lavorazioni dove è richiesta una elevata resistenza all'usura e la capacità di lavorare materiali con durezza molto elevata.

Le applicazioni più tipiche includono:

- lavorazioni di materiali temprati
- operazioni di finitura su componenti trattati termicamente
- lavorazioni in cui si desidera ridurre o sostituire operazioni di rettifica

Grazie alla loro stabilità termica, gli utensili in CBN possono operare efficacemente anche a temperature molto elevate nella zona di taglio.

Vantaggi

Tra i principali vantaggi del CBN si possono evidenziare:

- durezza molto elevata
- grande resistenza all'usura
- stabilità alle alte temperature
- buona stabilità chimica con materiali ferrosi
- capacità di lavorare materiali molto duri

Queste caratteristiche rendono il CBN uno dei materiali più performanti per utensili da taglio.

Limiti

Nonostante le sue prestazioni elevate, il CBN presenta anche alcuni limiti.

Tra i principali:

- costo elevato rispetto ai materiali convenzionali
- sensibilità agli urti e alle vibrazioni
- necessità di condizioni di lavorazione relativamente stabili

Per sfruttarne appieno le caratteristiche è quindi necessario disporre di macchine utensili rigide e parametri di lavorazione corretti.

Considerazioni ingegneristiche di scelta

L'impiego di utensili in CBN è giustificato quando le condizioni di lavorazione richiedono un materiale estremamente resistente all'usura e capace di mantenere prestazioni elevate anche a temperature molto elevate.

È particolarmente indicato quando:

- il materiale lavorato presenta elevata durezza
- si richiede una lunga durata utensile
- si vogliono ridurre o eliminare alcune operazioni di finitura tradizionali

In queste condizioni il CBN rappresenta una delle soluzioni tecnologicamente più avanzate disponibili per gli utensili da taglio.

PCD – Diamante Policristallino

Natura del materiale

Il **PCD (Polycrystalline Diamond)** è un materiale superduro costituito da un aggregato di cristalli di diamante sintetico sinterizzati tra loro ad alta pressione e temperatura. A differenza del diamante naturale monocristallino, il PCD è formato da una struttura policristallina nella quale numerosi piccoli cristalli di diamante sono orientati casualmente e legati tra loro mediante un processo di sinterizzazione.

Questa struttura conferisce al materiale una combinazione di proprietà estremamente favorevoli per le applicazioni come utensile da taglio: durezza elevatissima, grande resistenza all'usura e ottima conducibilità termica.

Il PCD viene generalmente utilizzato sotto forma di uno strato sottile sinterizzato su un supporto in **metallo duro**, che funge da substrato strutturale e garantisce la resistenza meccanica dell'utensile.

Evoluzione tecnologica

L'impiego del diamante nelle lavorazioni meccaniche è noto da molto tempo, ma il diamante naturale presenta diversi limiti: costo elevato, disponibilità limitata e comportamento fragile.

Lo sviluppo del diamante sintetico ha permesso di superare questi limiti. In particolare, la tecnologia del diamante policristallino ha consentito di ottenere utensili più affidabili e con proprietà più uniformi rispetto al diamante naturale.

La struttura policristallina rende infatti il materiale meno sensibile alla propagazione di fratture lungo specifici piani cristallografici, migliorando la resistenza all'usura e la stabilità del filo tagliente.

Nel corso degli anni la tecnologia del PCD si è evoluta con:

- controllo della dimensione dei cristalli di diamante
- miglioramento dei processi di sinterizzazione
- sviluppo di gradi con diverse dimensioni di grano per applicazioni specifiche

Queste evoluzioni hanno ampliato il campo di applicazione degli utensili in PCD in numerosi settori della lavorazione meccanica.

Processo di produzione

Il PCD viene prodotto mediante processi HPHT (High Pressure High Temperature), analoghi a quelli utilizzati per la sintesi del diamante artificiale.

Il processo produttivo può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

1. preparazione della polvere di diamante sintetico
2. deposizione della polvere su un substrato di metallo duro
3. applicazione di pressione e temperatura molto elevate
4. sinterizzazione dei cristalli di diamante

Durante questo processo i cristalli di diamante si legano tra loro formando una struttura policristallina compatta.

Il risultato è un materiale composito costituito da:

- uno strato di diamante policristallino
- un supporto strutturale in carburo cementato

Questa configurazione consente di combinare le eccezionali proprietà del diamante con la robustezza del metallo duro.

Struttura microstrutturale

La microstruttura del PCD è composta da:

- cristalli di diamante policristallini
- fase legante metallica derivata dal processo di sinterizzazione

Le dimensioni dei cristalli possono variare in funzione del grado del materiale.

In generale:

- cristalli più piccoli → migliore qualità superficiale
- cristalli più grandi → maggiore resistenza all'usura

Questa variabilità consente di progettare utensili ottimizzati per differenti condizioni di lavorazione.

Proprietà principali

Il PCD possiede alcune delle proprietà più elevate tra i materiali utilizzati per utensili da taglio.

Tra le caratteristiche principali si possono evidenziare:

- durezza estremamente elevata
- altissima resistenza all'usura abrasiva
- eccellente conducibilità termica
- basso coefficiente di attrito
- elevata stabilità dimensionale del filo tagliente

Grazie alla combinazione di queste proprietà il PCD consente di ottenere durate utensile molto elevate.

Meccanismi di usura

Gli utensili in PCD sono soggetti principalmente a fenomeni di usura abrasiva.

I meccanismi di usura più comuni includono:

Usura abrasiva

provocata dallo scorrimento di particelle dure sulla superficie dell'utensile.

Usura di fianco

dovuta al contatto continuo tra utensile e superficie del pezzo.

Microfratture del filo

che possono verificarsi in presenza di carichi meccanici elevati o vibrazioni.

Grazie alla sua durezza molto elevata, il PCD mostra una resistenza all'usura nettamente superiore rispetto ai materiali convenzionali.

Applicazioni industriali

Gli utensili in PCD trovano applicazione principalmente nelle lavorazioni di materiali non ferrosi e materiali altamente abrasivi.

Le applicazioni più comuni includono:

- lavorazioni ad alta velocità
- lavorazioni dove è richiesta una qualità superficiale elevata
- lavorazioni di materiali abrasivi

In queste condizioni il PCD consente di ottenere una durata utensile molto elevata e una notevole stabilità del processo.

Vantaggi

I principali vantaggi degli utensili in PCD includono:

- durezza estremamente elevata
- grande resistenza all'usura
- eccellente stabilità del filo tagliente
- elevata qualità superficiale del pezzo lavorato
- lunga durata utensile

Queste caratteristiche rendono il PCD uno dei materiali più performanti per applicazioni specifiche.

Limiti

Nonostante le prestazioni molto elevate, il PCD presenta alcuni limiti importanti.

Tra i principali si possono evidenziare:

- costo elevato
- sensibilità agli urti
- impossibilità di utilizzo su materiali ferrosi ad alte temperature

Quest'ultimo limite è legato alla reazione chimica tra il carbonio del diamante e il ferro, che può portare a una rapida degradazione dell'utensile.

Considerazioni ingegneristiche di scelta

Gli utensili in PCD vengono scelti principalmente quando il fattore determinante è la **resistenza all'usura** e la possibilità di ottenere una lunga durata utensile anche a velocità di taglio elevate.

Sono particolarmente indicati quando:

- il materiale lavorato è altamente abrasivo
- si richiede una qualità superficiale elevata
- il volume produttivo giustifica l'impiego di utensili ad alte prestazioni

In queste condizioni il PCD rappresenta una delle soluzioni tecnologicamente più efficaci disponibili per le lavorazioni meccaniche.

Utensili ceramici

Natura del materiale

Gli utensili ceramici appartengono alla famiglia dei materiali sinterizzati a base di ossidi, nitrucci o carburi caratterizzati da durezza molto elevata e notevole stabilità alle alte temperature. A differenza dei carburi cementati, nei quali è presente una fase metallica legante, gli utensili ceramici sono costituiti prevalentemente da fasi ceramiche con leganti minimi o assenti.

I materiali ceramici utilizzati per utensili da taglio sono generalmente basati su:

- ossido di alluminio (Al_2O_3)
- nitrucci di silicio (Si_3N_4)
- ceramiche SiALON
- ceramiche rinforzate con whisker

Questi materiali possiedono una struttura cristallina estremamente stabile e presentano una durezza molto elevata anche a temperature molto alte, caratteristica fondamentale nelle lavorazioni ad alta velocità.

Evoluzione tecnologica

L'introduzione degli utensili ceramici risale alla seconda metà del XX secolo, quando la crescente richiesta di produttività ha spinto la ricerca verso materiali in grado di operare a temperature sempre più elevate.

Le prime ceramiche utilizzate erano basate su ossido di alluminio sinterizzato, caratterizzate da grande durezza ma anche da una fragilità significativa.

Con il progresso della tecnologia dei materiali sono state sviluppate nuove tipologie di ceramiche più resistenti alla frattura, tra cui:

- ceramiche rinforzate con whisker di carburo di silicio
- ceramiche a base di nitrucci di silicio

- ceramiche SiALON

Queste evoluzioni hanno migliorato la resistenza meccanica e ampliato il campo di applicazione degli utensili ceramici.

Processo di produzione

Gli utensili ceramici vengono prodotti mediante processi di sinterizzazione di polveri ceramiche.

Le principali fasi del processo sono:

1. preparazione delle polveri ceramiche
2. miscelazione con eventuali additivi o rinforzi
3. pressatura della polvere in stampi
4. sinterizzazione ad alta temperatura

Durante la sinterizzazione le particelle ceramiche si uniscono formando un materiale compatto e altamente resistente.

A differenza dei metalli e dei carburi cementati, non si verifica fusione della fase principale: il processo avviene attraverso diffusione solida e crescita dei grani.

Struttura microstrutturale

La microstruttura degli utensili ceramici è costituita da:

- grani ceramici molto duri
- eventuali fasi secondarie o rinforzi

Nel caso delle ceramiche rinforzate con whisker, sottili fibre ceramiche disperse nella matrice contribuiscono ad aumentare la resistenza alla propagazione delle fratture.

La struttura risultante presenta una elevata durezza e stabilità termica, ma una tenacità generalmente inferiore rispetto ai materiali metallici o compositi con legante metallico.

Proprietà principali

Gli utensili ceramici presentano alcune proprietà particolarmente favorevoli per lavorazioni ad alta velocità.

Tra le caratteristiche più rilevanti si possono evidenziare:

- durezza molto elevata
- eccellente stabilità alle alte temperature
- ottima resistenza all'usura
- elevata resistenza all'ossidazione

Queste proprietà consentono di operare a velocità di taglio significativamente superiori rispetto ai carburi cementati in determinate applicazioni.

Meccanismi di usura

Gli utensili ceramici sono soggetti principalmente a fenomeni di usura abrasiva e a processi di degradazione del filo tagliente dovuti alle elevate temperature nella zona di taglio.

I meccanismi più comuni includono:

Usura abrasiva

dovuta allo scorrimento di particelle dure sulla superficie dell'utensile.

Usura di fianco

progressiva riduzione del filo tagliente nella zona di contatto con il pezzo.

Microfratture del filo

che possono verificarsi in presenza di sollecitazioni meccaniche elevate o vibrazioni.

La fragilità intrinseca dei materiali ceramici rende questi utensili particolarmente sensibili agli urti.

Applicazioni industriali

Gli utensili ceramici sono utilizzati principalmente nelle lavorazioni ad alta velocità dove la stabilità termica del materiale rappresenta un vantaggio significativo.

Le applicazioni più comuni includono:

- lavorazioni ad alta velocità su materiali resistenti al calore
- lavorazioni su materiali abrasivi
- lavorazioni di sgrossatura e semifinitura in condizioni stabili

In queste situazioni la capacità della ceramica di mantenere durezza e resistenza all'usura anche a temperature elevate consente di ottenere elevate produttività.

Vantaggi

Tra i principali vantaggi degli utensili ceramici si possono evidenziare:

- elevata durezza
- grande resistenza all'usura
- eccellente stabilità alle alte temperature
- possibilità di lavorare a velocità di taglio molto elevate

Queste caratteristiche rendono le ceramiche particolarmente adatte alle lavorazioni ad alta produttività.

Limiti

Il principale limite degli utensili ceramici è rappresentato dalla **bassa tenacità**.

Di conseguenza:

- sono molto sensibili agli urti
- non tollerano bene vibrazioni e tagli interrotti
- richiedono macchine utensili rigide e condizioni di lavorazione stabili

In presenza di sollecitazioni meccaniche elevate possono verificarsi fratture improvvise del filo tagliente.

Considerazioni ingegneristiche di scelta

L'impiego degli utensili ceramici è giustificato quando il processo di lavorazione consente di sfruttare le loro elevate prestazioni termiche e la resistenza all'usura.

Sono particolarmente indicati quando:

- la lavorazione è stabile
- il taglio è continuo
- si desidera operare a velocità molto elevate
- il materiale lavorato presenta elevata resistenza all'usura

In queste condizioni le ceramiche rappresentano una soluzione efficace per aumentare la produttività del processo.

Meccanismi e forme di usura degli utensili da taglio

Come e perchè gli utensili si deteriorano durante il taglio

I fenomeni di usura osservabili negli utensili da taglio non sono casuali, ma derivano da specifici meccanismi fisici e tribologici che si sviluppano nella zona di contatto tra utensile, truciolo e materiale lavorato.

Durante il processo di taglio dei metalli, l'utensile è sottoposto simultaneamente a carichi meccanici molto elevati, temperature estremamente alte e condizioni di attrito

intenso. In queste condizioni si attivano diversi meccanismi di degrado che portano progressivamente alla perdita di integrità del filo tagliente.

I principali meccanismi di usura riconosciuti nella tecnologia delle lavorazioni sono:

- usura abrasiva
- usura adesiva
- usura per diffusione
- usura per ossidazione
- fatica termica

Nella pratica industriale questi fenomeni raramente agiscono in modo isolato; più frequentemente si manifestano in combinazione, determinando le diverse forme di usura osservabili sugli inserti.

Usura abrasiva

L'usura abrasiva è uno dei meccanismi più comuni nelle lavorazioni meccaniche. È causata dall'azione di particelle dure presenti nel materiale lavorato o nel truciolo che scorrono sulla superficie dell'utensile.

Queste particelle agiscono come micro-abrasivi e provocano una progressiva asportazione di materiale dall'utensile. Il risultato è la formazione della tipica banda di usura sul fianco.

Questo fenomeno è particolarmente evidente nella lavorazione di materiali contenenti carburi duri, inclusioni o fasi abrasive.

Usura adesiva

L'usura adesiva si verifica quando, a causa delle elevate pressioni e temperature nella zona di taglio, si stabilisce un fenomeno di adesione tra il materiale del pezzo e quello dell'utensile.

Durante lo scorrimento del truciolo, piccole porzioni di materiale possono aderire al tagliente e successivamente staccarsi trascinando con sé parte dell'utensile.

Questo meccanismo è alla base della formazione del **tagliente di riporto**, fenomeno tipico nella lavorazione di materiali duttili.

Usura per diffusione

A temperature molto elevate possono verificarsi fenomeni di **diffusione atomica** tra gli elementi presenti nel materiale utensile e quelli del materiale lavorato.

Questo processo provoca un progressivo impoverimento della superficie dell'utensile, con conseguente perdita di durezza e accelerazione dell'usura.

La diffusione è particolarmente rilevante nelle lavorazioni ad **alta velocità di taglio**, dove le temperature nella zona di contatto possono diventare molto elevate.

Usura per ossidazione

In presenza di temperature elevate e atmosfera ossidante, sulla superficie dell'utensile possono formarsi strati di ossidi.

Questi ossidi vengono successivamente rimossi dallo scorrimento del truciolo, determinando una progressiva degradazione della superficie dell'utensile.

Il fenomeno è particolarmente rilevante nelle lavorazioni a **temperature molto elevate**.

Fatica termica

Durante alcune lavorazioni l'utensile è sottoposto a cicli termici ripetuti dovuti al riscaldamento durante il taglio e al raffreddamento quando il filo esce dalla zona di contatto.

Queste variazioni di temperatura possono generare tensioni interne nel materiale utensile che portano alla formazione di **microcricche superficiali**.

Con il tempo queste cricche possono propagarsi e causare **scheggiature o fratture del tagliente**.

Collegamento con i fenomeni di usura osservabili

I diversi meccanismi di usura descritti sono responsabili delle principali forme di degrado osservabili sugli utensili da tornitura, come:

- usura sul fianco
- craterizzazione
- tagliente di riporto
- usura per intaglio
- microscheggiature e fratture del tagliente

Comprendere questi meccanismi permette non solo di interpretare correttamente il comportamento degli utensili durante la lavorazione, ma anche di **ottimizzare la scelta del materiale dell'inserto, della geometria di taglio e dei parametri di lavorazione**.

Forme tipiche di usura degli inserti

Le diverse forme di usura sugli utensili da tornitura sono illustrate nelle figure seguenti

FOTO 1

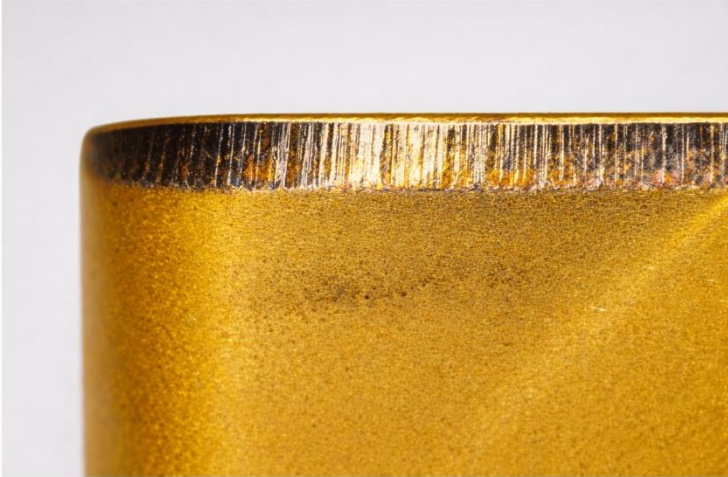
Tagliente di riporto (Built-Up Edge)



Formazione di tagliente di riporto su inserto da tornitura.

FOTO 2

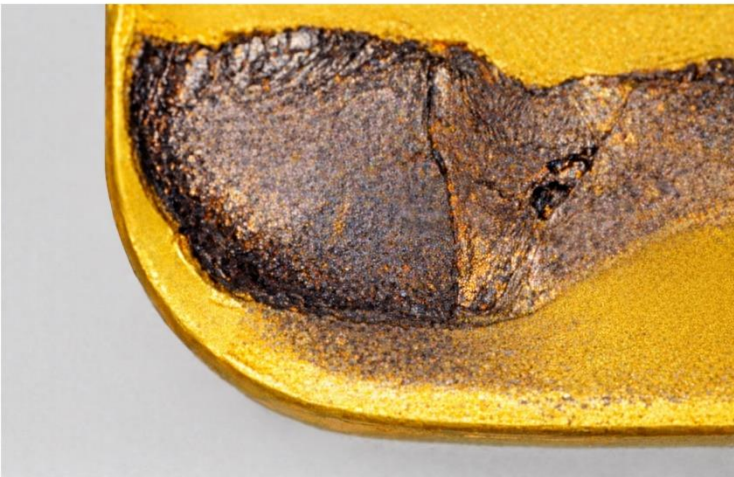
Usura sul fianco (Flank wear)



Usura progressiva sul fianco dell'inserto.

FOTO 3

Craterizzazione



Craterizzazione sulla faccia di taglio provocata dallo scorrimento del truciolo.

FOTO 4

Usura per intaglio



Usura localizzata nella zona di ingresso del taglio.

FOTO 5
Microscheggiature del tagliente con riporto



Micro scheggiature del filo dovute a vibrazioni o instabilità del sistema con incollaggio di riporto.

FOTO 6
Scheggiatura del tagliente



Scheggiatura del filo durante lavorazioni con taglio interrotto.

FOTO 7
Deformazione plastica del tagliente



Deformazione plastica del filo causata da sovraccarico termico.

FOTO 8

Deformazione plastica e criccate dell'inserto



Deformazione plastica del profilo con criccate causata da sovraccarico termico e meccanico.

Confronto tecnico tra i principali materiali per utensili

Materiale	Durezza	Tenacità	Stabilità termica	Resistenza usura	Sensibilità vibrazioni	Campo di utilizzo
HSS	media	alta	media	media	bassa	Utensili riaffilabili
Metallo duro	alta	media	alta	alta	media	Lavorazioni generali
Cermet	alta	bassa	alta	alta	alta	Finitura acciai
CBN	molto alta	bassa	molto alta	molto alta	alta	Acciai temprati
PCD	estremamente alta	bassa	alta	estremamente alta	alta	Non ferrosi
Ceramica	molto alta	molto bassa	molto alta	molto alta	molto alta	Alte velocità

Considerazione finale

Non esiste un materiale da utensile universalmente migliore degli altri. Ogni materiale rappresenta un compromesso tra durezza, tenacità, stabilità termica e resistenza all'usura.

La scelta corretta dipende sempre dalle condizioni di lavorazione, dalla stabilità del sistema macchina-utensile-attrezzaggio e dagli obiettivi produttivi del processo.

Conoscere le caratteristiche dei diversi materiali e i meccanismi di usura che li interessano consente di effettuare una scelta tecnica consapevole e di ottimizzare il rendimento dell'intero processo di lavorazione.