

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DEI MATERIALI**

**Tesi di laurea magistrale in Ingegneria dei Materiali**

**EFFETTO DEI PARAMETRI DI TORNITURA  
SULL'USURA E SULLA QUALITÀ DEI PRODOTTI DI  
CoCrMo**

*Relatore: Prof. Stefania Bruschi*

*Correlatore: Dott. Alberto Bordin*

*Laureanda: JULIE AGOSTINI*

ANNO ACCADEMICO 2013-2014



# Indice

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1: STATO DELL'ARTE .....	3
1.1    PROCESSO DI TORNITURA .....	3
1.2    PROVE DI LAVORABILITÀ .....	6
1.2.1    Caratterizzazione integrità superficiale.....	6
1.2.2    Studio sulla morfologia del truciolo.....	12
1.2.3    Usura dell'utensile .....	15
CAPITOLO 2: I MATERIALI .....	19
2.1    IL COBALTO .....	19
2.1.1    Le leghe di Cobalto .....	21
2.1.2    Le leghe di Cobalto per applicazioni biomedicali .....	24
2.1.3    Produzione delle leghe Co-Cr .....	28
2.2    LEGA ASTM F75 PRODOTTA PER ELECTRON BEAM MELTING.....	32
2.2.1    Processo di formatura.....	32
2.2.2    Microstruttura.....	34
2.2.3    Proprietà meccaniche e applicazioni.....	36
CAPITOLO 3: PROVE DI LAVORABILITÀ.....	39
3.1    CAMPAGNA PROVE.....	39
3.1.1    Lega ASTM F1537 CoCrMo .....	41
3.1.2    Lega ASTM F75 CoCrMo EBM .....	42
3.2    METODOLOGIE DI ANALISI .....	43
3.2.1    Rugosimetro .....	43
3.2.2    Profilometro .....	44
3.2.3    Microscopio ottico .....	44
3.2.4    Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) e Electronic Data System (EDS).....	45
3.2.5    Microdurezza .....	49

CAPITOLO 4: RISULTATI .....	51
4.1 USURA DELL'INSERTO.....	51
4.1.1 Andamento labbro d'usura Vbc - CoCrMo F1537 .....	52
4.1.2 Foto inserti impiegati su CoCrMo F1537: dipendenza dei parametri di processo.....	55
4.1.3 Analisi EDS – CoCrMo F1537 .....	58
4.1.4 Foto inserti impiegati su CoCrMo F75: dipendenza dei parametri di processo.....	60
4.1.5 Analisi EDS – CoCrMo F75 .....	64
4.2 QUALITÀ SUPERFICIALE .....	66
4.2.1 Andamenti di Ra al variare dei parametri di processo - CoCrMo F1537 .....	66
4.2.2 Immagini al profilometro della superficie lavorata - CoCrMo F1537.....	69
4.2.3 Difetti superficiali - CoCrMo F1537 .....	71
4.2.4 Andamenti di Ra al variare dei parametri di processo - CoCrMo F75 EBM.....	73
4.2.5 Immagini al profilometro della superficie lavorata - CoCrMo F75 EBM.....	74
4.3 MICROSTRUTTURA .....	76
4.3.1 Analisi cristallografica: micrografie - CoCrMo F1537.....	76
4.3.2 Microdurezza - CoCrMo F1537.....	77
4.3.3 Analisi cristallografica: micrografie - CoCrMo F75 EBM.....	80
4.3.4 Microdurezza - CoCrMo F75 EBM .....	81
4.4 MORFOLOGIA DEL TRUCIOLO .....	83
4.4.1 Foto della morfologia dei trucioli di CoCrMo F1537.....	83
4.4.2 Segmentazione del truciolo della lega CoCrMo .....	87
4.4.3 Foto della morfologia dei trucioli di CoCrMo F75 EBM .....	88
CONCLUSIONI.....	89
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	91

# Introduzione

Nell'ambito delle protesi biomedicali, negli ultimi decenni, sta prendendo sempre più piede l'utilizzo della tecnologia della polvere per produrre gli elementi metallici. I materiali sinterizzati per EBM (Electron Beam Melting) risultano avere prestazioni meccaniche paragonabili a quelle del materiale bulk, tuttavia non si conosce ancora la loro lavorabilità nelle operazioni di asportazione di truciolo.

Le tecnologie di Rapid Manufacturing, come il processo di tornitura esaminato in questa tesi, permettono di ottenere un prodotto semifinito da un modello geometrico, limitando così l'utilizzo delle macchine utensili. Quest'aspetto è un vantaggio dal punto di vista economico, anche se comporta una conoscenza accurata degli effetti che la lavorazione produce sul materiale.

L'Eurocoating SPA, azienda leader nel mercato di protesi ortopediche, all'interno del progetto NEMO si occupa di ottimizzare la lavorazione per asportazione di truciolo di leghe d'interesse biomedicale attraverso analisi dei parametri di taglio e dell'effetto di questi sul materiale lavorato. Il lavoro di questa tesi, svolto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova si occupa proprio di questo.

L'obiettivo principale dello studio è la valutazione dell'effetto che i parametri di tornitura, come velocità di taglio e avanzamento, hanno sull'usura e sulla qualità di due tipologie di leghe di CoCrMo: ASTM F1537 e ASTM F75 prodotta per EBM.

In letteratura non sono presenti informazioni riguardanti la lavorabilità delle leghe di CoCrMo ed è per questo motivo che si colloca l'importanza di uno studio che colleghi i parametri di processo (in questo caso di tornitura), al comportamento del materiale che viene lavorato.

La lavorabilità di un materiale viene definita come l'attitudine di un materiale a essere lavorato, l'usura che crea sull'utensile e la morfologia di truciolo ottenuto. Un giudizio di buona lavorabilità viene determinato per mezzo di prove pratiche che prendono in considerazione fattori come la microstruttura, l'integrità superficiale in termini di rugosità e difetti, la durata dell'utensile e la morfologia del truciolo.

Nell'ambito di quest'attività sono state implementate due prove di lavorabilità al tornio su due diverse leghe di CoCrMo, la prima prodotta attraverso un meccanismo di forgiatura mentre la seconda per tecnologia delle polveri con il processo EBM. Lo scopo delle prove è stato il medesimo: determinare l'effetto che i parametri di taglio hanno sul materiale e quindi ottimizzare il processo di lavorazione in termini di qualità superficiale, usura dell'inserito e morfologia del truciolo.

I parametri di processo che sono stati tra loro comparati sono: velocità di taglio, velocità di avanzamento e condizione di lubrificazione. L'inserito in carburo di tungsteno utilizzato per le lavorazioni è stato scelto da catalogo e fornito da Sandvik, con un rivestimento in TiAlN è adatto per le lavorazioni di superleghe a base cobalto.

Mantenendo la profondità di passata costante per una condizione di semifinitura e, variando la velocità di taglio tra 40 e 60 m/min, l'avanzamento da 0,1 a 0,15 mm/rev e l'utilizzo del lubrificante, si è potuta fare un'analisi sull'effetto dei parametri per determinare le condizioni più idonee alla realizzazione di elementi con una buona finitura superficiale.

Gli aspetti che scelti per lo studio di lavorabilità sono: l'usura dell'inserto, la rugosità superficiale attraverso il parametro Ra calcolato con un rugosimetro e l'osservazione di profili torniti ottenuti al profilometro, analisi cristallografica e dei difetti superficiali attraverso il microscopio elettronico a scansione e infine la morfologia del truciolo.

Gli inserti utilizzati sono stati valutati per la prima lega misurando l'ampiezza del labbro di usura sul fianco dell'inserto attraverso il parametro Vbc, secondo normativa ISO 3865, mentre per la lega ASTM F75, le superfici lavorate e i trucioli prodotti sono stati analizzati qualitativamente attraverso il confronto d'immagini al SEM prese nelle diverse condizioni di processo e lubrificazione per entrambe le leghe.

Attraverso un'accurata preparazione metallografica di frammenti di truciolo, per la lega ASTM F1537, si è potuto analizzare il meccanismo di segmentazione di questa lega riportandolo al confronto con altre tipologie di leghe in letteratura.

# Capitolo 1

## Stato dell'arte

### 1.1 Processo di tornitura

Il processo di tornitura[1] è una delle lavorazioni meccaniche più utilizzate in produzione. I pezzi prodotti mediante colata, forgiatura, o altri processi di formatura spesso richiedono ulteriori lavorazioni o operazioni di finitura per ottenere caratteristiche specifiche come ad esempio l'accuratezza dimensionale o la finitura superficiale.

Le lavorazioni per asportazione sono processi nei quali il pezzo viene lavorato rimuovendo materiale e modificandone le superfici consentendo di mantenere buone tolleranze dimensionali e finitura superficiale.

Il materiale viene rimosso dalla superficie del pezzo producendo truciolo attraverso un meccanismo che può essere schematizzato dal modello bidimensionale illustrato in figura 1.1

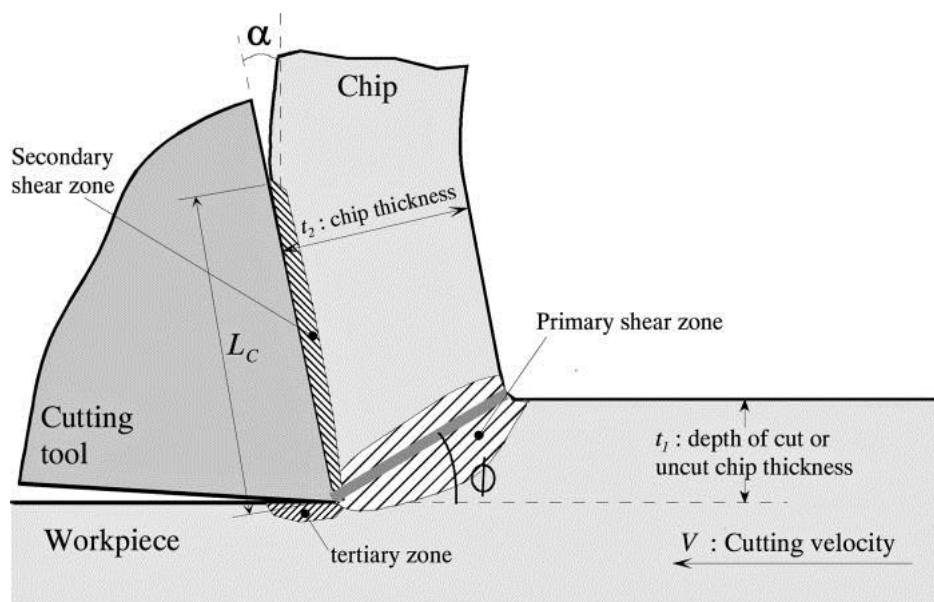


Figura 1.1 Modello bidimensionale di taglio ortogonale[20]

Lo schema mostra come il truciolo (chip) si formi per scorrimento dell'utensile (tool) sulla superficie del pezzo a una certa velocità di taglio  $V_c$ , profondità di passata  $t_0$  e avanzamento  $f$ . Lo spessore del truciolo è indicato come  $t_c$  generalmente sempre diverso da  $t_0$ .

Nel processo le principali variabili indipendenti:

- Tipo di utensile e sue condizioni
- Forma dell'utensile, finitura superficiale e suo grado di affilatura
- Materiale del pezzo, sue condizioni, temperatura a cui avviene la lavorazione
- Parametri di taglio: velocità, avanzamento profondità di passata
- Tipo di fluidi lubrorefrigeranti se utilizzati
- Caratteristiche della macchina utensile (rigidezza e smorzamento)
- Porta utensile e attrezzature di fissaggio

Le variabili dipendenti invece sono:

- Tipologia di truciolo prodotto
- Forza richiesta ed energia dissipata nel processo di taglio
- Innalzamento della temperatura del pezzo, del truciolo e dell'utensile
- Usura, scheggiatura e rottura dell'utensile
- Finitura e integrità superficiale del pezzo dopo lavorazione

Nel modello di taglio ortogonale, chiamato così perché il tagliente dell'utensile è perpendicolare alla direzione di taglio, l'utensile è caratterizzato da un angolo di spoglia superiore  $\alpha$  e da un angolo di spoglia inferiore, la somma di questi due angoli con l'angolo di taglio (angolo di taglio) è pari a  $90^\circ$ . I trucioli, vengono a formarsi per mezzo di un meccanismo di scorrimento lungo un piano, denominato appunto piano di scorrimento che forma un angolo di scorrimento  $\phi$  con la superficie del pezzo. Sotto questo piano, il pezzo subisce solo una piccola deformazione elastica, mentre sopra tale piano il truciolo è formato e scorre verso il petto dell'utensile.

Lo scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile causa attrito che comporta un gran contributo all'innalzamento della temperatura nella zona di taglio. Lo spessore del truciolo è indicato come  $t_2$  generalmente sempre diverso da  $t_1$  che indica la profondità di passata. Un parametro molto importante noto come rapporto di taglio viene definito come:

$$r = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (1.1)$$

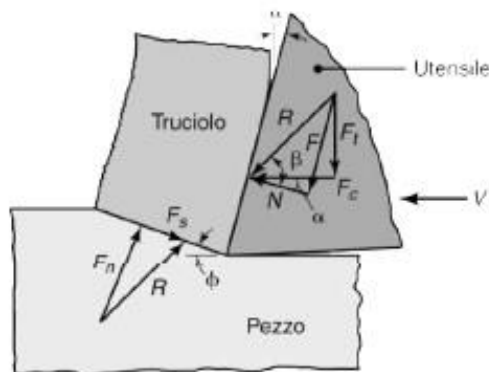
Lo spessore del truciolo è sempre maggiore della profondità di passata, pertanto il valore di  $r$  è sempre inferiore all'unità.

Nei processi di asportazione come in tornitura è fondamentale conoscere le forze in gioco poiché un'accurata progettazione della macchina utensile consente di ridurre deformazioni eccessive e vibrazioni al fine di ottenere un'adeguata accuratezza dimensionale.

Il pezzo deve essere in grado di resistere alla forza di taglio senza eccessive deformazioni per mantenere la tolleranza dimensionale.



Le forze si distinguono principalmente in: forza di taglio  $F_c$  la quale agisce nella direzione della velocità di taglio  $V_c$  e la forza di repulsione  $F_t$  che agisce nella direzione perpendicolare alla velocità di taglio ovvero perpendicolare al pezzo. Queste due forze producono una forza risultante  $R$  che si può dividere in due componenti sul petto dell'utensile; una forza di attrito,  $F$ , lungo l'interfaccia utensile-truciolo e una forza normale,  $N$ , perpendicolare a tale interfaccia.



**Figura 1.2** Modello delle forze nel taglio ortogonale

Secondo lo schema mostrato in figura 1.2 tali forze si possono calcolare:

$$F = R \sin \beta \quad (1.2)$$

$$N = R \cos \beta \quad (1.3)$$

dove  $\beta$  rappresenta l'angolo di attrito e il rapporto tra  $F$  e  $N$  indica il coefficiente di attrito,  $\mu$ , all'interfaccia utensile-truciolo

$$\mu = \tan \beta = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (1.4)$$

Nelle operazioni di taglio dei metalli  $\mu$  assume valori compresi tra 0,5 e 2 ovvero il truciolo incontra una certa resistenza per attrito nello scorrimento sul petto dell'utensile. Il valore di  $\mu$  inoltre si riduce di molto passando da una condizione di lavorazione in assenza di lubrificante a una lavorazione con lubrificazione.

Le tensioni localizzate nella zona di taglio e le tensioni normali sul petto dell'utensile sono molto elevate, poiché le aree di contatto sono molto piccole; questo comporta una forte correlazione delle forze di taglio con l'usura dell'utensile.

La forza di taglio  $F_c$  aumenta all'aumentare della profondità di passata, al diminuire dell'angolo di spoglia e al diminuire della velocità. Un altro importante parametro è il raggio di raccordo del tagliente: maggiore è il raggio (più è usurato l'utensile), maggiore sarà la forza di taglio.

## **1.2 Prove di lavorabilità**

La lavorabilità di un materiale non ha una definizione diretta, in termini di qualità o numeri. In senso lato, indica la capacità del materiale del pezzo di essere lavorato, l'usura che crea sul tagliente e la formazione del truciolo ottenibile.

Il concetto di lavorabilità, generalmente indica una lavorazione senza inconvenienti e una durata del tagliente adeguata.

La maggior parte dei giudizi su tale proprietà di un determinato materiale sono il risultato di prove pratiche, e di confronti con altre prove eseguite su altre tipologie di materiali in condizioni approssimativamente simili. Durante queste prove, si prendono in considerazione fattori come: la microstruttura, la tendenza all'incollamento, la rugosità superficiale, la durata dell'utensile, la morfologia del truciolo ecc.

Una "buona lavorabilità" viene definita per un materiale che presenta integrità superficiale accettabile, elevata durata dell'utensile e la formazione di un truciolo continuo che non interferisca con il pezzo durante la lavorazione.

Sono stati condotti molti studi scientifici per cercare di valutare al variare delle condizioni di processo come cambia la lavorabilità del materiale in esame ed è argomento di questo studio valutare come velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata e assenza di refrigerante influiscono su questo parametro in termini di integrità superficiale, usura dell'utensile e morfologia del truciolo prodotto.

### *1.2.1 Caratterizzazione integrità superficiale*

Obiettivo importante in tutte le lavorazioni è realizzare superfici non deteriorate e con finiture sempre più spinte. Tali irregolarità possono essere dovute al processo di lavorazione, a disomogeneità del materiale, presenza di vibrazioni, interazioni con l'ambiente ecc.

L'integrità superficiale è una misura della qualità della superficie lavorata e viene definita dallo stato meccanico, metallurgico e chimico di questa con parametri come la rugosità superficiale, variazioni di microdurezza, cambiamenti strutturali e tensioni residue, ecc.

Tra questi elementi, le tensioni residue e la microstruttura nello strato superficiale come anche la rugosità giocano un ruolo fondamentale nel determinare le prestazioni di biomateriali che necessitano di rigorosi requisiti per dispositivi biomedici.

Migliorare le proprietà e l'integrità superficiale è stato l'obiettivo di molti ricercatori come anche l'impatto che l'integrità superficiale ha sulle performance del materiale.

### Rugosità superficiale

La misura di rugosità[2] si effettua rilevando il profilo ottenuto selezionando l'oggetto con un piano normale alla superficie e con direzione ortogonale all'orientamento principale dei solchi.

Il grado di finitura superficiale è particolarmente importante poiché influenza molte proprietà, fra le quali:

- Usura
- Resistenza meccanica, a fatica, alla corrosione
- Aspetto estetico

I parametri scelti per tale valutazione sono  $R_a$  e  $R_z$  dove  $R_a$  rappresenta la media aritmetica delle distanze dei punti dalla linea media di riferimento espressa in  $\mu\text{m}$  mentre  $R_z$  è la distanza tra due rette parallele alla linea media tracciate a una distanza pari alla media dei 5 picchi più alti ( $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$ ) e alla media delle 5 valli più basse ( $y_{1'}, y_{2'}, y_{3'}, y_{4'}, y_{5'}$ ) nell'intervallo della lunghezza di base.

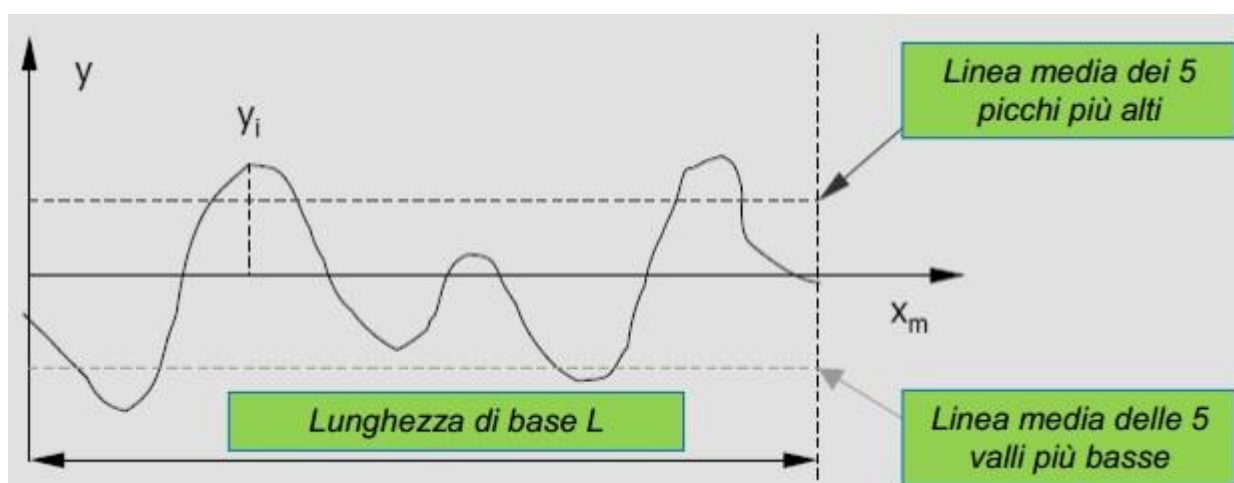


Figura 0.3 Indicazione per il calcolo di  $R_z$ [21]

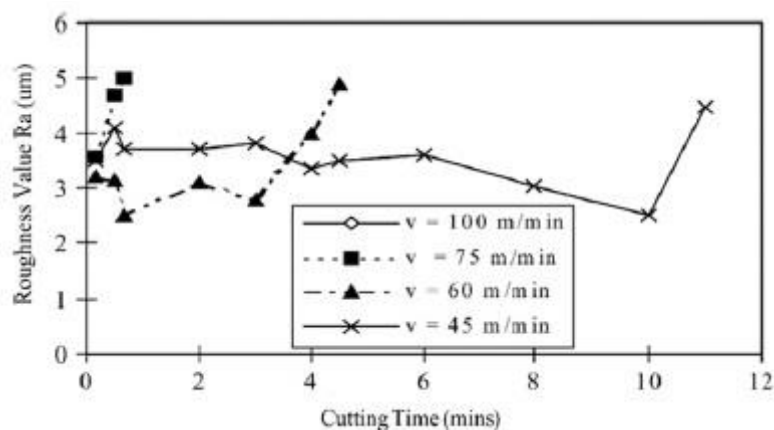
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (1.5)$$

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_i - \sum_{i'=1}^5 y_{i'}}{5} \quad (1.6)$$

Mediante l'utilizzo di un rugosimetro portatile durante le prove si è potuto misurare il parametro  $R_a$  al variare delle condizioni di processo (velocità di taglio e avanzamento) in un

certo numero di intervalli di tempo fino alla durata limite dell'utensile o in alcuni casi fino a un tempo designato come fine vita utile.

In questo modo mantenendo costanti le condizioni all'interno dei vari intervalli di tempo è possibile costruire un profilo di rugosità superficiale al variare del tempo. Un materiale che presenta, a parità di condizioni di processo e durata dell'utensile, valori di Ra minori può essere definito più lavorabile.



**Figura 0.4** Andamenti di Ra in funzione del tempo di lavorazione[3]

### *Difetti superficiali[3]*

La caratterizzazione della superficie lavorata viene anche determinata attraverso la quantificazione dei difetti presenti in superficie.

Ci sono molte forme di difetti superficiali riportati in letteratura: graffiature superficiali, fessurazioni, segni di avanzamento, strappi superficiali, formazione di uno strato di truciolo, detriti di microtrucioli, grani deformati, cavità superficiali, zone di scorrimento, materiale ripiegato sulla superficie, ecc.

I parametri di taglio possono influenzare questi difetti in molti modi: i segni di dell'avanzamento sono efficaci nella lavorazione ma la loro gravità può essere alterata dalla variazione del grado di avanzamento mentre la velocità di taglio influenza la presenza di detriti di truciolo e strappi di materiale sulla superficie.

Molti materiali includono nella loro struttura particelle di carburo presenti anche in molti materiali di rivestimento. Mentre il pezzo viene lavorato e l'inserto si usura queste particelle di carburo vengono rimosse dalla superficie lavorata o dall'utensile e si dispongono sulla superficie del materiale. Questo fenomeno può diventare un serio problema in termini di integrità superficiale specialmente quando sia la velocità di taglio che l'avanzamento sono molto bassi.

Durante le lavorazioni è infatti fondamentale ottimizzare le condizioni di taglio per minimizzare la presenza di difetti superficiali. Tuttavia l'accordo dei parametri di taglio con i difetti superficiali è molto difficile di conseguenza questi non si possono mai eliminare completamente.

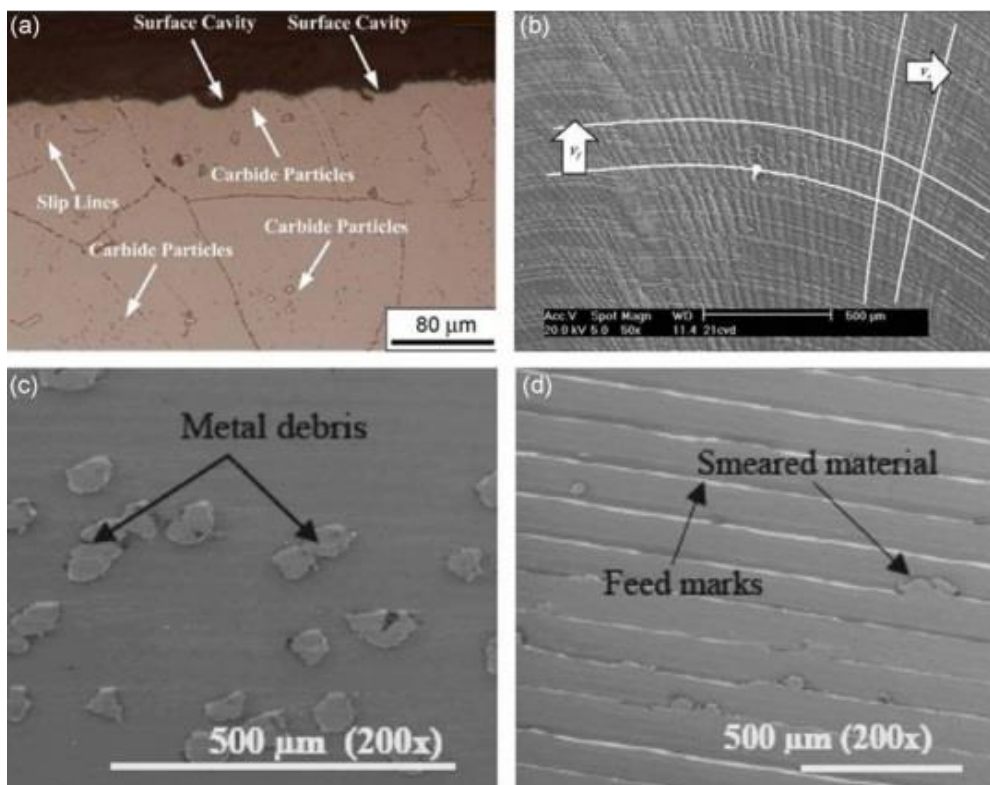


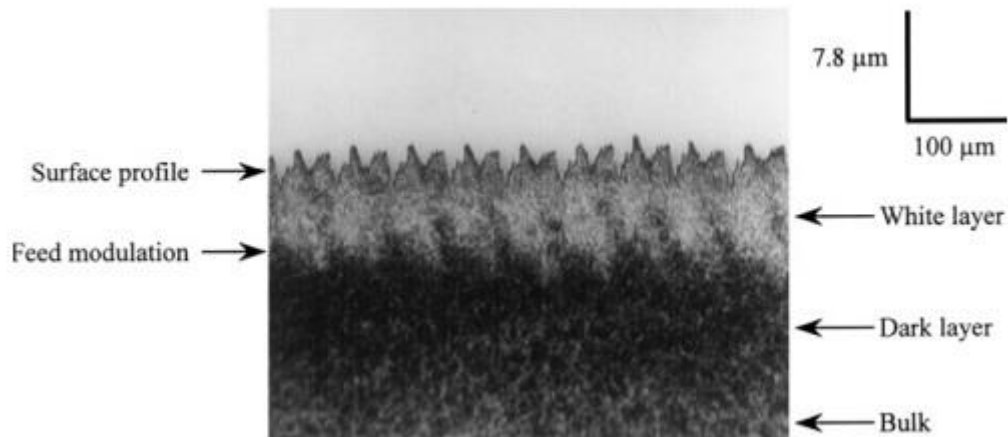
Figura 0.4 Difetti superficiali[3]

### *Alterazioni microstrutturali*

Durante la lavorazione, il materiale è sottoposto a energie termiche, meccaniche e chimiche che possono portare ad alterazioni microstrutturali come cambiamenti di fase, ricristallizzazione e adesione di particelle di truciolo nella zona sottostante alla superficie lavorata.

Le temperature in gioco e gli effetti meccanici della lavorazione (alte tensioni e deformazioni) sono le ragioni principali responsabili delle alterazioni microstrutturali del materiale nonché di trasformazioni o deformazioni plastiche. La profondità della zona alterata si è osservata aumentare all'aumentare della velocità di taglio e dell'avanzamento; inoltre una lavorazione prolungata con utensili usurati aumenta le alterazioni microstrutturali del materiale sotto forma di deformazioni plastiche. Si ritiene che queste alterazioni possano portare alla formazione di uno strato bianco quando l'invecchiamento è il fattore dominante mentre si

osserva una banda più scura tra lo strato bianco e il materiale bulk in presenza di ricristallizzazione come mostrato in figura 1.5.



**Figura 0.5** *Strato formato dopo tornitura di un acciaio[3]*

### *Deformazione plastica*

La maggiore minaccia per l'integrità superficiale deriva dalla deformazione plastica del pezzo durante la lavorazione, ed è per questo essenziale studiare gli effetti di questa deformazione.

La deformazione plastica della zona superficiale è causata da molti parametri come i parametri di taglio (velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata), i parametri che riguardano l'utensile (angolo di spoglia superiore, forma dell'utensile, rivestimento, usura) e caratteristiche del pezzo lavorato (tipo di materiale, dimensione dei grani).

Molte ricerche hanno riscontrato che la maggior causa della deformazione plastica riguarda proprio il materiale che viene lavorato. Inoltre è stato riscontrato che stress termici e meccanici contribuiscono a una maggiore deformazione plastica.

In questo studio mantenendo costanti i parametri quali profondità di passata, angolo di spoglia superiore, morfologia e rivestimento dell'utensile è stata evidenziata la dipendenza dei parametri di taglio, velocità di taglio e avanzamento, sulla deformazione plastica superficiale in seguito a lavorazioni effettuate a intervalli di tempo ben definiti.

Così facendo è stato inoltre possibile valutare come l'usura dell'inserto influisse anch'essa sulla deformazione plastica indotta durante le lavorazioni.

### *Incrudimento superficiale e microdurezza*

La superficie del pezzo viene sottoposta a lavorazioni successive come ad esempio sgrossatura, semi-finitura e finitura. Le caratteristiche dello strato superficiale lavorato, creato dalle successive passate di lavorazione, possono avere un'influenza significativa sulle prestazioni della lavorazione sulla successiva passata. Questa influenza diventa più importante per materiali che presentano un comportamento ad alto incrudimento come ad esempio le leghe di nichel, le quali in seguito alla lavorazione presentano uno strato incrudito. La durezza del materiale, dopo che questo è stato tornito, risulta maggiore nella zona superficiale rispetto all'interno del pezzo dove gli effetti termici e di deformazione sono neutralizzati. Questi cambiamenti di microdurezza sono inoltre collegati con problemi di integrità superficiale e sono stati studiati da molti ricercatori.

### *Tensioni residue*

Dopo il processo di lavorazione, il carico termomeccanico impresso sul pezzo viene rilasciato ma non tutta l'energia in gioco può essere recuperata. Parte di essa viene spesa nella deformazione plastica, che porta il materiale a presentare sollecitazioni particolare alle sue estremità libere come la zona superficiale. Queste sollecitazioni rimangono nel materiale anche quando il carico è stato rimosso e vengono chiamate tensioni residue.

Esse sono dovute principalmente alla deformazione superficiale del pezzo e agli effetti termici presenti in superficie dovuti alle condizioni di taglio e dell'utensile.

Le tensioni residue presentano un potenziale rischio per la formazione di cricche che durante le applicazioni possono propagarsi e portare alla rottura per fatica del pezzo.

Per questo è importante conoscere lo stato delle tensioni presenti nel materiale, compressione o trazione e la profondità in cui agiscono.

## 1.2.2 Morfologia del truciolo

La tipologia di trucioli[4] prodotti influenza in modo significativo la finitura superficiale e l'integrità della superficie, ma anche l'intera lavorazione per asportazione.

La morfologia del truciolo dipende essenzialmente sia da parametri di processo sia dalle caratteristiche intrinseche del materiale come mostrato in tabella:

Parametri di processo	Caratteristiche del materiale
- Velocità di taglio	- Calore specifico
- Avanzamento	- Conducibilità termica
- Angolo di spoglia superiore	- Durezza
	- Fragilità (duttilità)

**Tabella 0.1** Parametri da cui dipende la morfologia deltruciolo

Se si osservano al microscopio dei trucioli reali, prodotti con differenti condizioni di taglio, si posso osservare delle differenze di morfologia.

Il truciolo presenta due superfici: una che è stata in contatto con il petto dell'utensile e di conseguenza ha un aspetto lucido a causa dello sfregamento del truciolo l'altra che rappresenta la superficie originaria del pezzo non è entrata in contatto con alcun corpo solido e presenta un andamento a gradini dovuto al meccanismo di scorrimento.

Le principali tipologie di truciolo sono[1]:

- Truciolo continuo: si forma solitamente con velocità di taglio e angolo di spoglia superiore elevati. La deformazione del materiale avviene lungo una zona di scorrimento primaria ma il truciolo può presentare anche delle bande di scorrimento secondarie all'interfaccia utensile-truciolo come conseguenza dei fenomeni di attrito. La deformazione per scorrimento provoca un incrudimento del materiale del truciolo che diventa più duro e resistente rispetto al materiale del pezzo. Il truciolo continuo è associato a una buona qualità superficiale, anche se spesso viene considerato un fenomeno negativo poiché tende ad aggrovigliarsi attorno all'utensile.
- Truciolo discontinuo: è costituito da particelle metalliche distaccate tra di loro e si forma generalmente quando il materiale del pezzo lavorato è fragile e quindi non in grado di sopportare l'elevata deformazione, quando il materiale contiene inclusioni o impurezze o quando la velocità di taglio è molto bassa o molto elevata.
- Truciolo segmentato: è costituito da un numero di elementi collegati con alcune zone che presentano deformazione elevata e altre limitata con una morfologia a dente di



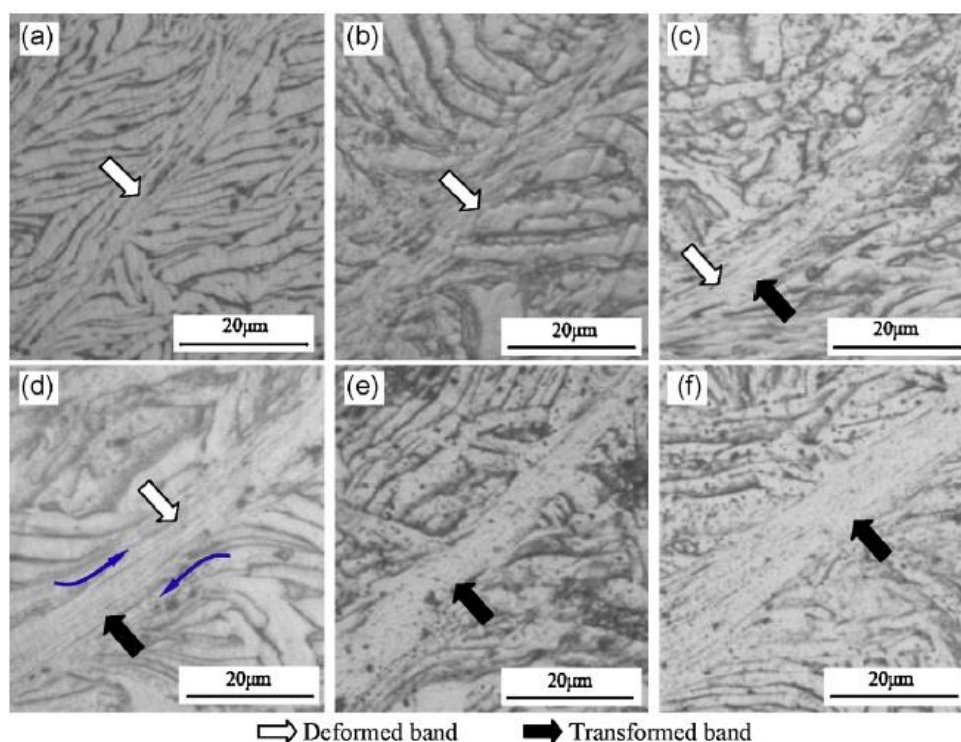
sega. Questo truciolo è tipico di metalli che presentano bassa conducibilità termica e con una tensione di scorrimento plastico che decresce rapidamente all'aumentare della temperatura (Ti e sue leghe).

In letteratura sono stati individuati due principali teorie per la formazione di truciolo segmentato: la prima riguardante il meccanismo della frattura e la seconda imputata alla formazione di bande adiabatiche di scorrimento (ASB)[6].

Il meccanismo della frattura prevede che una crepa si crei periodicamente sulla superficie libera del pezzo davanti all'utensile e si propaghi verso la punta di quest'ultimo, mentre una concentrazione degli sforzi elevata davanti alla punta dell'utensile comporta la formazione di una banda adiabatica di scorrimento.

Molti ricercatori hanno studiato quali caratteristiche di un materiale portassero alla segmentazione del truciolo per l'una o l'altra teoria indagando attraverso l'osservazione microstrutturale dei trucioli prodotti durante la lavorazione.

La caratterizzazione delle bande di scorrimento avviene attraverso osservazione al microscopio ottico o al microscopio elettronico a scansione (SEM) i quali permettono di analizzare l'evoluzione microstrutturale delle ASB che attraversa tre fasi: banda deformata, banda deformata con banda trasformata, banda trasformata.



**Figura 0.6** ASB: Bande deformate e trasformate[5]

Le bande deformate sono caratteristiche di basse velocità di taglio, presenza di deformazione plastica nella zona di scorrimento primaria ed elevate densità di dislocazioni.

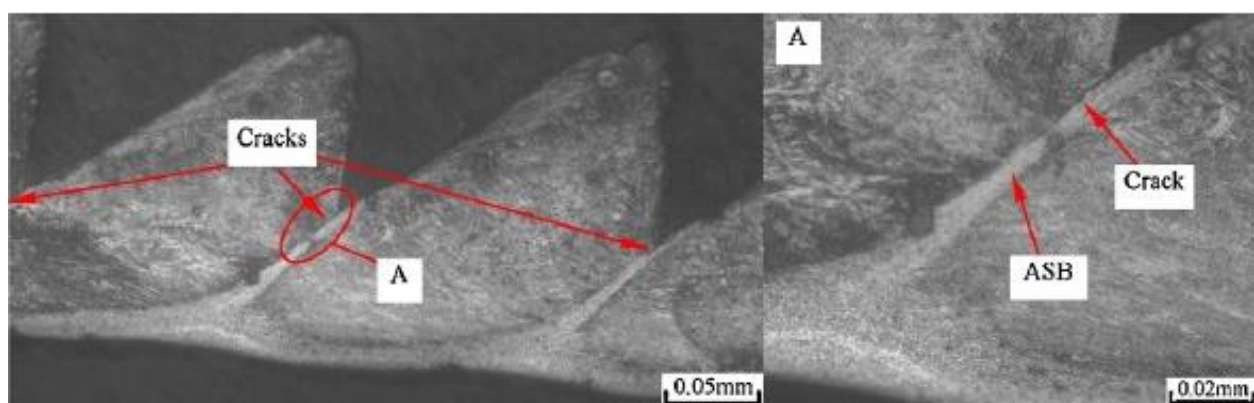
Le bande trasformate invece si presentano quando ci sono elevate velocità di taglio, trasformazioni strutturali dovute all'aumento locale della temperatura, ricristallizzazione e bassa densità di dislocazioni.

La complessità del fenomeno e la combinata interazione dei parametri di processo non ha portato a definizioni precise sull'argomento tuttavia è possibile affermare che le bande di scorrimento adiabatiche sono un importante modo di osservare l'instabilità termoplastica nei metalli quando sono sottoposti a elevati gradi di deformazione[7].

La presenza delle ASB è determinata dalle condizioni di taglio e dalle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali da lavorare come calore specifico, conducibilità termica, durezza e duttilità. A causa del basso calore specifico e conducibilità termica il titanio e le sue leghe, specialmente la lega Ti6Al4V e le leghe AISI 4340 con moderata durezza sono particolarmente suscettibili a fenomeni di scorrimento localizzato in condizioni di alti gradi di deformazione. Di conseguenza, la segmentazione che avviene durante la formazione del truciolo all'interno della zona di scorrimento primario per le leghe di titanio e l'acciaio AISI 4340 è attribuita alla caratteristica di instabilità termoplastica.

Le leghe a base nichel viceversa grazie all'elevata conducibilità termica sono insensibili allo scorrimento localizzato in presenza di elevate deformazioni; tuttavia sono sensibile alla frattura ciclica del truciolo per le proprietà di durezza e fragilità.

Altri materiali invece che presentano un comportamento intermedio come la lega 42CrMo la segmentazione viene attribuita a una combinazione di entrambi fenomeni: presenza sia di bande di scorrimento sia di fratture multiple come mostrato in figura 1.7.



**Figura 0.7** Fratture nelle ASB in un truciolo segmentato di 42CrMo[5]

La formazione del truciolo segmentato comincia con l'apertura di una crepa nella superficie libera del pezzo che si propaga fino alla punta dell'utensile la quale finisce di crescere nel punto dove è presente una grave deformazione plastica del materiale.

### 1.2.3 Usura dell'utensile

Gli utensili, anche se costruiti con materiali a maggiore durezza e resistenza meccanica rispetto al materiale in lavorazione, sono soggetti a usura a causa dello strisciamento del truciolo sul petto dell'utensile e delle superficie lavorata sul fianco[8].

I principali meccanismi che provocano il deperimento dell'utensile sono:

Usura abrasiva: è determinata dallo strisciamento del truciolo sul petto dell'utensile; è dovuta all'incrudimento subito dal materiale in lavorazione e alla presenza di inclusioni non metalliche. Essa è accentuata dall'aumento di temperatura dell'utensile a causa della deformazione plastica subita dal materiale in lavorazione e dallo sviluppo di calore per attrito. Per minimizzare l'usura abrasiva, la durezza delle superfici in moto relativo deve essere la più alta possibile e i materiali devono essere scelti in modo da esser compatibili.

Le superfici devono essere ben lubrificate, in modo da ridurre il coefficiente d'attrito, la rugosità superficiale deve essere la più bassa possibile in modo che le asperità siano più frequenti e meno elevate, vi deve essere un mezzo per asportare le particelle di usure, infine il carico tra le superfici in moto deve essere il più basso possibile.

Usura adesiva: è dovuta alla saldatura di una piccola porzione di truciolo sul petto dell'utensile, in prossimità del tagliente, determinata dalla forza di compressione del truciolo sul petto. La saldatura di materiale in lavorazione sul petto dell'utensile forma un tagliente di riporto BUE (Build-Up-Edge) che altera l'angolo di spoglia superiore, con aumento delle forze di taglio che ne determinano il distacco con possibile strappo da parte dell'utensile.

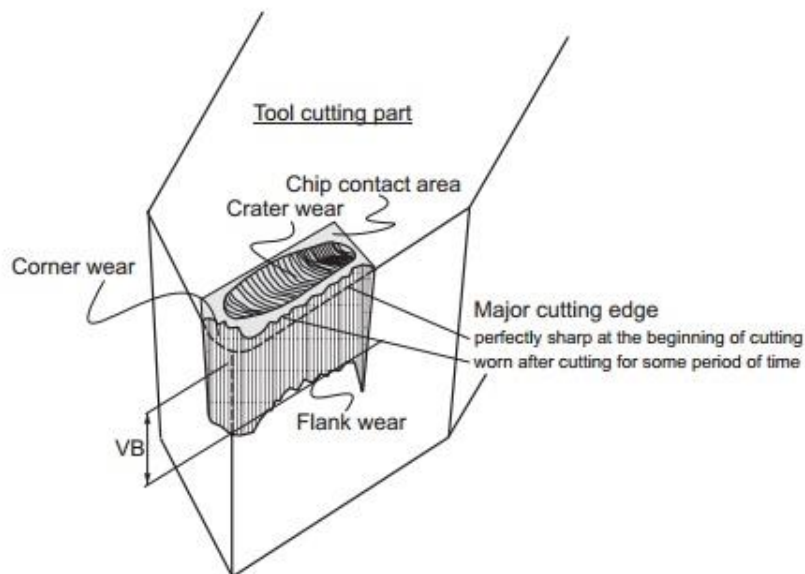
Usura diffusiva: è attivata da temperature elevate; essa consiste nella diffusione di specie atomiche dal truciolo verso l'utensile e viceversa a causa della diversa concentrazione di elementi. Il trasporto per diffusione, dipende dall'affinità chimica e la struttura dei materiali, temperatura, tempo, e dal gradiente di diffusione delle specie che si diffondono.

Lo studio sulla lavorabilità di un materiale include un'analisi quantitativa dell'usura[9] provocata dalla lavorazione sull'inserto in funzione dei parametri di taglio impostati.

La vita di un utensile da taglio è determinata dalla quantità di usura che si è verificata sul profilo dell'utensile e che riduce l'efficienza del taglio a un livello inaccettabile o che causa il fallimento dello strumento.

L'usura graduale avviene principalmente nelle seguenti forme:

- Usura sul fianco
- Cratere di usura
- Usura ad intaglio
- Tagliente di riporto
- Deformazione plastica
- Microfessurazioni



**Figura 0.8** *Forme di usura*[17]

Il cratere di usura consiste in una cavità sul petto dell'utensile formata dall'azione del truciolo che striscia sulla superficie. Pressioni, temperature elevate e affinità chimica caratterizzano l'interfaccia truciolo-utensile, contribuendo all'azione di usura. Il cratere può essere misurato nella sua profondità o nella sua sezione.

L'usura sul fianco si verifica sul fianco principale dell'utensile. Essa è causata dallo strisciamento tra la superficie del pezzo generata dall'operazione di taglio e la parte del fianco immediatamente adiacente al tagliente. L'usura sul fianco è misurata dall'ampiezza del labbro di usura.

In corrispondenza della superficie originaria del pezzo si nota un'usura particolarmente accentuata, che si traduce in un intaglio. Questo si verifica perché la superficie originaria del pezzo è più dura e abrasiva del materiale interno a causa delle precedenti lavorazioni per fusione, deformazione plastica o asportazione di truciolo che avevano generato la superficie stessa. Pertanto nel punto corrispondente del tagliente il fenomeno dell'usura è accelerato.

Il tagliente di riporto consiste in strati materiale del pezzo che si depositano gradualmente sull'utensile durante la lavorazione fino al punto in cui questo diventa instabile e di conseguenza si rompe. La parte superiore viene trascinata via dal truciolo sul petto dell'utensile, mentre la parte inferiore si deposita casualmente sulla superficie lavorata. Il tagliente di riporto modifica la superficie dell'utensile influenzando negativamente la finitura superficiale. Una soluzione a questo problema potrebbe essere l'aumento della velocità di taglio, dell'angolo di spoglia superiore o l'utilizzo di un fluido lubrificante.

La Deformazione Plastica si presenta quando le temperature in gioco sono troppo elevate per la qualità dell'inserto. Occorre quindi ricorrere ad una qualità più dura con dei rivestimenti più spessi.

Per stabilire in modo oggettivo la durata dell'utensile occorre fissare dei criteri di usura, utilizzando parametri facilmente misurabili in funzione di:

- Limiti di tolleranza dimensionale ammissibili sul pezzo in lavorazione, poiché la presenza del labbro di usura sul raccordo tra i taglienti genera un diametro tornito maggiore rispetto a quello di un utensile nuovo
- Limiti ammissibili sul grado di rugosità superficiale del pezzo lavorato, perché alcune forme di usura provocano un peggioramento della finitura superficiale
- Gradi di usura massimo ammissibile sul fianco dell'utensile
- Grado di usura massimo ammissibile sul petto dell'utensile
- Intervalli di tempo definiti

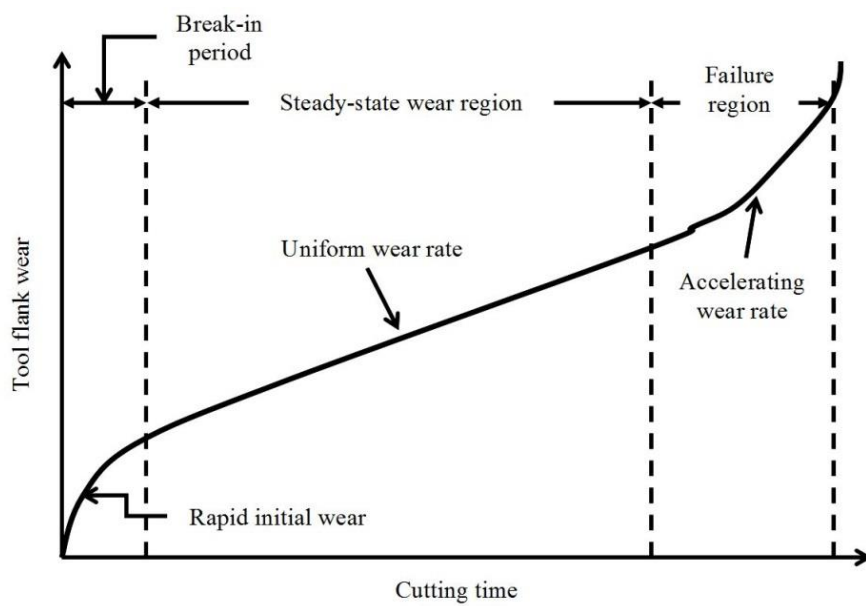
Secondo lo standard ISO 3685:1993[10] la vita utile dell'inserto viene quantificata misurando l'ampiezza del labbro di usura sul fianco dell'utensile. La norma indica anche i parametri da misurare, le modalità di misurazione basate sull'utilizzo di microscopi ottici e i valori limite per inserti sia in acciaio rapido sia in carburo metallico.

Tra i diversi parametri che si possono misurare al fine di quantificare l'usura, solo due sono accettati dallo standard per determinare la vita utile dell'utensile e gli stessi che si devono considerare in un test di lavorabilità:  $V_b$  e  $V_{b_{max}}$ .

Attraverso delle lavorazioni con parametri di taglio impostati, il pezzo viene lavorato ad intervalli di tempo definiti in modo tale da poter valutare per ogni intervallo, attraverso osservazione mediante microscopio ottico, l'entità dei valori di  $V_b$  e  $V_{b_{max}}$ .

Queste operazioni vengono ripetute fino ad ottenere il valore di soglia di  $V_b$  che rappresenta la vita utile dell'utensile; è possibile successivamente costruire un grafico che evidenzia l'andamento di  $V_b$  nel tempo come mostrato in figura 1.9.

Chiaramente un'usura più contenuta comporta un aumento della capacità produttiva in quanto aumenta il volume di materiale rimosso nell'unità di tempo e congiuntamente diminuiscono i tempi morti di sostituzione dell'utensile usurato, e una riduzione dei costi.



**Figura 0.9** Andamento tipico di  $V_{bc}$ [22]

# Capitolo 2

## I materiali

### 2.1 Il Cobalto

Il cobalto[11] è l'elemento chimico con numero atomico 27 e pertanto il suo atomo possiede 27 elettroni e 27 protoni. L'atomo di cobalto ha un raggio di 1,67 Å, un peso atomico di 58,933 g/mol, un volume molare di 6,7 cm<sup>3</sup>/mol e la sua configurazione elettronica è  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$ .

La struttura cristallina del cobalto è esagonale compatta (hcp) per temperature inferiori a 400°C mentre al di sopra di questa temperatura assume una struttura cubica a facce centrate (fcc). Con un lento raffreddamento a partire da cobalto liquido, la transizione da fcc a hcp avviene a circa 420°C, mediante trasformazione martensitica la quale non avviene per fenomeni diffusivi ma per moto cooperativo degli atomi (movimenti analoghi ai movimenti che gli stessi farebbero se la cella venisse sottoposta a sollecitazioni meccaniche particolari).

La trasformazione martensitica non avviene a temperatura costante ma necessita di un sottoraffreddamento minimo per avvenire e di un continuo raffreddamento.

Aumentando la velocità di raffreddamento del fuso, diminuisce la temperatura di transizione fcc-hcp e di conseguenza l'affinamento della grana cristallina ottenibile con l'aumento della velocità di raffreddamento stabilizza la struttura fcc.

Viceversa, l'applicazione di un carico esterno di trazione agisce stabilizzando la struttura cristallina esagonale.

<i>Proprietà</i>	<i>Valore o descrizione</i>
<b>Numero atomico</b>	27
<b>Peso atomico [g/mol]</b>	58,933
<b>Raggio atomico [Å]</b>	1,67
<b>Volume molare [cm<sup>3</sup>/mol]</b>	6,7
<b>Configurazione elettronica</b>	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^7 4s^2$
<b>Stati di ossidazione</b>	2, 3

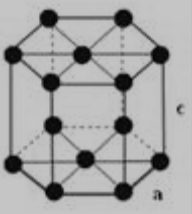
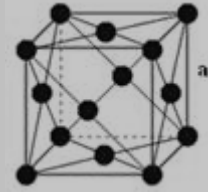
Struttura cristallina	
	T < 400°C à esagonale compatta (a = 0,251 nm, c = 0,407 nm)
	T > 400°C à cubica a facce centrate (a = 0,354 nm)

Tabella 2.1 Proprietà chimiche del cobalto

A temperatura ambiente il cobalto e le sue leghe sono ferromagnetici, ossia sono fortemente magnetizzati, anche se non sono sottoposti ad alcun tipo di campo magnetico esterno.

Questa proprietà viene mantenuta solamente al di sotto della temperatura di Curie che per il cobalto è di 1115°C al di sopra della quale il materiale si comporta come paramagnetico.

Per temperature inferiori a quella di Curie, i momenti magnetici degli atomi di un materiale tendono ad allinearsi tutti nella stessa direzione anche in assenza di un campo magnetico esterno, mentre per temperature superiori a quella di Curie i momenti mantengono una disposizione ordinata e quindi anche la magnetizzazione spontanea.

Il cobalto metallico è ricavato da minerali di zolfo e arsenico per fusione e quindi facendo precipitare la polvere di idrossido di cobalto, che se opportunamente conservata presenta un'elevata stabilità e può essere facilmente convertita nel metallo o nell'ossido, oppure usata direttamente. Solitamente il cobalto è un prodotto secondario dell'estrazione di rame, nichel, argento, ma anche piombo, zinco e oro.

Il cobalto metallico presenta una colorazione bianco-argento, con una temperatura di fusione di 1495°C e una temperatura di ebollizione di 2870°C.

Durante il riscaldamento il cobalto metallico può reagire con alogeni e altri metalli come il boro, il fosforo, l'antimonio, il carbonio, l'arsenico e lo zolfo.

All'interno dei vari composti, il cobalto mostra tutti gli stati di ossidazione dall'1 al 4, anche se i più comuni sono il 2 e il 3. Se il cobalto viene portato al di sopra dei 900°C o reagisce con l'acqua ad elevata temperatura forma CoO.

Il cobalto ha una buona resistenza alla corrosione, simile a quella del nickel nella maggior parte degli ambienti: buona resistenza alla corrosione in atmosfera, in acqua, in soluzioni asfittiche di acidi non ossidanti e un'eccellente resistenza in ambienti alcalini.

L'aggiunta di cobalto metallico ad una lega ne migliora la resistenza alla corrosione nella maggior parte degli ambienti aggressivi ed incrementa la resistenza della lega alle alte temperature. Il cobalto metallico viene in genere attaccato dagli acidi, sia concentrati sia diluiti.



Le principali applicazioni del cobalto e delle sue leghe sono:

- Superleghe
- Leghe resistenti all'usura
- Leghe resistenti alla corrosione
- Leghe magnetiche
- Legante del metallo duro
- Leghe speciali (per saldature, per applicazioni dentistiche e chirurgiche, a bassa dilatazione)
- Catalizzatori per l'industria chimica
- Pigmenti
- smalti
- Batterie ricaricabili
- Elettrodi

### *2.1.1 Le leghe di cobalto*

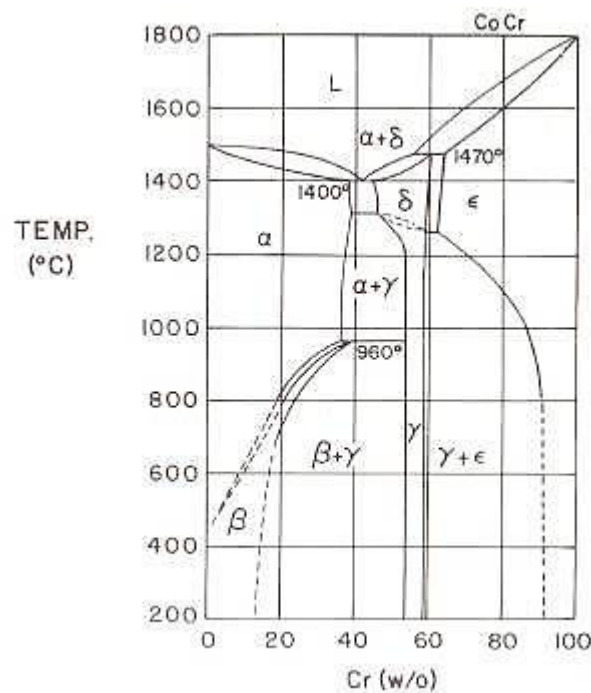
Una lega è una miscela di due o più elementi, di cui almeno uno metallico chiamato metallo base, con proprietà diverse rispetto a quelle dei singoli costituenti.

In funzione della temperatura e della composizione, le leghe possono essere monofasiche o polifasiche dove per fase si definisce una porzione di materiale avente composizione chimica e proprietà fisiche (densità, struttura cristallina, indice di rifrazione, ecc..) uniformi.

Esistono svariate leghe a base cobalto, distinguibili in base alla composizione chimica e alle proprietà che la caratterizzano. Alcune di queste risultano particolarmente resistenti alla corrosione, altre invece all'usura e altre ancora al calore.

Queste leghe però sono tutte accumulate da un'elevata resistenza meccanica anche alle elevate temperature proprietà che deriva dalla natura cristallografica del cobalto, dall'effetto di rinforzo esercitato dal cromo, dal tungsteno e dal molibdeno presenti in soluzione solida nella matrice di cobalto, dalla formazione di carburi metallici, dall'affinamento del grano cristallino e dalla resistenza alla corrosione per la presenza del cromo.

Leghe che presentano minor durezza ma più tenacità vengono impiegate come leghe resistenti alle alte temperature mentre quelle che presentano elevata durezza per leghe resistenti all'usura. Il sistema binario cobalto-cromo mostrato in figura 2.1 presenta un'elevata resistenza alla corrosione.



**Figura 2.1** Diagramma di stato CoCr[11]

In seguito verranno classificate le diverse leghe di cobalto sia per differenze di composizione chimica che per le diverse proprietà che esibiscono:

### *Leghe resistenti all'usura*

Le leghe di cobalto resistenti all'usura sono denominate "stelliti". Le stelliti sono delle leghe cobalto-cromo che contengono anche tungsteno ed una ridotta quantità di carbonio.

Queste leghe vengono indurite per soluzione solida e per precipitazione, di conseguenza al loro interno sono presenti anche altri elementi come il ferro, il molibdeno, il manganese, il silicio e il nickel. Le stelliti sono completamente non magnetiche, molto resistenti alla corrosione, alle alte temperature e presentano un'elevata durezza ed elevata tenacità.

Proprio a causa dell'elevata durezza, tali leghe sono difficilmente lavorabili alle macchine utensili e di conseguenza sono molto costose. Vengono realizzate generalmente con processi di colata in stampo per minimizzare così il più possibile la loro lavorazione alle macchine.

Queste leghe sono legate alla realizzazione di giunti per protesi d'anca per la particolare resistenza all'abrasione, per protesi dentali, componenti rotanti per torni, ricoprimenti saldati per utensili, ecc.

### *Leghe resistenti ad alta temperatura*

Le più importanti leghe resistenti alle alte temperature sono le leghe di nichel e le leghe di cobalto (Hastelloy® e Haynes®). Per molti, il principale impiego delle leghe resistenti ad alta temperatura fu essenzialmente limitato alla realizzazione di turbine a gas. Attualmente tali leghe trovano applicazioni anche in molti altri settori.

Il principale meccanismo di incrudimento di queste leghe è rappresentato dalla precipitazione di carburi di Cr, Mo e W incoerenti rispetto la matrice, i quali contribuiscono a mantenere ridotta la dimensione dei grani (che altrimenti, a causa dell'elevata temperatura a cui sono sottoposte tali leghe, tenderebbe ad aumentare notevolmente con conseguente crollo delle proprietà meccaniche). Le leghe a base di cobalto presentano alle alte temperature una durezza molto superiore a quella degli acciai e delle leghe di nickel.

### *Leghe resistenti alla corrosione*

Le leghe di cobalto resistenti ad usura presentano solitamente anche una discreta resistenza alla corrosione in ambiente acquoso, caratteristica limitata dalla precipitazione di carburi nei pressi dei bordi di grano, dalla carenza di particolari elementi in lega nella matrice e in alcuni casi da segregazioni chimiche che possono essere presenti nella microstruttura. In virtù della loro microstruttura omogenea e del ridotto tenore di carbonio, le leghe di cobalto resistenti ad alta temperatura (che generalmente non contengono molibdeno) presentano una maggiore resistenza alla corrosione in ambiente acquoso rispetto alle leghe di cobalto resistenti ad usura ma una minore resistenza alla corrosione rispetto alle leghe a base nickel, cromo e molibdeno. Come detto precedentemente, l'elemento in lega che più contribuisce alla resistenza alla corrosione è il cromo, mentre il tenore di carbonio prossimo allo zero è necessario per evitare la formazione di carburi.

La lega Vitallium (Cr 30%, Mo 5%, C 0.5%, Si 0.5%, Co a completare) è utilizzata soprattutto per protesi odontoiatriche grazie alla sua ottima resistenza all'attacco corrosivo dei fluidi biologici. A partire dalla lega Vitallium sono poi state sviluppate altre leghe adatte per protesi chirurgiche, soprattutto per gli arti inferiori. Esse presentano un'ottima resistenza ai fluidi corporei, e rispetto ad altrettanto resistenti leghe di Ti, Ta o acciai inossidabili manifestano superiori caratteristiche di resistenza a fatica.

### *2.1.2 Le leghe di Cobalto per applicazioni biomedicali*

I metalli più utilizzati come biomateriali sono gli acciai inossidabili, le leghe di cromo-cobalto e le leghe di titanio. Essi trovano largo impiego soprattutto come materiali per la costruzione di dispositivi biomedicali. Le applicazioni sono le più svariate e vanno dalla realizzazione di componenti di apparecchiature fino a parti di protesi o protesi intere. Alcune comuni applicazioni dei biomateriali metallici riguardano la fabbricazione di strumenti chirurgici, di protesi ortopediche e dentali e di mezzi di osteosintesi. I materiali metallici infatti, presentando delle proprietà meccaniche che rendono possibile la realizzazione di protesi in grado di sopportare carichi elevati con piccole sezioni, si prestano bene a risolvere i problemi legati alla sostituzione di tessuti duri quali ossa e denti.

I biomateriali metallici possono essere lavorati utilizzando gran parte delle tecnologie tradizionali e spesso le loro proprietà meccaniche possono essere modificate opportunamente prima che il pezzo in lavorazione raggiunga la forma finale.

Per garantire un'elevata biocompatibilità è necessario curare le tecnologie di fabbricazione, soprattutto per quanto riguarda la finitura superficiale.

La biocompatibilità è connessa, nel caso dei metalli, al problema della corrosione in ambiente biologico, infatti, in questo tipo di ambiente, i fluidi organici hanno un elevato potere corrosivo nei confronti dei metalli. Le conseguenze della corrosione sono la perdita di materiale metallico da parte dell'impianto, con possibilità di perdita di funzionalità dell'impianto stesso e contaminazione dei tessuti biologici. Gran parte di questi problemi, comunque controllabili, sono relativi ai dispositivi impiantati, mentre per i dispositivi non impiantati, come nel caso dei ferri chirurgici, i metalli presentano inconvenienti minori e sono i materiali più impiegati laddove sono richieste proprietà meccaniche elevate ed affidabilità nel tempo.

Per quanto riguarda la corrosione, il corpo umano è assimilabile ad una soluzione acquosa con temperatura attorno ai 37°C, contenente ioni cloruro e con un pH medio di circa 7,4 (il pH è in realtà variabile a seconda della zona e può subire forti fluttuazioni in presenza di infezioni, in seguito ad interventi chirurgici e ad applicazioni farmacologiche). Tale soluzione è inoltre fortemente ossigenata e contiene un'elevata quantità di sali e composti organici ed inorganici e pertanto presenta una conducibilità elettrica abbastanza elevata. Per tutti questi motivi, l'organismo umano risulta l'ambiente ideale per l'instaurarsi di celle di corrosione sui metalli. La resistenza alla corrosione dei metalli dipende da svariati fattori, tra cui la composizione, la microstruttura, le tensioni interne e la finitura superficiale.

Esistono sostanzialmente quattro tipologie di leghe a base di cobalto normalmente impiegate nell'ambito delle applicazioni biomedicali, in particolare per la realizzazione di impianti chirurgici:

- Lega CoCrMo (F76);
- Lega CoCrWNi (F90);
- Lega CoNiCrMo (F562);
- Lega CoNiCrMoWFe (F563).

La lega F76 viene generalmente lavorata con metodi di colata/fusione, mentre le leghe F90, F562 e F563 vengono solitamente lavorate con utensili o per forgiatura. In tabella viene riportata la composizione chimica di ciascuna delle precedenti leghe.

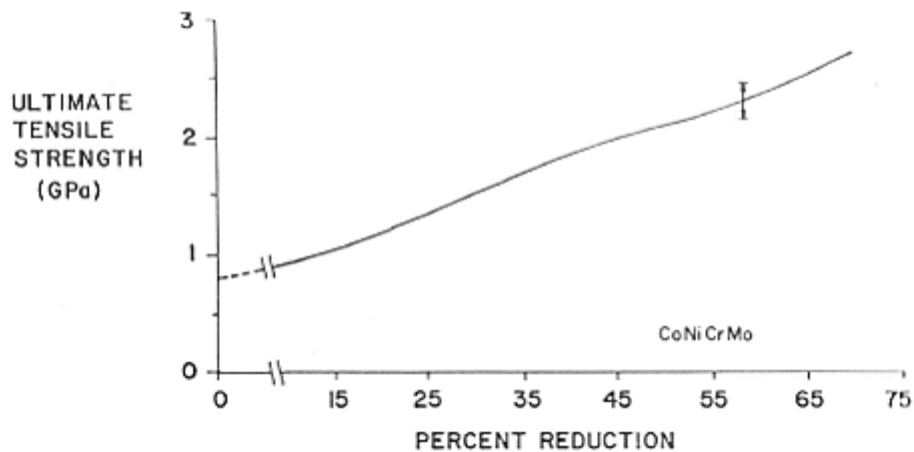
	Cast CoCrMo (F76)		Wrought CoCrWNi (F90)		Wrought CoNiCrMo (F562)		Wrought CoNiCrMoWFe (F563)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Cr	27.0	30.0	19.0	21.0	19.0	21.0	18.00	22.00
Mo	5.0	7.0	—	—	9.0	10.5	3.00	4.00
Ni	—	2.5	9.0	11.0	33.0	37.0	15.00	25.00
Fe	—	0.75	—	3.0	—	1.0	4.00	6.00
C	—	0.35	0.05	0.15	—	0.025	—	0.05
Si	—	1.00	—	1.00	—	0.15	—	0.50
Mn	—	1.00	—	2.00	—	0.15	—	1.00
W	—	—	14.0	16.0	—	—	3.00	4.00
P	—	—	—	—	—	0.015	—	—
S	—	—	—	—	—	0.010	—	0.010
Ti	—	—	—	—	—	1.0	0.50	3.50
Co	Balance							

**Tabella 2.2** Composizione chimica delle leghe di CoCrMo[11]

Attualmente, solamente due delle quattro leghe vengono impiegate intensivamente per la realizzazione di impianti chirurgici, ossia la lega CoCrMo e la lega CoNiCrMo. L'impiego degli altri due tipi di lega risulta abbastanza marginale.

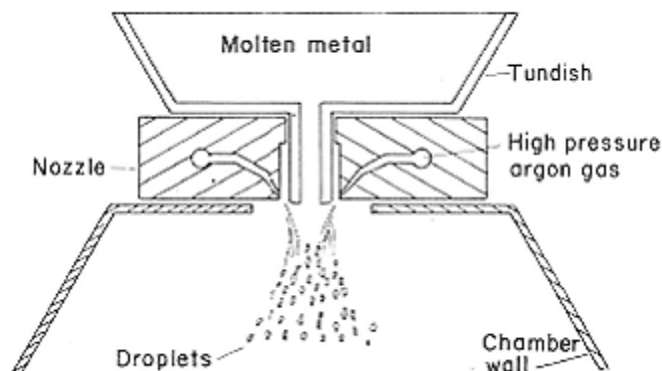
I due principali elementi costitutivi delle leghe a base di cobalto, ossia il cobalto e il cromo, formano una soluzione solida solo per percentuali in peso di Cr inferiori al 35% come evidenziato nella figura 2.1.

L'aggiunta del molibdeno permette l'ottenimento di una grana fina che a sua volta si traduce in un'elevata resistenza meccanica delle leghe anche dopo il processo di colata o di forgiatura. La lega CoNiCrMo presenta un'elevata resistenza alla corrosione, anche in presenza di cloruri e sotto sforzo. Inoltre, la lavorazione a freddo ed il conseguente incrudimento possono aumentare considerevolmente la resistenza meccanica di tale lega.



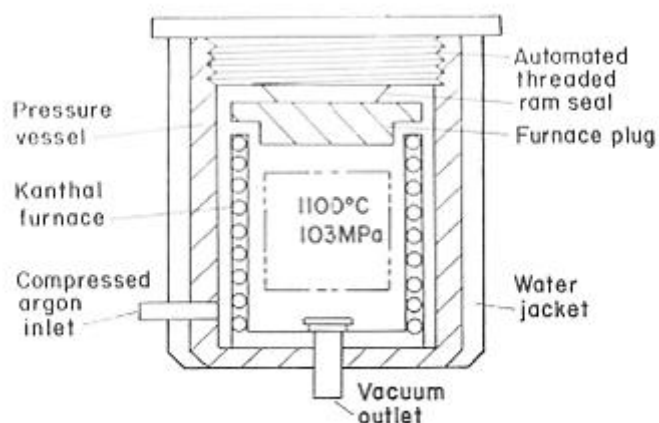
**Figura 2.2** Aumento della resistenza meccanica in seguito all'incrudimento[11]

Tuttavia esistono notevoli difficoltà correlate alla lavorazione a freddo della lega F562, in particolare per la realizzazione di grossi componenti, come gli steli per le protesi d'anca. Solamente il processo di forgiatura a caldo permette di lavorare la lega senza grosse difficoltà. Un altro metodo per incrementare le proprietà resistenziali, utilizzato in particolare per la lega CoCrMo, è rappresentato dalla pressatura isostatica a caldo (hot isostatic pressing), effettuata una volta che la lega sia stata "atomizzata" sotto forma di piccolissime particelle in un'apposita camera (figura 2.3).



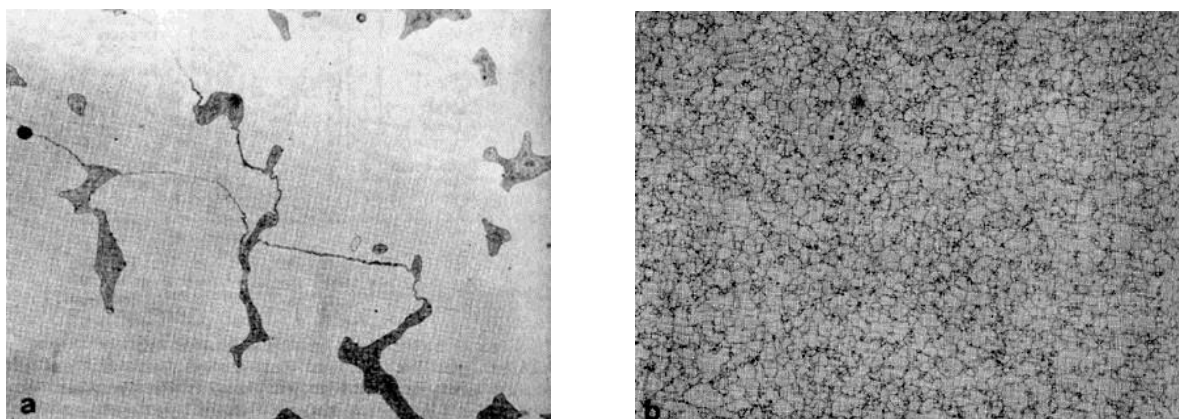
**Figura 2.3** Atomizzatore[11]

Le particelle ottenute per mezzo dell'atomizzazione, vengono poi setacciate per ottenere una distribuzione granulometrica uniforme ed inserite infine in una camera di pressatura isostatica a caldo (figura 2.4). La temperatura della camera è inferiore rispetto alla temperatura di fusione della lega.



**Figura 2.4** Pressatura isostica a caldo[11]

Il legame che si stabilisce tra le varie particelle, dovuto all'innescarsi di fenomeni di diffusione allo stato solido, porta alla formazione di una grana molto fina.



**Figura 2.5** Cambiamento microstrutturale dopo pressatura isostatica[11]

Le caratteristiche di usura delle CoCrMo e CoNiCrMo sono simili, ma quest'ultima presenta coefficienti di attrito superiori, sia per quanto riguarda accoppiamenti con se stessa, sia con altri materiali. Per questo motivo, l'utilizzo di tale lega è sconsigliato nel caso si debbano avere zone superficiali di contatto di protesi di giuntura. La lega CoNiCrMo presenta tuttavia una maggiore resistenza a fatica rispetto alla lega CoCrMo.

In tabella vengono mostrate le principali proprietà meccaniche delle leghe a base di cobalto per applicazioni in dispositivi impiantabili.

Proprietà	F75	F90	F563	F562
Densità di massa [g/cm <sup>3</sup> ]	7.8 f 9.15 lf			
Modulo di Young [GPa]	195	210	195	195
Sforzo per 0.2% di deformazione plastica [MPa]	450 g 890 f	310 t	276	240 t 1585 lf
Sforzo a rottura [MPa]	65 g 1400 f	860 t	600 t 827 lf	795 t 1790 lf
Allungamento a rottura [%]	8 g 28 g	30 t	50 t 18lf	50 t 8 lf

**Tabella 2.3** Proprietà meccaniche delle leghe di CoCrMo[11]

### 2.1.3 Produzione delle leghe Co-Cr

Si è visto che le leghe cobalto-cromo possono essere sostanzialmente suddivise in due categorie in base alla tecnologia di produzione:

1. leghe Co-Cr colate;
2. leghe Co-Cr lavorate (all'utensile o per forgiatura)

Entrambi le tipologie di leghe contengono più del 20% in peso di cromo, che fornisce un'ottima resistenza alla corrosione grazie alla formazione di uno strato di ossido passivante superficiale.

Le leghe ottenute per colata contengono una piccola percentuale di carbonio (0,35-0,5% in peso) che ha lo scopo di aumentare la loro "colabilità" abbassando la temperatura di fusione da 1450-1500°C (tipica del sistema binario Co-Cr) a 1350°C. Normalmente tali leghe vengono formate con il processo di "investment casting" (o "colata a cera persa"). Per incrementare la qualità del prodotto è possibile eseguire il processo di fusione e colata sotto



vuoto. In questo caso si ha un incremento dei costi ma è possibile ridurre la porosità ed evitare la formazione di ossidi.

La più bassa temperatura di fusione dovuta all'aggiunta di carbonio permette la formazione di una grana fina e consente di ridurre la temperatura iniziale dello stampo da 1000 a 900°C. La temperatura di colata varia all'interno dell'intervallo 1350-1450°C a seconda della composizione della lega.

La microstruttura di colata consiste in una matrice dendritica contenente dei carburi dispersi ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$ , dove  $M = Co, Cr, Mo$ ) e altri composti intermetallici. Dopo il semplice trattamento di colata, le leghe presentano una ridotta resistenza e duttilità. Di conseguenza si rende necessaria l'esecuzione di un trattamento termico condotto a 1210-1250°C, che permetta la completa dissoluzione dei carburi all'interno della matrice. La dissoluzione dei carburi porta alla formazione di elementi che rafforzano per soluzione solida la matrice. Per non ottenere un'eccessiva crescita dei grani, si evita di disciogliere completamente i carburi. Queste poche particelle residue si localizzano a bordo grano esercitando un effetto di "pinning" (= ancoraggio) sullo stesso.

Un'altra via per ottenere pezzi "near net shape" consiste nell'utilizzare la metallurgia delle polveri. La compattazione delle polveri avviene mediante pressatura isostatica a caldo (HIP), applicando una pressione di circa 10000 MPa ed una temperatura di 1100°C. A causa del costo relativamente elevato di questa metodologia di produzione, essa viene impiegata esclusivamente per i componenti che debbano resistere a carichi molto elevati, come ad esempio le protesi di steli femorali.

Le leghe Co-Cr lavorate sono caratterizzate da un minore contenuto di cromo rispetto alle leghe Co-Cr per colata, generalmente compreso tra il 19 e il 21% in peso. In tali leghe parte del cromo è sostituito dal molibdeno o dal tungsteno. Al fine di stabilizzare la fase fcc è inoltre necessario un certo contenuto di nickel, ferro o manganese. A causa dell'elevata resistenza di queste leghe, anche alle elevate temperature, è necessario applicare sollecitazioni molto elevate durante il processo di forgiatura. Per ottenere deformazione plastica, le leghe Co-Cr lavorate devono essere sottoposte a ricottura ("annealing") per ottenere una struttura fcc che possa essere mantenuta anche dopo il successivo raffreddamento a temperatura ambiente. La trasformazione hcp, che provoca un incremento delle proprietà meccaniche, può essere indotta mediante la deformazione meccanica impressa. Dopo la lavorazione a caldo (forgiatura), la microstruttura comprende una matrice cubica a facce centrate (fcc) contenente delle piccole piastrine con struttura esagonale compatta (hcp). Un ulteriore incremento delle proprietà meccaniche, in particolare della durezza, può essere ottenuto effettuando una lavorazione a freddo (che produce incrudimento) seguita da un invecchiamento condotto a 500-600°C per 1-4 ore. In tal modo si ottiene la precipitazione di particelle di  $Co_3Mo$  ed il conseguente aumento della durezza della lega.

Per soddisfare i severi requisiti necessari per l'utilizzo biomedicale, la produzione delle leghe lavorate prevede una serie di stadi del tutto simili a quelli sviluppati per la produzione di superleghe da impiegare in settori particolarmente critici, come nel campo aeronautico.

Di seguito verranno elencati i principali passaggi per la produzione delle leghe Co-Cr lavorate:

- Fusione: il processo di fusione primaria per le leghe a base di cobalto è rappresentato dalla fusione per induzione sotto vuoto (VIM). Le materie prime da sottoporre a fusione VIM devono essere selezionate molto attentamente. Tale processo di fusione ha una produttività molto inferiore rispetto ai processi di fusione mediante forno elettrico ad arco o convertitore AOD. La carica per la produzione delle leghe CoCrMo è costituita di solito da materie prime vergini (recuperi interni o rottame acquistato). Tali materie prime vengono portate a fusione all'interno di un crogiuolo rivestito in refrattario e posto all'interno di una camera da vuoto. La raffinazione del fuso avviene per mezzo dell'insufflaggio di ossigeno, per evaporazione, desorbimento e in alcuni casi per reazioni tra scoria e metallo. Il tenore degli elementi indesiderati, come l'ossigeno e lo zolfo, viene mantenuto a livelli molto bassi (< 30 ppm).
- Rifusione (ESR): è il tipico processo di fusione secondaria utilizzato per incrementare la pulizia e l'omogeneità chimica e strutturale delle leghe a base di cobalto. La fusione della lega viene realizzata per mezzo di un elettrodo, dalla cui punta scocca un arco elettrico che fornisce il calore necessario per l'operazione. Al di sopra del metallo fuso vi è uno strato di scoria, tipicamente a base di  $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ , che permette di controllare la concentrazione di diversi elementi della lega. Sperimentalmente si è riscontrato che il processo ESR è particolarmente efficace per rimuovere le inclusioni a base di ossidi formati a seguito del processo di fusione primaria (VIM). Talvolta l'ESR può portare anche a desolfurazione del metallo base.
- Processi termo-meccanici: Una volta solidificati, i lingotti possono essere affetti da fenomeni segregativi (soprattutto micro segregazione). Per questo motivo è necessario per prima cosa sottoporli a trattamento di omogeneizzazione. Successivamente viene effettuata una prima forgiatura a caldo ( $T = 925 - 1190^\circ\text{C}$ ) per ottenere billette con diametro di 10 – 12 cm. Tale processo conduce inoltre ad una ricristallizzazione ed all'ottenimento di una struttura cristallina relativamente fina. Per evitare l'insorgere di difetti o cricche superficiali durante le successive lavorazioni, vengono eseguiti su ciascuna billetta dei trattamenti superficiali. A questo punto le billette possono essere ispezionate per rilevare eventuali difetti interni, ad esempio per mezzo della tecnica ad ultrasuoni.

I pezzi vengono portati alle dimensioni finali mediante laminazione a caldo e il raffreddamento può avvenire per semplice contatto con l'aria o mediante tempra in acqua.

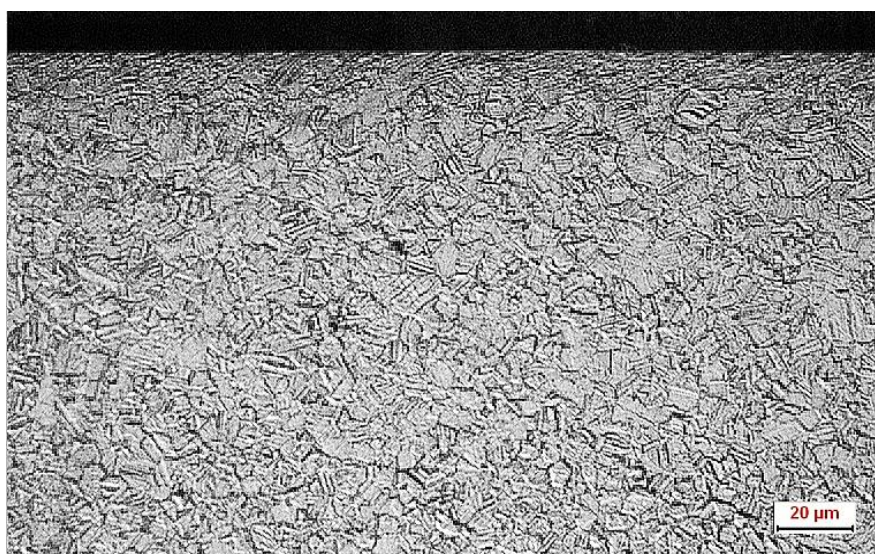
Le leghe di cobalto CoCrMo lavorate vengono prodotte con due distinte composizioni chimiche che si differenziano unicamente per il contenuto di carbonio (tabella).

Element, wt%	Low Carbon	High Carbon
Cobalt	Bal.	Bal.
Chromium	27.7	27.7
Molybdenum	5.7	5.7
Manganese	0.7	0.7
Iron	0.5	0.5
Nickel	0.7	0.7
Silicon	0.7	0.7
Nitrogen	0.18	0.18
Carbon	0.05	0.25

**Tabella 2.4** *Composizione chimica in peso delle leghe a basso tenore di carbonio[11]*

La composizione ad elevato tenore di carbonio è utilizzata principalmente per impianti riguardanti periferiche “metallo su metallo”, dove la bassa duttilità è un requisito fondamentale per limitare la formazione di cricche durante le operazioni di lavorazione a caldo. Tali leghe vengono solitamente prodotte con le convenzionali tecniche metallurgiche; in alcuni casi è tuttavia possibile realizzarle per metallurgia delle polveri.

Le proprietà meccaniche delle leghe CoCrMo sono fortemente dipendenti dal processo di lavorazione subito. La figura 2.6 evidenzia la struttura della lega F1537 utilizzata per il seguente studio.



**Figura 2.6** *Struttura lega ASTM F1537*

## **2.2 Lega ASTM F75 prodotta per Electron Beam Melting**

La caratteristica principale di queste leghe[12] è la resistenza a corrosione in ambienti clorati, direttamente collegata alla sua composizione e all'ossido superficiale che sviluppa spontaneamente ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Questa lega trova da sempre larghe applicazioni nel campo aerospaziale e nell'industria delle protesi biomediche.

Durante gli anni '30 e '40 venne sviluppata una lega di cobalto-cromo-molibdeno resistente alla corrosione con un basso contenuto di carbonio per soddisfare la necessità di investire il materiale in ambito di rivestimenti dentali.

Questa stessa lega, chiamata Stellite 21, in seguito a successivi miglioramenti strutturali venne utilizzata anche in seguito per applicazioni che richiedevano una resistenza alle alte temperature.

ASTM F75 corrisponde per composizione chimica alla "vecchia" Stellite 21.

L'uso biomedicale di questa lega riguarda principalmente la produzione di teste femorali, protesi al ginocchio e viti per impianti dentali.

L'elevata resistenza all'usura e alla corrosione svolgono un ruolo primario in tali applicazioni, come verrà discusso in seguito. La presenza di cromo infatti permette la passivazione delle superfici, preservando il materiale da un'eventuale corrosione anche ad elevata temperatura.

### ***2.2.1 Processo di formatura***

Durante il processo Electron Beam Melting (EBM) le polveri del materiale vengono selettivamente fuse, strato dopo strato, attraverso un fascio di elettroni.

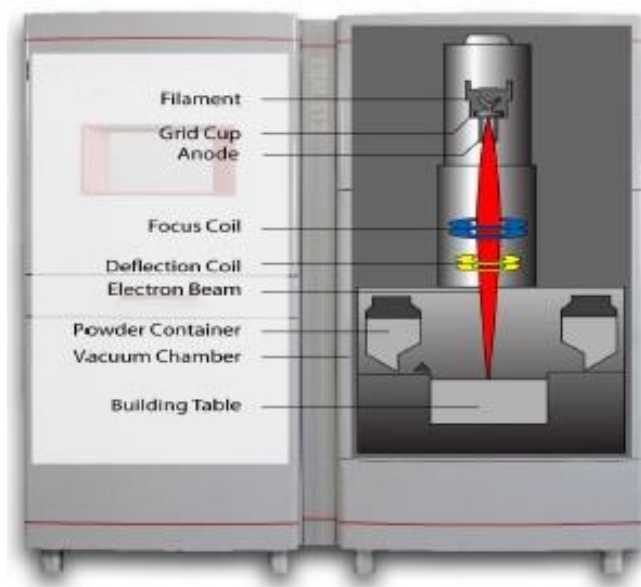
In questo processo la densità di energia è molto elevata infatti la polvere prima di essere fusa viene preriscaldata attraverso una pistola, usando una bassa corrente ma un'elevata velocità di scansione. Questo si traduce in due effetti. Il più importante è la riduzione del gradiente termico tra lo strato appena fuso e la parte appena costruita che consente una sostanziale riduzione delle tensioni residue; inoltre il preriscaldamento permette una parziale sinterizzazione della polvere che si mantiene così in posizione durante la successiva fusione.

L'altro effetto invece riguarda il film di ossido che si verrebbe a formare, infatti il riscaldamento permette una parziale rifusione dello strato appena formato evitando così a quest'ultimo di passivarsi.

Il processo EBM avviene sotto vuoto spinto in modo da impedire una perdita di energia causata dalla collisione tra il veloce spostamento degli elettroni e le particelle di gas rendendo così il processo energeticamente efficiente al 95%. Inoltre il vuoto impedisce l'assorbimento di impurità atmosferiche.

Un cannone elettronico, lavorando sotto vuoto, genera un fascio localizzato. Gli elettroni sono emessi da un filamento riscaldato a temperatura superiore a  $2500^{\circ}\text{C}$  e accelerati da un anodo. Un primo sistema di bobine si occupa di portare il fascio a fuoco mentre un secondo sistema di lenti dirige il fascio di elettroni.

La deflessione del fascio avviene in assenza di parti in movimento: il cannone elettronico è stazionario in modo tale da consentire velocità di scansioni molto elevate.



**Figura 2.7** Meccanismo Electron Beam Melting[13]

La tecnologia di fusione a fascio di elettroni lavora con potenziali molto elevati e con medio-alte densità di energia. La potenza del fascio elettronico viene controllata variando la corrente. A causa delle dimensioni della zona di fusione e della precisione del fascio, la finitura superficiale è poco precisa. La finitura finale è ottenuta attraverso un processo successivo di sabbiatura che rimuove dalla superficie le particelle parzialmente sinterizzate.

La sabbiatura viene effettuata utilizzando la stessa polvere coinvolta nel processo EBM al fine sia di evitare contaminazioni sia di recuperare la polvere, che viene successivamente setacciata e riciclata nel processo. I pezzi vengono costruiti su un supporto in modo da agevolare la rimozione.

Le polveri impiegate nell'EBM sono pre-legate e non contengono additivi o leganti (non è richiesto alcun trattamento termico per la rimozione di essi dopo la formatura), inoltre la loro composizione chimica viene mantenuta grazie al livello di vuoto nella camera, al piccolo volume del fuso e al rapido raffreddamento.

### 2.2.2 Microstruttura

La lega ASTM F75(CoCrMo) presenta una microstruttura che dipende fortemente dalla composizione delle sue fasi.

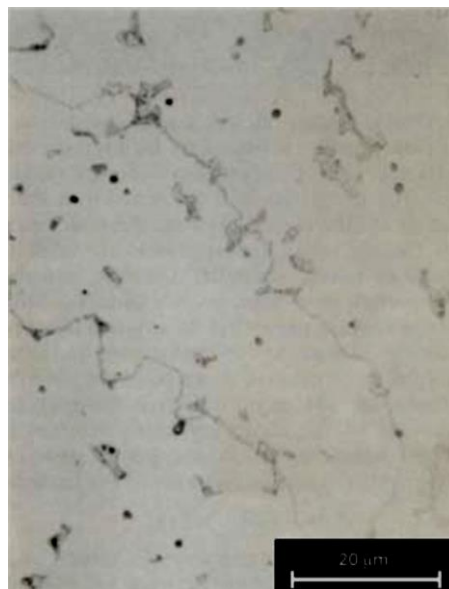
Possono essere rilevate due fasi allotropiche: la fase  $\alpha$  cubica a facce centrate, stabile a temperature più elevate, e la fase  $\epsilon$  esagonale compatta, stabile alle basse temperature.

A causa della natura lenta della trasformazione di fase, la fase cubica può essere stabilizzata a temperatura ambiente rendendo la composizione della matrice bifasica.

Un'altra importante caratteristica delle leghe di cobalto commerciali è la presenza di carburi che precipitano nella fase di solidificazione. Questi, a seconda della quantità di carbonio e del processo a cui il materiale è stato sottoposto, variano per quantità, dimensioni e distribuzione.

I siti preferiti per la precipitazione dei carburi sono i bordi grano e i difetti che, vista la bassa Stacking Fault Energy di entrambe le fasi allotropiche, si formano facilmente.

La lega ASTM F75 viene generalmente prodotta per colata o lavorazione a caldo. Il processo è seguito poi da un trattamento termico. In particolare, la lega laminata viene ricotta, mentre il materiale fuso viene omogeneizzato e successivamente temprato per formare una matrice cubica a facce centrate ricca di carbonio. Questa soluzione solida viene infine affinata in modo da ottenere una distribuzione adeguata di carburi. La struttura tipica della lega CoCrMo prodotta per colata è mostrata in figura 2.8: i carburi sono principalmente distribuiti sia all'interno dei grani sia a bordo grano.

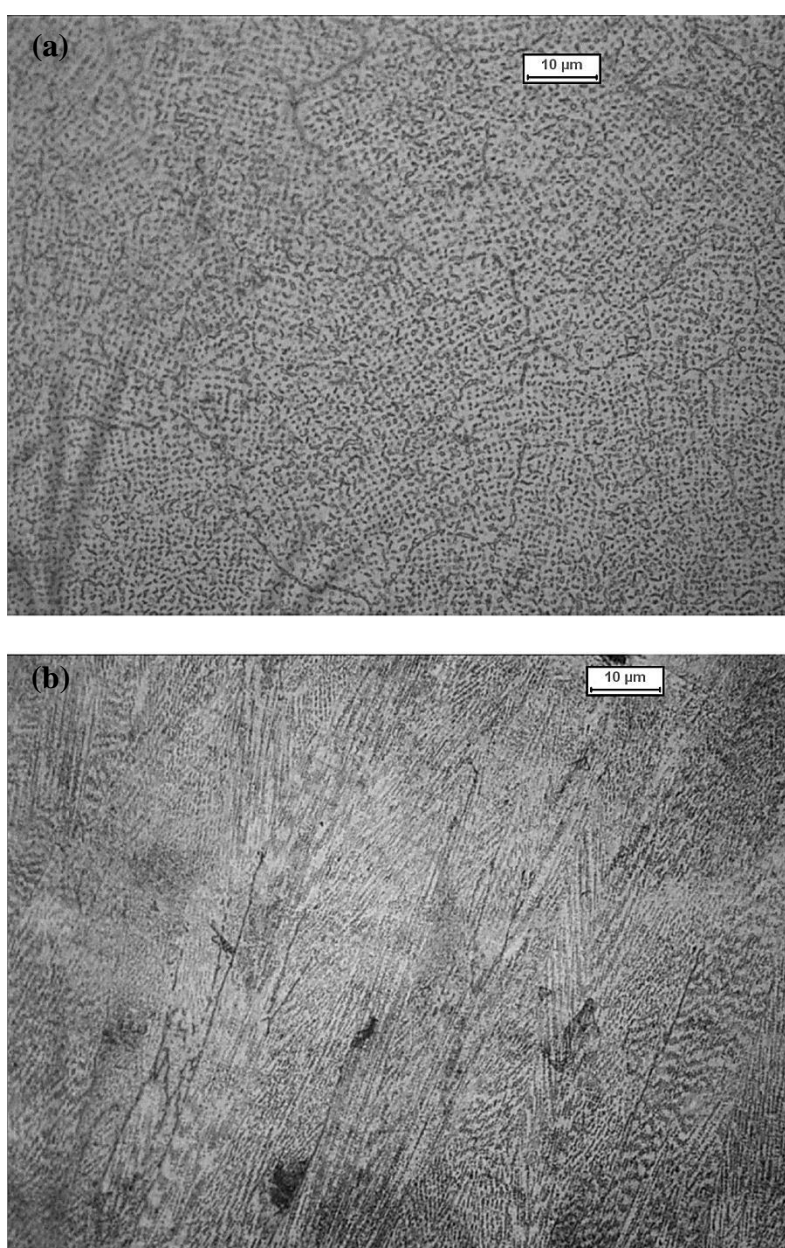


**Figura 2.8** *Microstruttura ASTM F75*

La distribuzione dei carburi è inizialmente determinata dalle caratteristiche di solidificazione come la temperatura di colata del fuso e la velocità di raffreddamento.

A causa dell'elevato sottoraffreddamento che caratterizza il processo EBM la microstruttura della lega CoCrMo risulta essere fortemente anisotropa. Dopo un attacco elettrolitico si possono osservare grani equiassici nella direzione perpendicolare alla direzione di formatura; nella sezione parallela al contrario sono presenti grani allungati.

Queste osservazioni suggeriscono che si è verificata una crescita colonnare dei grani. Il materiale inoltre presenta una massiccia distribuzione di carburi sia all'interno dei grani sia a bordo grano.



**Figura 2.9** *Microstruttura ASTM F7: (a) sezione parallela (b) sezione perpendicolare*

### *2.2.3 Proprietà meccaniche e applicazioni*

Le principali proprietà delle leghe di Co sono legate alla natura cristallografica del cobalto.

La lega viene rafforzata per dalla presenza del cromo e del molibdeno e per la formazione di carburi metallici (responsabili dell'indurimento per precipitazione).

La presenza della fase cubica a facce centrate, la quantità e la distribuzione dei carburi influenzano fortemente le proprietà meccaniche della lega.

Le strutture fcc sono associate a sistemi di scorrimento 12, e il gran numero di piani di scorrimento equivalenti porta il cristallo a scivolare contemporaneamente su più di un piano ottaedrico. Come conseguenza, lo sforzo richiesto per produrre un'ulteriore deformazione aumenta rapidamente, provocando così un incrudimento.

La struttura esagonale compatta invece è associata a una maggiore resistenza alla deformazione ma risulta meno sensibile all'incrudimento.

I carburi fungono da agenti indurenti per precipitazione: migliorano la resistenza del materiale infatti possono impedire lo slittamento di questi anche se infragiliscono il materiale fungendo da siti per la nucleazione di cricche. I carburi sono principalmente formati da cromo e molibdeno.

La loro morfologia e posizione sono fondamentali per la resistenza del materiale: quando precipitano a bordo grano, infatti, prevengono lo slittamento e la migrazione dei bordi e se sono di dimensioni sufficientemente grandi possono formare uno strato interconnesso che sostiene gli stress imposti al materiale. All'interno del bordo grano i carburi ostacolano il moto delle dislocazioni. Solitamente, la distribuzione dei carburi è determinata dalle condizioni di solidificazione. Un ulteriore trattamento di solubilizzazione seguito da un rapido raffreddamento può migliorare le proprietà meccaniche della lega.

Come detto precedentemente le leghe CoCrMo presentano elevata durezza, resistenza alla corrosione e al creep ed è per questo che vengono utilizzate per la produzione di componenti per turbine, nonché per componenti che prevedono l'usura come le protesi in ambito biomedico che prevedono un accoppiamento tribologico.

Infatti eventuali detriti causati dall'usura dei componenti sono molto dannosi per l'organismo poiché, agendo come agenti stranieri possono causare fibrosi asettica, necrosi locale e conseguente perdita del dispositivo. Un'elevata resistenza all'usura impedisce quindi il rilascio di detriti metallici diminuendo il rischio di infezioni o fallimento della protesi.

Le leghe di cobalto utilizzate per le protesi all'anca e al ginocchio sono di solito accoppiate con UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene). I due corpi messi a contatto presentano una marcata differenza di durezza: l'usura del metallo risulta quindi trascurabile rispetto a quella del polimeri i cui detriti vengono rilasciati meglio all'interno dell'organismo.



Questi possono svolgere inoltre un ruolo negativo nel processo di riassorbimento osseo con la formazione di membrane osteolitiche all'interfaccia tra l'impianto e l'osso.

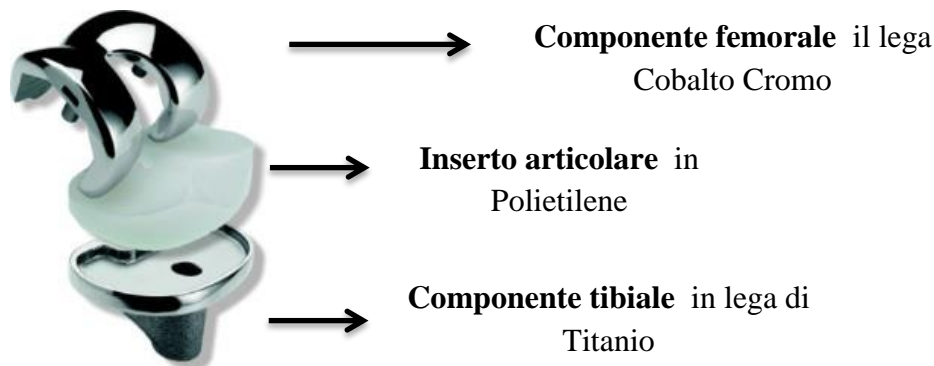
Questo introduce alcune considerazioni sulla finitura superficiale della lega: se la finitura del metallo risulta buona, l'usura sul polimero sarà inferiore e la protesi avrà vita maggiore.

Tuttavia la presenza di carburi provoca, durante la lucidatura, la formazione di una certa rugosità microstrutturale in cui la distribuzione dei carburi corrisponde alle asperità.

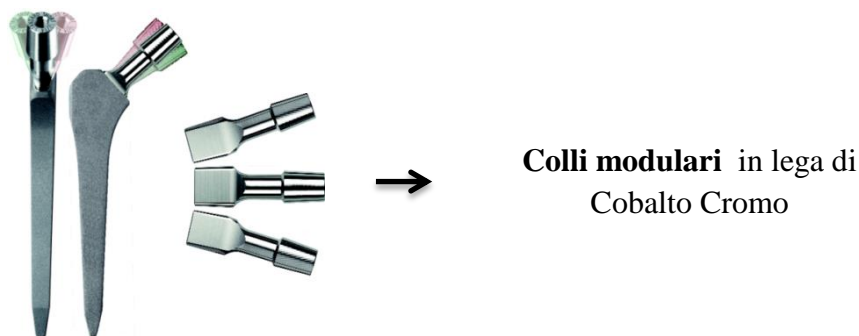
Inoltre, i carburi si possono separare dalla matrice e diventare il terzo corpo in un meccanismo di usura a tre corpi; di conseguenza una matrice esente da carburi (tipico di un materiale a basso tenore di carbonio) risulta essere più appropriata per un abbinamento con il polimero.

La struttura cristallina hcp, inoltre dà un coefficiente di attrito inferiore rispetto alla struttura fcc nel contatto metallo-metallo. Di conseguenza, modificare la struttura della lega durante lavorazione può indurre un grande miglioramento nella vita dell'impianto.

L'ambiente fisiologico, agisce parzialmente come lubrificante ma è anche aggressivo per i materiali impiantati alterando così l'accoppiamento. La degradazione dell'impianto è quindi il risultato dell'azione combinata di usura e corrosione. Per questi motivi la lega ASTM F75 risulta ideale sia per l'elevata resistenza alla corrosione e all'usura che per l'accoppiamento con l'UHMWPE.



**Figura 2.10** *Protesi del ginocchio*



**Figura 2.11** *Protesi all'anca*



# Capitolo 3

## Prove di lavorabilità

La lavorabilità viene definita come l'attitudine di un materiale di essere modificato nelle sue caratteristiche meccaniche e nella sua forma per mezzo di varie operazioni.

In questo capitolo verranno illustrate le lavorazioni che sono state effettuate sui diversi materiali, specificando il tipo di processo per asportazione di truciolo, la tipologia di lavorazione, la tipologia dell'insero utilizzato ma in particolare la condizione di lubrificazione.

### 3.1 Campagna prove

Nel seguente studio, è stato analizzato sperimentalmente il processo di tornitura cilindrica in condizioni di lavorazione di semifinitura superficiale sulle leghe di CoCrMo ASTM F1537 LC e ASTM F75. L'insero utilizzato per le lavorazioni è stato indicato dal fornitore come il più appropriato per lavorare le super leghe a base cobalto.

Per la prima lega sono state eseguite due campagne prove che si differenziano principalmente per le condizioni di lubrificazione: in primo luogo la lega CoCrMo F1537 è stata tornita a due velocità di taglio e due avanzamenti diversi per degli intervalli di tempo ben definiti con l'utilizzo di lubrificante, successivamente è stata effettuata una seconda campagna prove in condizione di lubrificazione assente.

Alla fine di ogni intervallo di lavorazione è stata valutata l'usura dell'insero attraverso la misurazione del labbro d'usura sul fianco e la rugosità superficiale della superficie lavorata nel tempo, fattore che sarà direttamente collegato con lo stato dell'utensile.

Per quanto riguarda la lega ASTM F75, prodotta per Electron Beam Melting, sono state utilizzate le medesime velocità di taglio e gli stessi avanzamenti della campagna precedente con l'utilizzo di lubrificante. In seguito, è stata effettuata una prova a secco nella condizione meno gravosa (minima velocità di taglio, minimo avanzamento) che si è ritenuto comunque essere industrialmente applicabile per l'eccessiva usura dell'insero.

Le variabili scelte per le prove di tornitura (velocità di taglio e avanzamento) sono state cambiate una alla volta e poi contemporaneamente in modo da poter valutare con maggiore precisione l'influenza dei singoli parametri. Si è scelto invece di mantenere costanti

profondità di passata, lunghezza del pezzo tornito, diametro iniziale della barra e tipologia di inserto. Lo scopo della campagna prove è quello di capire la sensibilità del materiale al variare delle condizioni di processo scelte in termini di integrità superficiale, usura dell'inserto e morfologia del truciolo prodotto.

L'integrità superficiale è stata valutata attraverso misure di rugosità effettuate con l'ausilio di un rugosimetro portatile e di un profilometro a scansione mentre l'osservazione e la quantificazione dei difetti superficiali è avvenuta mediante microscopio elettronico a scansione (SEM) che è stato utilizzato anche per l'analisi qualitativa sulla microstruttura della superficie lavorata. Lo studio delle superfici usurate degli inserti è stato realizzato mediante SEM e un rilevatore a dispersione di energia (EDS).

Le lavorazioni di tornitura sono state eseguite con un tornio a controllo numerico Mori Seiki NL1500 in grado di mantenere costante la velocità di taglio con la riduzione del diametro mentre l'utensile penetra radialmente nel pezzo all'aumentare del numero di giri.



**Figura 3.1** *Tornio a controllo numerico del dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova*

I conchi di barra di CoCrMo ASTM F1537 impiegati, sono stati tagliati da una barra originale di lunghezza 3metri in pezzi più piccoli da 300 mm con diametro iniziale di 29 mm. Le barre di CoCrMo ASTM F75 invece presentavano una lunghezza di 13,5 mm con un diametro di 50 mm. La rugosità superficiale di tali barre, createsi in seguito al processo produttivo EBM, ha richiesto pre lavorazione di una prima tornitura che ha portato il diametro iniziale di lavorazione al valore di 49 mm. Questo è stato necessario per evitare che nei test, l'inserto durante la prima passata subisse un'usura eccessiva dovuta alla particolare superficie abrasiva.

L'inserto impiegato per entrambi i materiali è stato scelto in base alle indicazioni del fornitore come il migliore per lavorare questo tipo di super leghe a base cobalto. I parametri di processo sono stati scelti in base alla qualità dell'inserto e alle indicazioni per una lavorazione di semifinitura: la profondità di passata,  $d$ , è stata mantenuta costante in tutte le lavorazioni ad un valore di 0,25 mm (per una lavorazione di semifinitura), mentre si è deciso di valutare la sensibilità del materiale alla lavorazione in base alla variazione di velocità di taglio e avanzamento.

*Attrezzature:*

Attrezzature	Codice	Descrizione
<b>Tornio</b>	<i>Mori Seiki XL 500</i>	Lunghezza max lavorabile: 1200mm N° giri massimo: 4000 giri/min $\Phi$ max installabile: 200 mm
<b>Inserto</b>	<i>Sandvik CNMG120404-SM 1105</i>	Substrato in WC a grana fine con 6% di Co per elevata durezza a caldo e buona resistenza alla deformazione plastica. Presenta un rivestimento in TiAlN per PVD Buona tenacità, usura sul fianco uniforme e prestazioni elevate Angolo di spoglia superiore: 15° Angolo di spoglia inferiore: 7°

**Tabella 3.1** *Caratteristiche delle attrezzature utilizzate*

### 3.1.1 ASTM F1537 CoCrMo in condizioni di lubrificazione e lubrificazione alternativa

Le prove sono state eseguite sia nella condizione di piena lubrificazione che di lubrificazione a secco in modo da poter analizzare l'effetto della lubrificazione sugli osservabili.

Alla fine di ogni intervallo di lavorazione: è stato tagliato il cilindretto di materiale tornito, raccolto il truciolo prodotto e misurata l'ampiezza del labbro d'usura fino al raggiungimento del valore di  $V_{bc}$  di 0,3 mm.

Le condizioni dei test effettuati sono riportati in tabella.

CoCrMo ASTM F1735								
	Lubrificazione a secco				Piena lubrificazione			
Velocità di taglio Vc (m/min)	40	40	60	60	40	40	60	60
Avanzamento f (mm/rev)	0,1	0,15	0,1	0,15	0,1	0,15	0,1	0,15

**Tabella 3.2** Parametri campagna prove ASTM F1537

### 3.1.2 Lega ASTM F75 CoCrMo EBM

Per quanto riguarda la lega CoCrMo prodotta per EBM i valori di velocità di taglio e avanzamento considerati sono stati gli stessi trattati nella lega ASTM F1537. In questo caso però si è potuto effettuare i test solamente nella condizione di piena lubrificazione poiché nel caso di lubrificazione a secco si è potuto notare, già nel caso meno gravoso ( $V_c = 40$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev), un usura eccessiva dell'inserto che comporterebbe un'alterazione dell'integrità superficiale del pezzo.

I tempi di lavorazione sono stati impostati ad intervalli fissi (1, 3, 8, 15 minuti), a differenza del caso precedente, poiché l'usura osservata sull'inserto non appariva uniforme per consentire una corretta misurazione di  $V_{bc}$ . Si è perciò deciso di utilizzare come tempo di fine vita dell'inserto quello indicato dal fornitore, corrispondente a 15 minuti di lavorazione.

Le condizioni dei test effettuati sono riportati in tabella.

CoCrMo ASTM F75						
	Piena lubrificazione				Lubrificazione a secco	
Velocità di taglio Vc (m/min)	40	40	60	60	40	
Avanzamento f (mm/rev)	0,1	0,15	0,1	0,15	0,1	

**Tabella 3.3** Parametri campagna prove ASTM F75

## 3.2 Metodologie di analisi

### 3.2.1 Rugosimetro

Le misure di rugosità superficiale sono state effettuate con l'ausilio di un rugosimetro portatile Taylor Hobson Surtronic 25. Questo modello presenta un ampio display con un menu semplice e con nuovi parametri aggiornati. La sua rigidità meccanica e la precisione dello stilo consente di ottenere misurazioni affidabili e ripetibili della finitura superficiale di diversi materiali in una vasta gamma di applicazioni.

Surtronic 25 è alimentato a batteria e può essere utilizzato su superfici sia verticali sia orizzontali.



**Figura 3.2** *Rugosimetro portatile*

Alcune delle misure che possono essere effettuate sono:

- $R_a$  (deviazione della media aritmetica)
- $R_{sk}$  (asimmetria)
- $R_z$  (picco medio di altezza valle)
- $R_t$  (altezza totale del profilo)
- $R_p$  (altezza del picco massimo)

Questi parametri rappresentano i requisiti più comuni per verificare l'effetto del lubrificante, avanzamento, sollecitazioni, attrito e resistenza all'usura.

Il rugosimetro è dotato inoltre di un sistema di analisi veloce dove i risultati sono calcolati e visualizzati anche prima che l'unità ritorni in traslazione riducendo così i cicli di misurazione. Nel presente studio, impostando lo strumento con un cut-off di 0,8 mm, sono stati valutati i parametri  $R_a$  ed  $R_z$  dei pezzi di materiale tornito nelle diverse condizioni di velocità e avanzamento in funzione del tempo di lavorazione.

### **3.2.2 Profilometro**

L'analisi della superficie lavorata è stata effettuata attraverso l'utilizzo di un profilometro ottico 3D senza contatto Sensofar PLu Neox, il quale combina la misurazione 3D con la capacità confocale e di interferometria. La combinazione di entrambe le tecniche rende il NEOX un sistema unico che supera gli esistenti sistemi ottici.

Il profilometro è in grado di ottenere rapidamente misurazioni non invasive di micro e nano geometrie di superfici in configurazioni multiple con velocità di scansione confocale fino a 12,5 fps. Il Neox utilizza come rilevatore metrologico una fotocamera CCD bianco e nero, a alta velocità di risoluzione ed una telecamera a colori per l'ispezione di superfici brillanti che può essere utilizzata per creare viste 3D delle misurazioni.

Grazie alla velocità di acquisizione delle immagini il profilometro ottico 3D è lo strumento ideale per l'analisi veloce e ad alta risoluzione della topografia di ottiche, rivestimenti, ceramiche, celle solari e superfici lavorate.



**Figura 3.3** *Profilometro Sensofar PLu Neox*

### **3.2.3 Microscopio ottico**

Il microscopio ottico è stato utilizzato per la caratterizzazione della microstruttura del materiale in combinazione al microscopio elettronico a scansione che verrà descritto in seguito. Le immagini digitali sono state acquisite da un sistema, Leica DC300, collegato al sistema ottico del microscopio.



I campioni sono inizialmente inglobati e successivamente stati preparati attraverso lappatura e lucidatura con carte abrasive e panni con soluzioni disperse di diamante. i campioni sono stati successivamente attaccati. Le procedure effettuate per ogni materiale sono illustrate in tabella.

	<b>CoCrMo ASTM F1537</b>	<b>CoCrMo ASTM F75</b>	<b>Trucioli CoCrMo ASTM F1537</b>
<b>Carte abrasive</b>	Gr. 60	Gr. 60	-
	Gr. 120	Gr. 120	-
	Gr. 320	Gr. 320	-
	Gr.500	Gr.500	Gr. 500
	Gr.800	Gr.800	Gr.800
	Gr.1200	Gr.1200	Gr.1200
<b>Panni</b>	Soluzione 6 $\mu\text{m}$	Soluzione 6 $\mu\text{m}$	Soluzione 6 $\mu\text{m}$
	Soluzione 1 $\mu\text{m}$	Soluzione 1 $\mu\text{m}$	Soluzione 1 $\mu\text{m}$
<b>Attacco</b>	Chimico-2 min	Elettrolitico- 4V- 4s	Chimico-2 min
	33 ml HCl	94 ml H <sub>2</sub> O	33 ml HCl
	1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4,5 ml soluzione 65% HNO <sub>3</sub>	1 ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
		1,5 ml soluzione 40% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	

**Tabella 3.4** Preparazione metallografica dei campioni

Tutti gli attacchi chimici ed elettrolitici sono stati effettuati subito dopo la lucidatura dei campioni con l'ultimo panno per evitare la formazione dell'ossido superficiale che aumenterebbe la resistenza alla corrosione del materiale.

L'attacco chimico riguardante i trucioli di CoCrMo forgiato è stato attivato con un contenitore metallico prima dell'immersione dei campioni.

### 3.2.4 Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) e Electronic Data System (EDS)

Nel SEM i diversi punti del campione vengono esplorati in successione da un sottile fascio elettronico: l'interazione degli elettroni col campione dà luogo alle emissioni precedentemente citate, le quali, opportunamente rilevate, possono essere usate per formare altrettante immagini della zona esplorata. La struttura base dello strumento è illustrata in figura 3.4.

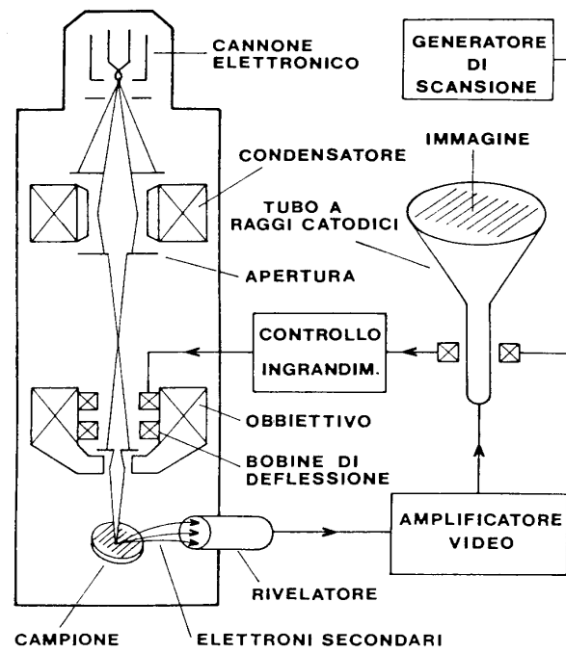


Figura 3.4 Modello microscopio elettronico a scansione (SEM)

Un catodo, costituito, di solito, da un filamento di tungsteno incandescente, genera, per effetto termoionico, degli elettroni che sono accelerati dal campo elettrico esistente tra il catodo, mantenuto ad un elevato potenziale negativo, e l'anodo collegato a massa.

Questo complesso, detto cannone elettronico, produce un fascio di elettroni di elevata energia con un diametro di circa 50m (dimensione della sorgente virtuale), che viene focalizzato da un sistema di lenti magnetiche (condensatore ed obiettivo). Il condensatore controlla la corrente del fascio e ne effettua una prima riduzione in diametro; l'obiettivo effettua la riduzione finale del fascio (fino ad una sezione finale di 50 100 A) e lo focalizza sul campione.

Nell'obiettivo sono incorporate due coppie di bobine di deflessione che fanno muovere il fascio secondo linee parallele successive, facendogli esplorare una piccola zona quadrata. Un dispositivo consente di spostare il campione relativamente al fascio per variare la zona in esame, nonché di variarne l'inclinazione.

Successivamente gli elettroni emessi vengono raccolti da un opportuno rivelatore, inviati ad un amplificatore video che trasmette poi l'immagine.

Per quanto riguarda i campioni che possono essere esaminati, essi devono essere conduttori o resi tali mediante evaporazione di un sottile strato metallico: un campione non conduttore infatti si caricherebbe elettricamente causando distorsioni e contrasti anomali dell'immagine.

Un elemento che contribuisce alla versatilità del SEM è la possibilità di ottenere immagini mediante le diverse radiazioni emesse dal campione quando sia esplorato dal fascio di elettroni primari.

Esaminiamo allora i diversi metodi di rivelazione e le informazioni ottenibili nei vari casi.

Di seguito verranno descritte solamente le principali radiazioni emesse: gli elettroni secondari e quelli retrodiffusi.

**Elettroni secondari:** il metodo più comune di rivelazione degli elettroni secondari prevede una gabbia di Faraday polarizzata a +200 V rispetto al campione; questa è in grado di attirare gli elettroni secondari che vengono successivamente accelerati verso uno scintillatore.

Gli elettroni con l'energia così acquisita hanno la possibilità di produrre elettroni nello scintillatore, i quali a loro volta, sono rilevati da un fotomoltiplicatore.

L'immagine ottenuta ha una notevole analogia con quella realizzabile utilizzando un microscopio ottico; ciò accade poiché la causa principale di variazione di emissione di elettroni secondari nei diversi punti del campione è legata alla sua morfologia esterna e più in particolare dall'angolo che la superficie forma con il fascio incidente.

La risoluzione raggiungibile dipende in primo luogo dalla sezione del fascio con cui si esplora la superficie del campione: un minore diametro del fascio consente una maggiore risoluzione.

Alla risoluzione è legato l'ingrandimento massimo significativo (quello oltre il quale non si osservano nuovi dettagli) di uno strumento, in questo caso circa 20000X.

**Elettroni retrodiffusi:** il sistema di rivelazione descritto nel paragrafo precedente rivela non solo gli elettroni secondari ma anche una parte di quelli retrodiffusi. Solamente una modesta frazione di questi elettroni è emesso entro l'angolo solido sotteso dallo scintillatore.

L'immagine rispecchia essenzialmente la morfologia della superficie del campione.

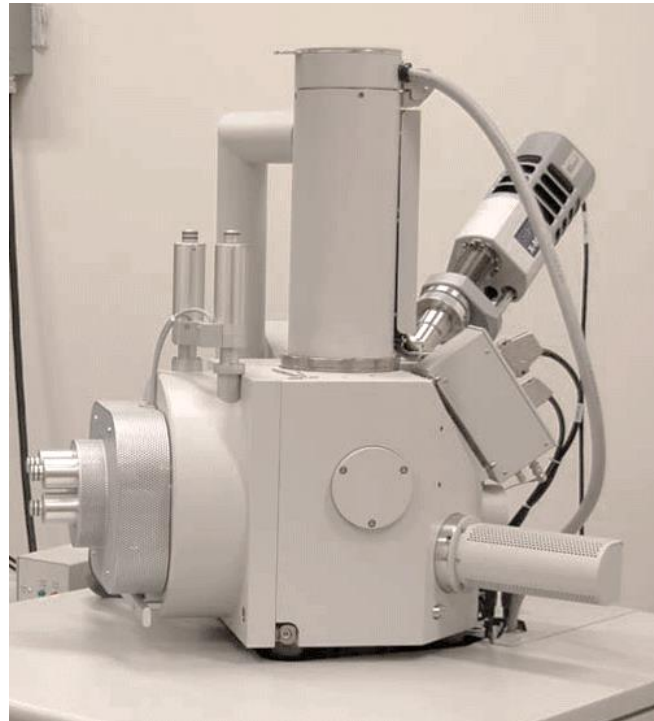
Il contrasto è tuttavia legato in questo secondo caso alla produzione degli elettroni che ha rendimento variabile a seconda del numero atomico dell'elemento interessato: diventa allora importante la composizione del campione. La risoluzione delle immagini con elettroni retrodiffusi è legata al volume di emissione, il quale, dato il maggiore potere penetrante degli elettroni di energia elevata risulta molto maggiore del corrispondente per gli elettroni secondari.

Per l'osservazione della microstruttura dei materiali in esame, della morfologia del trucioli, dei difetti superficiali prodotti durante la lavorazione e dell'usura degli inserti si è utilizzato un microscopio elettronico a scansione Quanta 450. I campioni per l'analisi sono stati incorporati in una resina polimerica, lappati, lucidati ed attaccati secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.2.3.

Per quanto riguarda l'analisi dei trucioli invece, questi sono stati smaltati, incorporati in una farfallina metallica, lucidati e attaccati come visto precedentemente.

L'analisi chimica (microanalisi) nel microscopio elettronico (SEM) a scansione viene realizzata misurando l'energia e la distribuzione delle intensità dei raggi X generati dal fascio elettronico sul campione utilizzando un rivelatore a dispersione di energia EDS (spettrometria per dispersione di energia). L'analisi che viene prodotta può essere sia dell'area sia in quel momento viene ingrandita, oppure, fermando la scansione del fascio elettronico, di un punto di interesse sulla superficie del campione.

La microanalisi nel seguente studio è stata effettuata per analizzare la presenza di materiale incollato sulla superficie dell'inserto.



**Figura 3.5** SEM Quanta 450 con sonda EDS

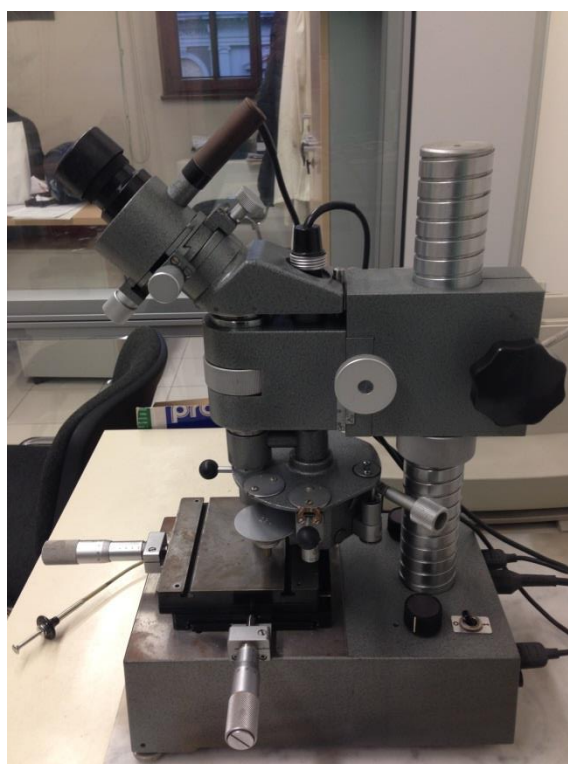
### 3.2.5 Microdurezza

Per risalire ai valori di durezza superficiale dei vari campioni, sono state eseguite prove di durezza Vickers con l'utilizzo di un microdurometro Leitz Durimet.

Il microdurometro Vickers è infatti a sua volta un microscopio ottico metallografico dotato di penetratore a punta piramidale in diamante. L'ottica dello strumento consente di visualizzare l'impronta e di misurarne le diagonali. Da questa misura si risale alla durezza del materiale. Possono essere applicati carichi diversi al penetratore, da 15 grammi a 1 chilogrammo. Ciò consente l'esame di materiali molto diversi.

I campioni sono stati preparati mediante la classica preparazione metallurgica di lucidatura e attacco chimico.

Un carico di 50 g è stato utilizzato per un tempo di 30 secondi per realizzare un profilo di durezza che prevedeva la realizzazione di 14 impronte dalla superficie lavora del campione fino ad arrivare al materiale bulk. Il passo utilizzato aumentava progressivamente e le distanze registrate sono state le seguenti, dalla superficie del campione: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 170, 200, 230, 280, 310, 360 e 410  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3.6** *Microdurometro*



# Capitolo 4

## Risultati

Nel seguente capitolo vengono riportati i risultati ottenuti durante la campagna sperimentale, riferiti alle analisi di lavorabilità svolte sulle leghe di CoCrMo ASTM F1537 e ASTM F75.

Il capitolo è suddiviso nei diversi aspetti indagati per definire la lavorabilità del materiale: usura dell'inserto, qualità superficiale della zona tornita, variazioni microstrutturali e morfologia del truciolo.

### 4.1 Usura dell'inserto

L'usura dell'utensile durante la lavorazione è influenzata da numerosi parametri come: le condizioni di taglio, la geometria e il materiale dell'inserto e le proprietà del materiale lavorato. Lo scopo di questa analisi consiste nel valutare l'effetto dei parametri di taglio, velocità di taglio e avanzamento, considerando la profondità di passata costante al valore di 0,25 per due diverse condizioni di lubrificazione (piena lubrificazione e lubrificazione a secco). Il criterio di durata dell'utensile utilizzato è diverso per le due diverse leghe in analisi: per la prima (CoCrMo ASTM F1537) il valore di fine vita dell'inserto si verifica quando, come da normativa ISO 3685,  $V_{bc}$  (indice dell'usura sul fianco dell'utensile) raggiunge il valore di 0,3 mm. La condizione di lavorazione di semifinitura fa sì che il raggio dell'utensile sia maggiore della profondità di taglio adottata e in questo modo l'usura sul fianco si è concentrata sotto la punta dell'inserto, indicata come zona C nella normativa. Di seguito vengono riportati i grafici che rappresentano l'andamento di  $V_{bc}$  in funzione del tempo di lavorazione al variare delle diverse condizioni di velocità di taglio e avanzamento.

I grafici evidenziano il tempo limite di lavorazione che corrisponde al raggiungimento del valore di  $V_{bc}$  pari a 0,3 mm confrontato l'effetto della velocità di taglio e l'effetto dell'avanzamento al variare dell'utilizzo del lubrificante.

Per la lega ASTM F75 prodotta per EBM invece, l'usura sul fianco dell'inserto non si presentava uniforme come nel caso precedente e di conseguenza non è stato possibile misurare un valore rappresentativo di  $V_{bc}$ . Per questo motivo, si è deciso di fissare come fine vita dell'utensile un tempo di lavorazione di 15 minuti (valore indicato dal fornitore).

L'usura degli inserti utilizzati per questa lega è stata valutata poi attraverso il microscopio elettronico a scansione e successiva analisi EDS.

### 4.1.1 Andamento labbro d'usura $V_{bc}$ - CoCrMo F1537

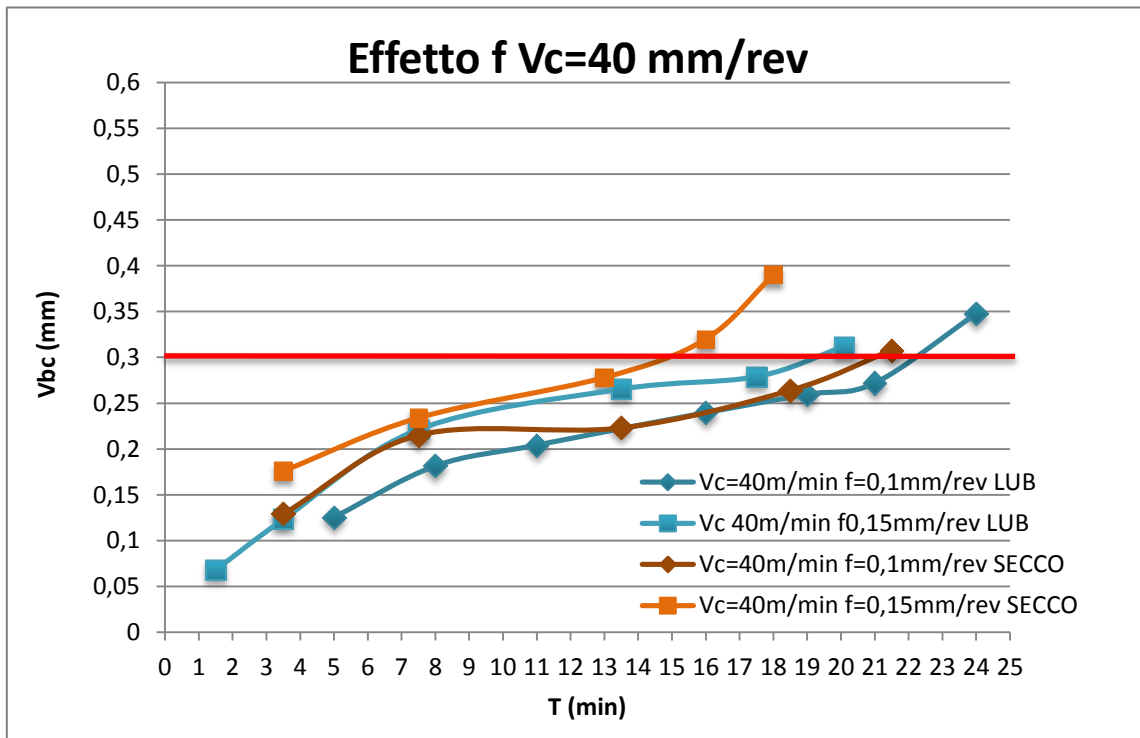


Figura 4.1 Andamento di  $V_{bc}$  con  $V_c=40$  m/min

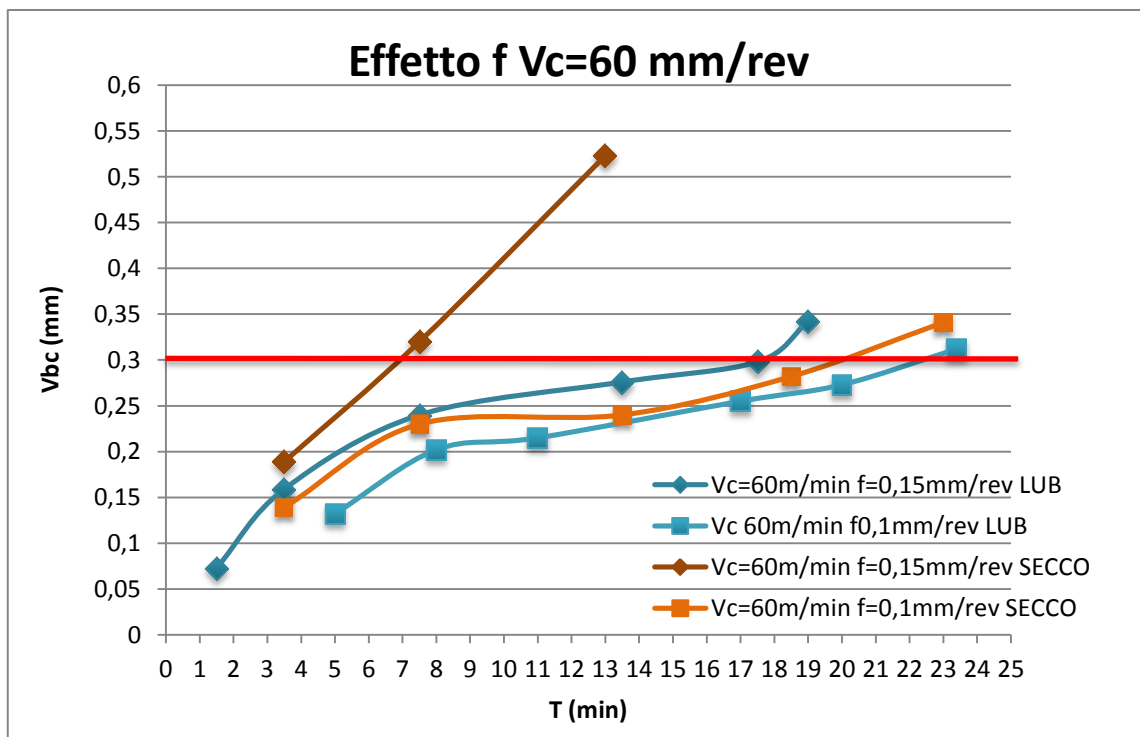


Figura 4.2 Andamento di  $V_{bc}$  con  $V_c=60$  m/min



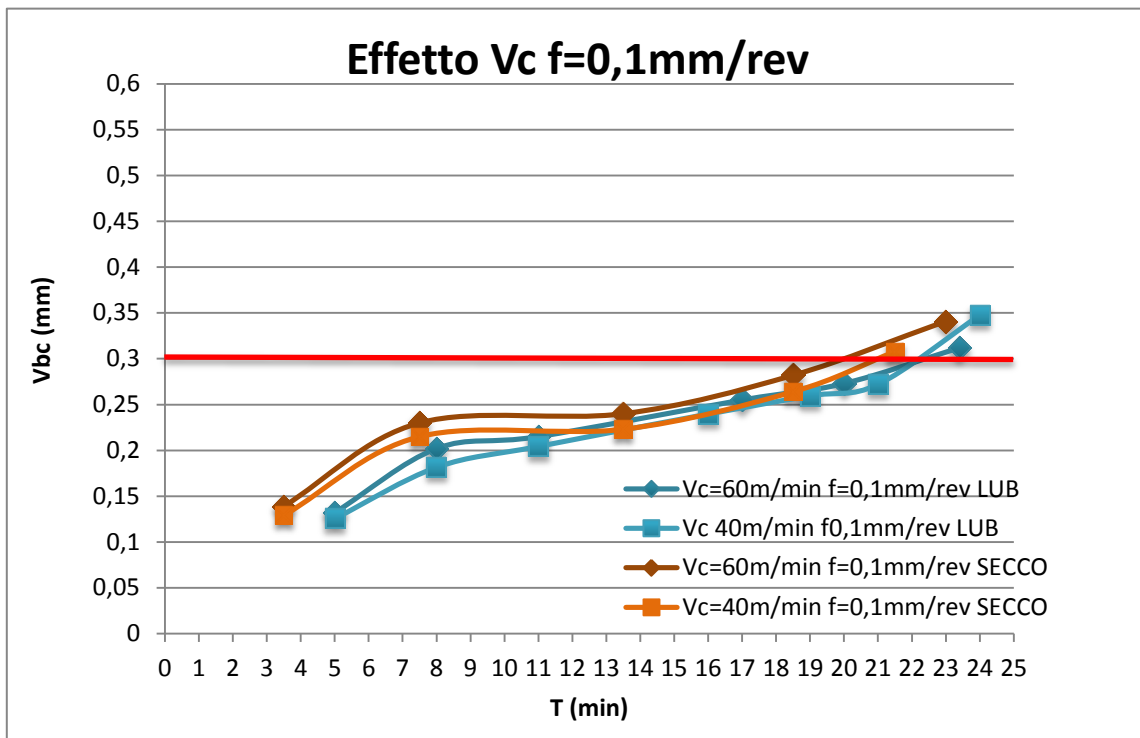


Figura 4.3 Andamento di Vbc con f=0,1 mm/rev

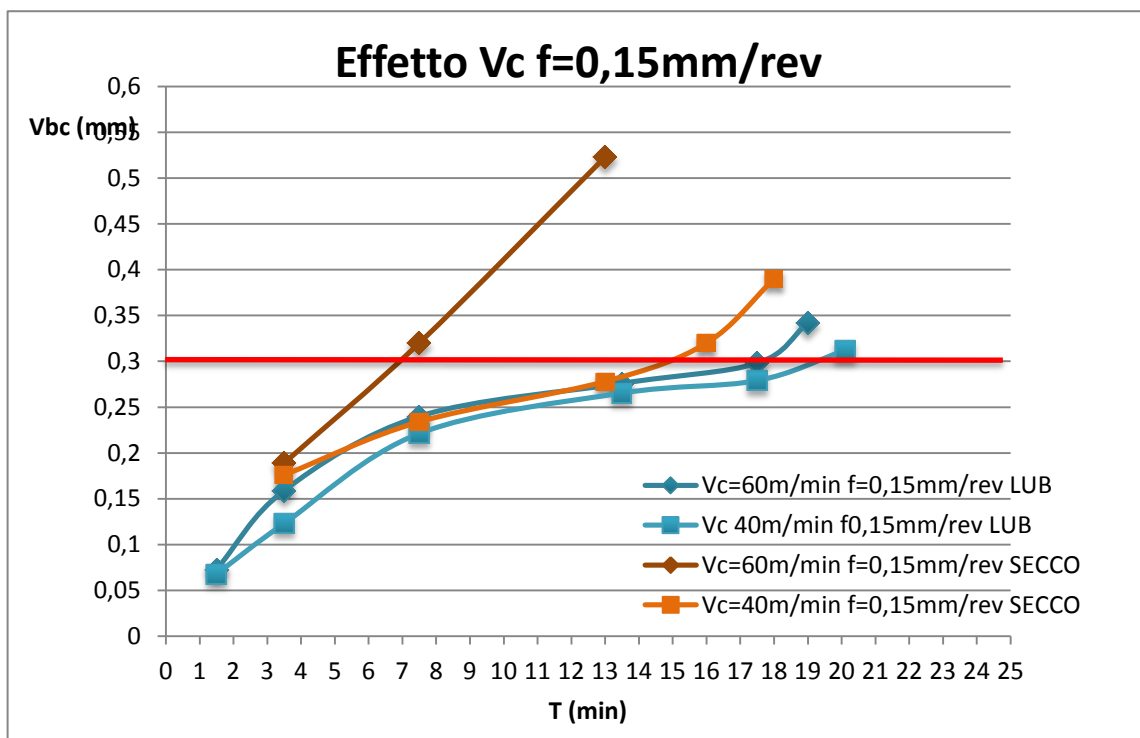


Figura 4.4 Andamento di Vbc con f=0,15 mm/rev

Gli andamenti di  $V_{bc}$  mostrati nei grafici mostrano principalmente tre zone caratteristiche: la prima zona, corrispondente ad un tempo di circa 7/8 minuti, presenta un rapido aumento dell'usura dell'inserto, la seconda zona è invece caratterizzata da un andamento quasi costante, mentre nell'ultimo tratto si nota un ulteriore incremento della pendenza della curva indice di un rapido aumento di  $V_{bc}$  fino ad arrivare al valore limite di 0,3mm.

A questi andamenti caratteristici, riscontrati anche in letteratura, fa eccezione il caso con  $V_c$  pari a 60 m/min e  $f$  0,15 mm/rev in condizione di lubrificazione a secco. Si può notare come il secondo tratto ad usura costante sia totalmente assente e l'inserto in queste condizioni subisce, all'aumentare del tempo di lavorazione, un aumento lineare dell'usura.

L'effetto della velocità di avanzamento è preponderante: mentre un passaggio da una velocità di taglio di 40 m/min a 60 m/min non comporta variazioni di tempo limite sostanziali (figura 4.3) un passaggio da  $f$  pari a 0,1 mm/rev al valore di 0,15 si.

Nella condizione di piena lubrificazione con  $V_c = 40$  m/min l'aumento della velocità di avanzamento comporta una riduzione del della durata dei test da un tempo di 24 min (con  $f=0,1$ ) a 20,1 min (con  $f=0,15$ ). Allo stesso modo per una velocità di taglio pari a 60 m/min la riduzione del tempo di lavorazione di 4,4 minuti.

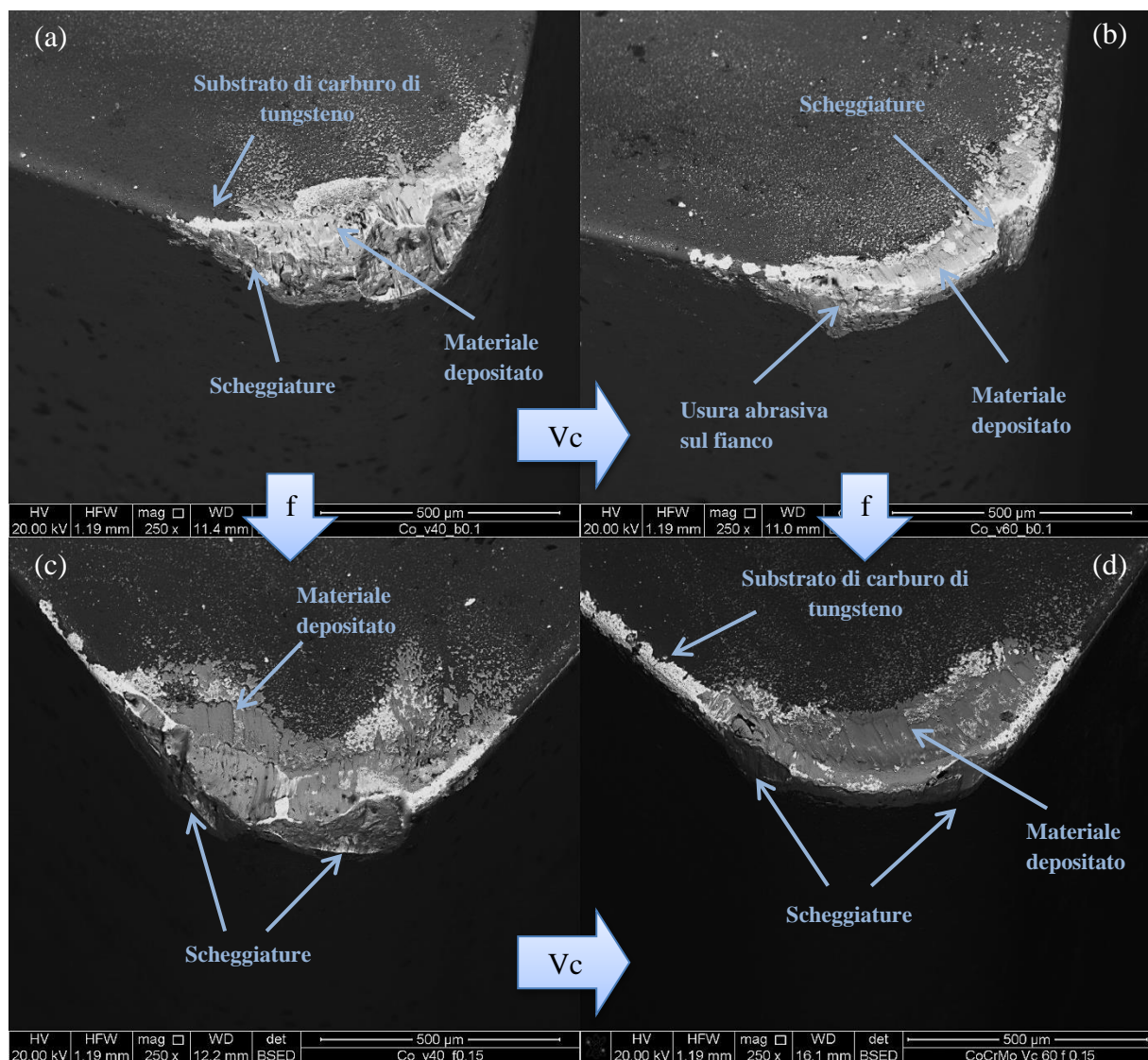
Anche nella condizione a secco si è riscontrato un decremento del tempo di lavorazione all'aumento del valore della velocità di avanzamento; effetto particolarmente marcato nella condizione con  $V_c=60$  m/min dove il tempo di fine test passa da 23 min nel caso di  $f=0,1$  mm/rev a 13 min per  $f=0,15$  mm/rev.

L'utilizzo del lubrificante diventa necessario nella condizione che prevede la massima velocità di taglio e il massimo avanzamento ( $V_c=60$  m/min,  $f=0,15$  mm/rev) mentre nelle altre tre combinazioni l'assenza del lubrificante può essere presa in considerazione dato che il limite di 0,3 mm non viene raggiunto prima dei 15 minuti di lavorazione (tempo di fine vita dell'inserto indicato dal fornitore).

### 4.1.2 Foto inserti impiegati su CoCrMo F1537: dipendenza dei parametri di processo

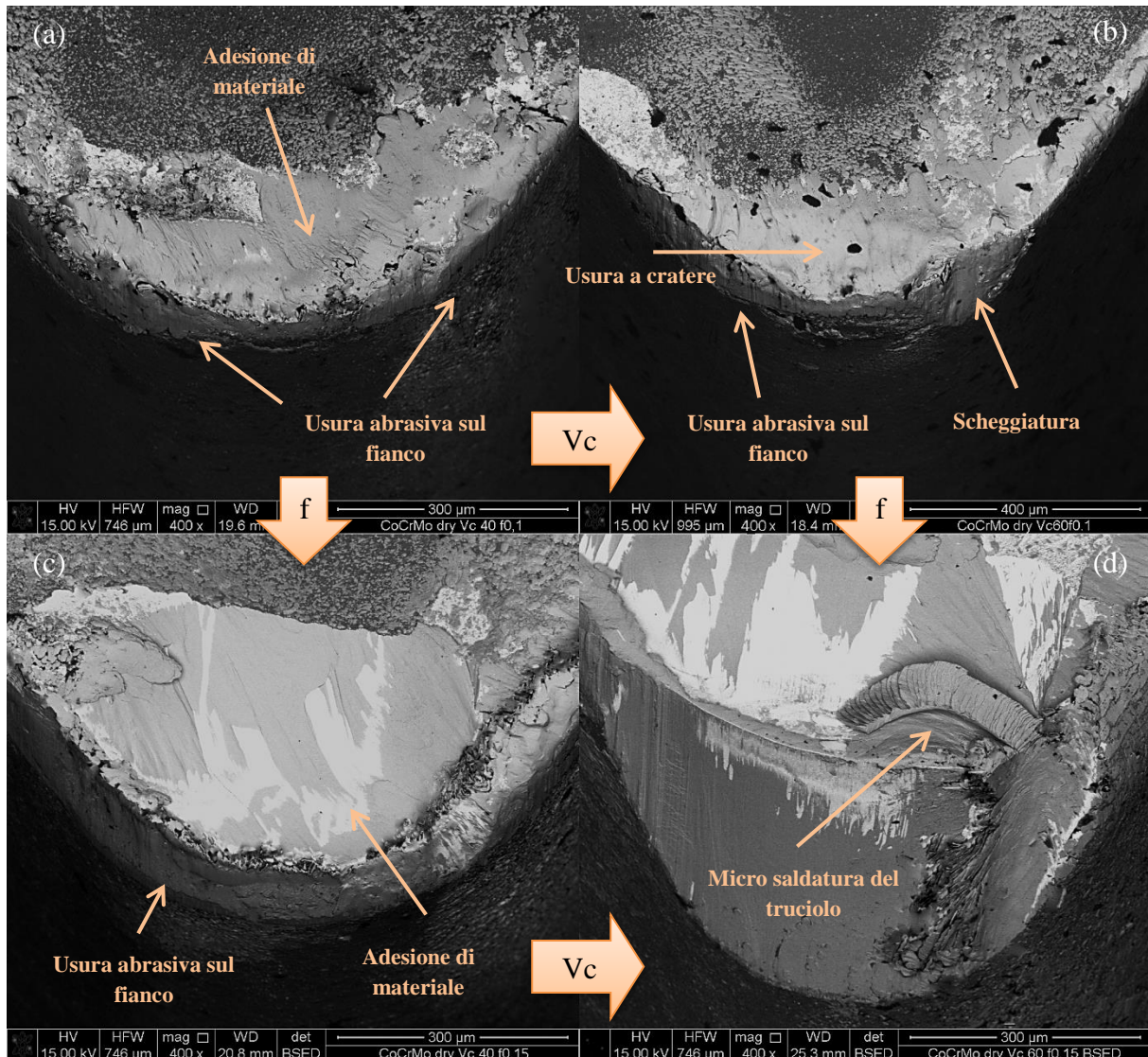
Di seguito verranno riportate le immagini degli inserti utilizzati nei test di lavorabilità riferiti alle diverse condizioni a fine vita, nelle due condizioni di lubrificazione.

*Condizione di piena lubrificazione*



**Figura 4.5** Usura degli inserti a fine test in presenza di lubrificante (a)  $V_c=40$  m/min  $f=0,1$  mm/rev (b)  $V_c=60$  m/min  $f=0,1$  mm/rev (c)  $V_c=40$  m/min  $f=0,15$  mm/rev (d)  $V_c=60$  m/min  $f=0,15$  mm/rev

## Condizione di lubrificazione a secco



**Figura 4.6** Usura degli inserti a fine test a secco (a)  $V_c=40$  m/min  $f=0,1$  mm/rev (b)  $V_c=60$  m/min  $f=0,1$  mm/rev (c)  $V_c=40$  m/min  $f=0,15$  mm/rev (d)  $V_c=60$  m/min  $f=0,15$  mm/rev

In tutte le condizioni analizzate si evidenzia che l'usura dell'inserto è dovuta ad una severa adesione del materiale lavorato sul fianco e sul petto dell'utensile. Inoltre, sono presenti scheggiature, usura abrasiva, usura del rivestimento di TiAlN e formazione di usura a cratere. Per tutte le condizioni di lavorabilità è presente in modo più o meno marcato il fenomeno di adesione di materiale sull'inserto, evidenziato da un colore grigio chiaro nelle figure. Il fenomeno di adesione è fortemente influenzato dalla temperatura tra utensile e superficie lavorata che si raggiunge durante il processo. È possibile notare infatti che mentre nella condizione di piena lubrificazione, sebbene sia presente adesione, questa risulta minima nella

condizione a secco dove le temperature in gioco sono molto più elevate l'usura per adesione diventa preponderante nella durata dell'inserto.

L'adesione inoltre limita fortemente il processo abrasivo poiché il materiale incollato funge da barriera allo scorrimento del truciolo sul petto dell'utensile.

Durante i primi minuti di lavorazione, si ha inizialmente un'usura del rivestimento dell'inserto a causa dell'attrito formatosi tra il truciolo e l'utensile. Aumentando il tempo di lavorazione, aumenta il fenomeno adesivo e iniziano a formarsi delle scheggiature (chipping) sulla punta del tagliente, fino ad arrivare al valore di  $V_{bc}=0,3$  mm dove il tagliente presenta una smussatura sul naso che comporta un aumento della rugosità superficiale della superficie lavorata. L'immagine 4.5 (a) mostra lo stato dell'inserto nella condizione a velocità di taglio 40 m/min e  $f=0,1$  mm/rev con lubrificante a fine test.

Passando da un valore dell'avanzamento di 0,1 mm/rev ad un valore di 0,15 mm/rev si può vedere come il meccanismo rimane lo stesso ma la zona tra il naso e il fianco dell'utensile presenta un'usura maggiore. Le scheggiature sono sempre concentrate sulla punta, mentre sul fianco si nota un'usura più uniforme del rivestimento e un apporto di materiale incollato maggiore sul petto dell'inserto. Aumentando la velocità a 60 m/min, invece, non si osserva una forte presenza di scheggiature come nel caso precedente e la quantità di materiale aderito è minore. Nella condizione che prevede l'utilizzo del lubrificante il meccanismo di usura non presenta microfessurazioni, tagliente di riporto, deformazioni plastiche o usura a cratere (presente invece nel caso di lubrificazione a secco).

La figura 4.6 mostra le quattro combinazioni di velocità di taglio e avanzamento a fine test solamente in assenza di lubrificante. Come già detto precedentemente il fenomeno adesivo è accentuato dall'aumento della temperatura, infatti in queste immagini si può notare, rispetto al caso precedente, un sensibile aumento di materiale incollato sul petto dell'utensile.

Nel caso limite ( $V_c=60$  m/min e  $f=0,15$  mm/rev) l'elevata temperatura tra inserto e truciolo ha portato ad una micro saldatura di un frammento di truciolo durante la lavorazione. A differenza del caso precedente inoltre si aggiunge l'usura a cratere sul petto dell'utensile.

Limitando la velocità di avanzamento a 0,1 mm/rev ottengo, sia per velocità pari a 40 m/min che per 60 m/min, una riduzione di scheggiature e fratture. Questo rappresenta un buon accordo per attuare la produzione di impianti chirurgici che richiedono particolari torniti limitando al minimo l'utilizzo del lubrificante.

L'analisi dell'usura degli inserti è utile combinata all'effetto della rugosità superficiale, infatti per poter stabilire la condizione di processo migliore bisogna ricercare il caso che dia una minore rugosità superficiale, essendo una lavorazione di semifinitura.

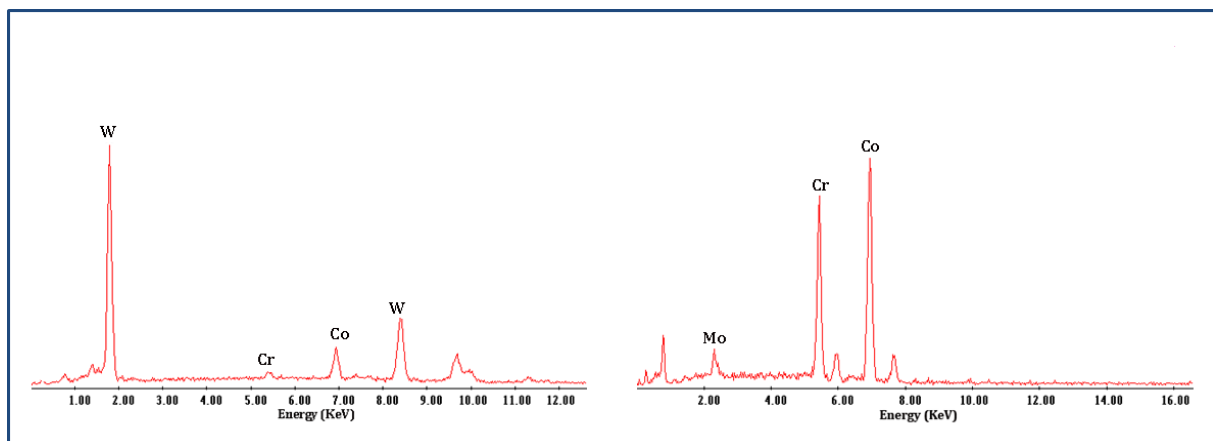
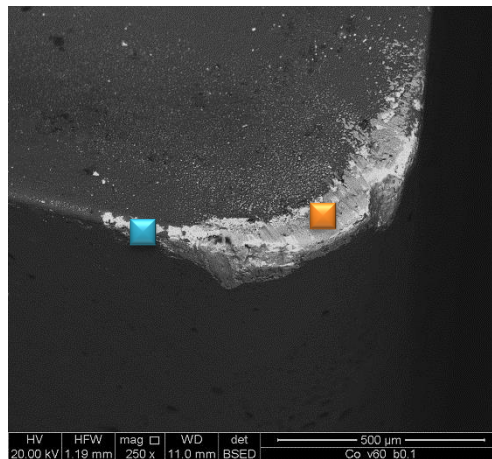
L'aumento della velocità di taglio, come si vedrà in seguito, non comporta un aumento sostanziale del valore di  $R_a$ , quindi si predilige come condizione più favorevole quella con  $V_c$  maggiore, in modo da poter aumentare la produttività, limitando però il valore di  $f$  a 0,1 mm/rev.

### 4.1.3 Analisi EDS – CoCrMo F1537

L'analisi EDS è stata svolta in due aree diverse del petto dell'utensile a fine vita ( $V_c=0,3$  mm) dopo la lavorazione che prevedeva velocità di taglio di 60 m/min e  $f$  pari a 0,1 mm/rev sia a secco sia con l'impiego di lubrificante.

Come si può vedere dalle immagini non è presente un sostanziale cambiamento tra le due condizioni; infatti i picchi caratteristici degli elementi che vengono riconosciuti dalla sonda sono i medesimi.

*Condizione di piena lubrificazione*

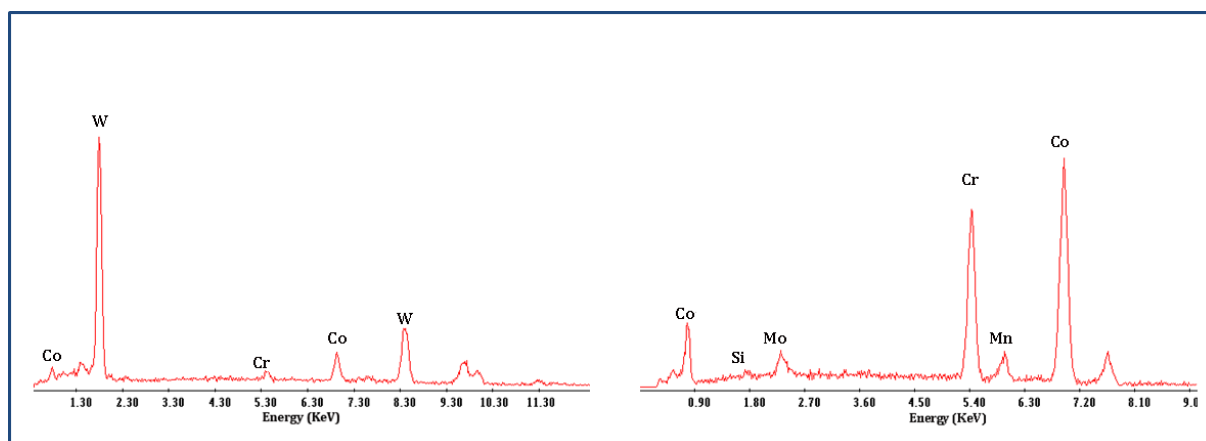
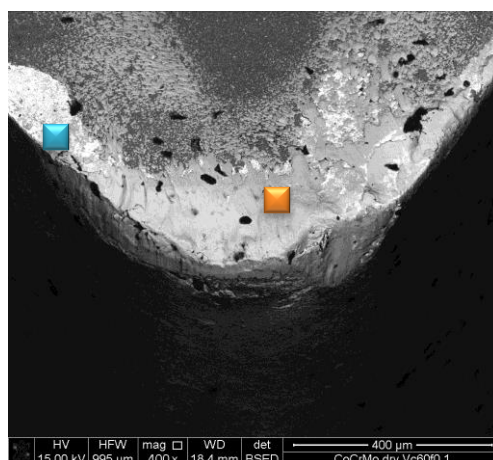


■ Zona chiara

■ Zona grigia

**Figura 4.7** Spettro EDS  $V_c=60$  m/min  $f=0,1$  mm/rev con lubrificante a fine vita

## Condizione di lubrificazione a secco



■ Zona chiara

■ Zona grigia

**Figura 4.8** Spettro EDS  $V_c=60$  m/min  $f=0,1$  mm/rev a secco a fine vita

Dagli spettri ottenuti durante l'analisi EDS in entrambe le condizioni, si può notare come la zona chiara, caratterizzata dalla prevalenza di usura abrasiva, mostri picchi relativi al tungsteno. Questo significa che il rivestimento in TiAlN è stato totalmente asportato durante la lavorazione lasciando così in superficie solamente il materiale dell'inserto non rivestito.

In questa zona sono anche presenti basse percentuali di cobalto e cromo dovute alla presenza di un contributo di usura adesiva nella zona analizzata.

Nella zona color grigio pastello invece, predomina l'effetto adesivo del materiale lavorato sul petto dell'utensile, infatti i picchi preponderanti sono quelli relativi al materiale incollato: Co, Cr e Mo.

L'effetto del lubrificante per quanto riguarda questo tipo di analisi risulta quindi irrilevante: il meccanismo di usura in entrambi i casi è il medesimo e gli elementi riscontrati sulle zone usurate non variano di quantità in modo significativo.

#### 4.1.4 Foto inserti impiegati su CoCrMo F75: dipendenza dei parametri di processo

Per valutare l'usura dell'inserto durante la lavorazione di questa lega si è deciso di fissare degli intervalli di tempo di lavorazione, alla fine dei quali l'inserto è stato smontato e osservato con l'ausilio un microscopio ottico fissando come tempo di fine vita 15 min.

Successivamente per un'analisi approfondita sull'inserto, sono state fatte delle foto con il microscopio elettronico a scansione, in grado di evidenziare più accuratamente il tipo di usura presente.

##### *Piena lubrificazione*

	$V_c=40m/min$ $f=0,1mm/rev$	$V_c=40m/min$ $f=0,15mm/rev$	$V_c=60m/min$ $f=0,1mm/rev$	$V_c=60m/min$ $f=0,15mm/rev$
3 min				
8 min				
15 min				

**Tabella 4.1** Immagini al microscopio ottico dell'usura degli inserti nel tempo per la lega ASTM F75



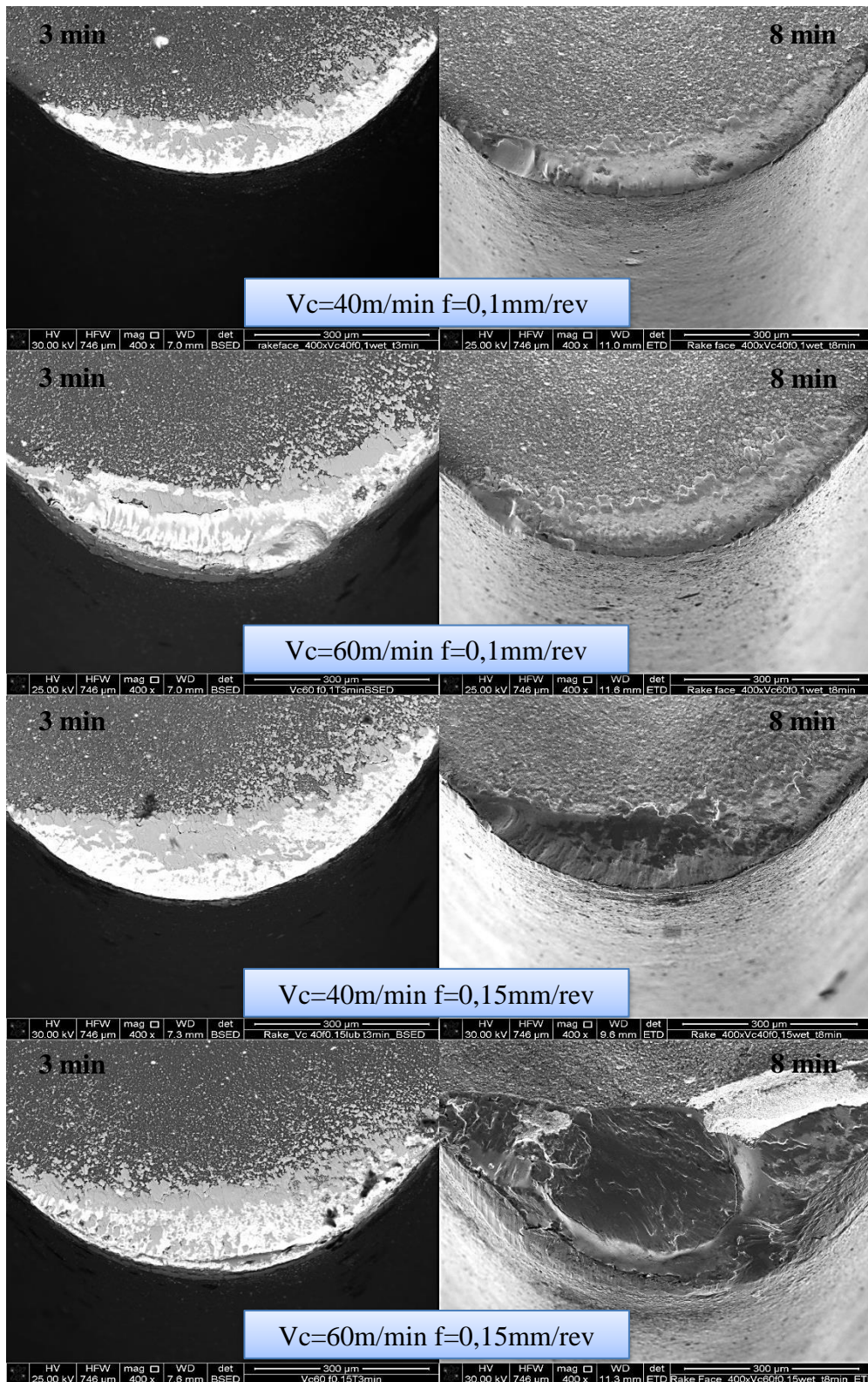


Figura 4.9 Immagini al SEM degli inserti: a sx per 3min di lavorazione a dx per 8 min di lavorazione

Dalle immagini al microscopio ottico si può subito notare come il tipo di usura prevalente sull'inserto è l'usura a cratere. Il materiale che si presenta molto più duro e abrasivo rispetto al precedente, porta ad uno sviluppo di calore eccessivo sull'utensile che, con il progressivo incollamento di strati sempre maggiori di materiale sul tagliente subisce craterizzazione.

L'usura uniforme sul fianco dell'utensile è limitata.

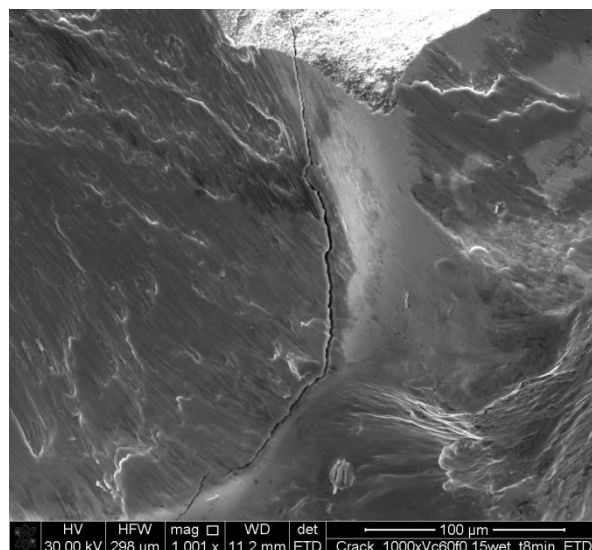
Il caso  $V_c=40$  m/min,  $f=0,1$ mm/rev presenta un'usura piuttosto contenuta e uniforme al fianco dell'utensile nei primi minuti di lavorazione, mentre a 15 minuti sono presenti scheggiature, tagliente di riporto e usura a cratere.

Aumentando la velocità di avanzamento e mantenendo la velocità a 40 m/min l'usura sull'inserto aumenta visibilmente: la craterizzazione è visibile già dopo 3 minuti di lavorazione e cresce linearmente fino al limite di fine vita. Anche in questo caso l'usura presenta materiale aderito, scheggiature e una limitata usura abrasiva sul fianco.

Se invece di aumentare l'avanzamento dal primo caso si decide di aumentare la velocità di taglio a 60 m/min mantenendo al valore di 0,1 mm/rev la velocità di avanzamento, l'aumento dell'usura risulta più contenuto. Infatti si nota una diminuzione dell'ampiezza del cratere per tempi superiori ai 3 minuti. Sono sempre presenti scheggiature, materiale incollato e usura abrasiva leggermente maggiore rispetto al caso precedente.

Nell'ultimo caso in esame,  $V_c=60$  m/min e  $f=0,15$  mm/rev, l'effetto dell'elevata velocità di taglio e dell'elevata velocità di avanzamento provocano sull'inserto un'usura eccessiva per tempi che superino i 3 minuti di lavorazione. A 15 minuti l'inserto infatti si presenta totalmente scavato sulla punta e qualsiasi operazione di semifinitura risulterebbe inaccurata.

Anche nell'intervallo precedente, 8 minuti, è presente un'evidente craterizzazione con la presenza di una frattura in figura 4.10.



**Figura 4.10** Usura dell'inserto: cricca e craterizzazione

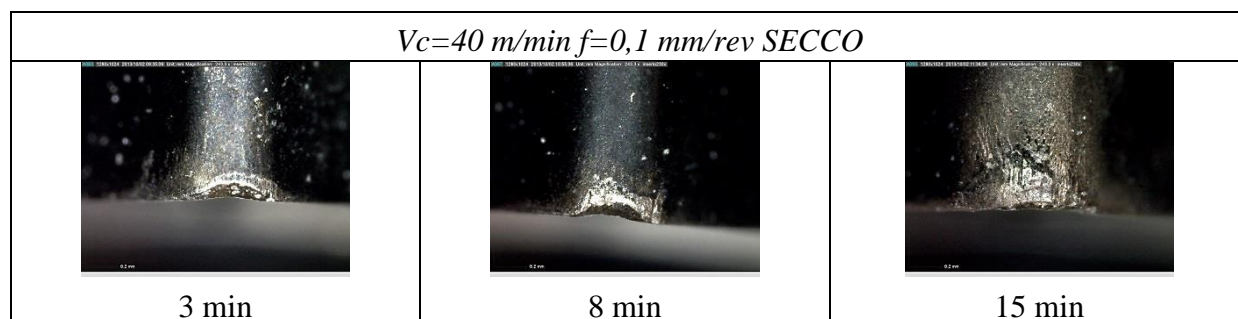
Dai test si può affermare che la condizione di avanzamento pari a 0,15 mm/rev risulta essere su questo tipo di lega troppo gravosa sull'usura dell'inserto e di conseguenza sull'accuratezza dell'integrità superficiale del pezzo tornito. Utilizzare questo valore di avanzamento limiterebbe il tempo di vita dell'utensile a pochi minuti di lavorazione (3 minuti) cosa inaccettabile dal punto di vista industriale.

Mantenendo la velocità di avanzamento a valori di 0,1 mm/rev invece, l'usura rimane più contenuta sia in termini di dimensione del cratere che come quantità di materiale aderito, presenza di scheggiature e usura del fianco. Con questo parametro di avanzamento è possibile mantenere come fine vita dell'inserto un tempo pari a 15 minuti di lavorazione.

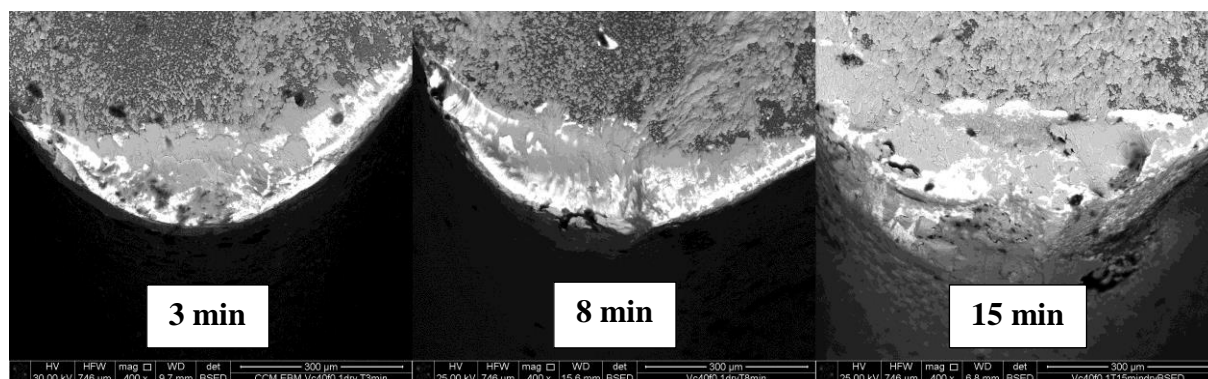
### Lubrificazione a secco

Per testare l'effetto del lubrificante è stata effettuata una campagna prove anche nella condizione di lubrificazione assente. Dopo la lavorazione con i parametri di  $V_c=40$  m/min e  $f=0,1$  mm/rev però, si è notato che nonostante l'utilizzo della minima velocità di taglio e del minimo valore di avanzamento, l'usura sull'inserto si presentava eccessiva.

Di conseguenza è stato deciso di non continuare con le prove a parametri più elevati, ritenendo l'utilizzo del lubrificante, durante operazioni di tornitura sulla lega ASTM F75 EBM, essenziale.



**Figura 4.11** Immagini al microscopio ottico degli inserti in assenza di lubrificante, ASTM F75



**Figura 4.12** Immagini al SEM degli inserti in assenza di lubrificante, ASTM F75

#### 4.1.5 Analisi EDS – CoCrMo F75

Anche per la lega ASTM F75 EBM è stata effettuata un'analisi EDS degli inserti, prima nella zona bianca relativa all'usura abrasiva e successivamente nella zona di colore grigio propria del materiale che si è incollato all'utensile. Per tutte le condizioni di taglio gli spettri si mostravano gli stessi, questo perché la tipologia di usura è la stessa e non cambia qualitativamente ma in termini quantitativi.

Dalla figura 4.13 si può notare la presenza di un picco preponderante relativo al tungsteno: questo indica che durante la lavorazione il rivestimento dell'inserto è stato rimosso e di conseguenza la sonda dell'analisi EDS rileva solamente il substrato dell'inserto. Sono presenti anche dei picchi relativi al materiale stesso (cobalto e cromo) poiché anche nella zona indicata come chiara è presente del materiale aderito.

Nella figura 4.14 invece, prevale l'usura adesiva, di conseguenza i picchi principali corrispondono a quelli degli elementi della lega di CoCrMo. Si notano inoltre piccole percentuali di alluminio e titanio relative al rivestimento dell'inserto che è di TiAlN.

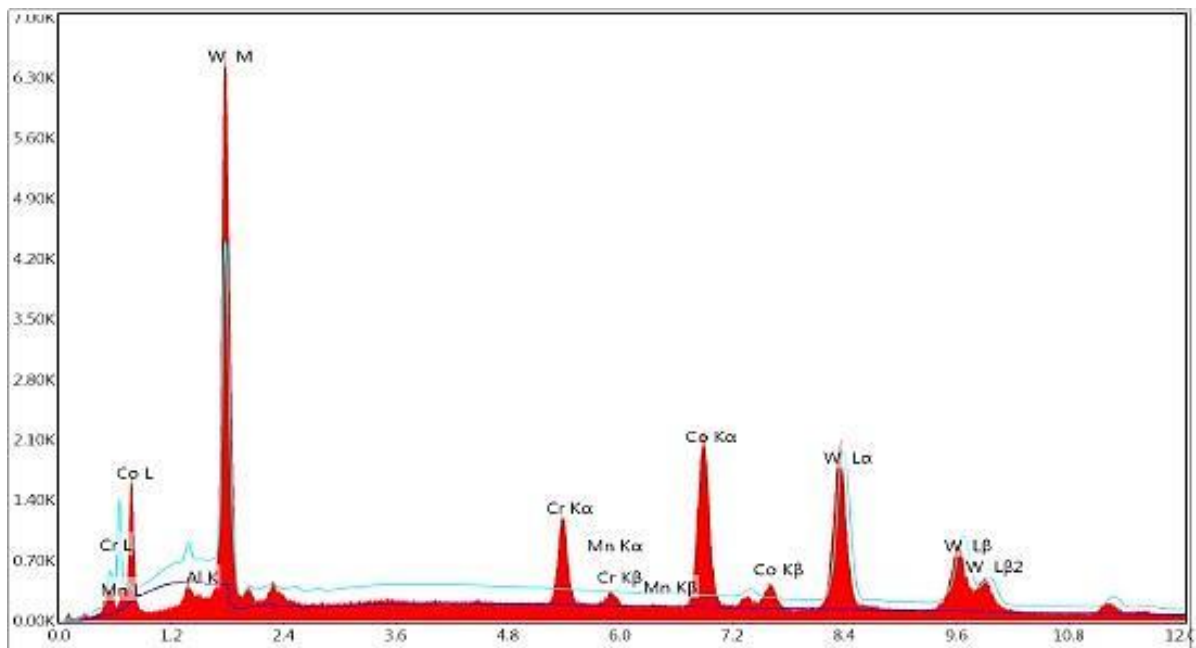


Figura 4.13 Spettro EDS ASTM F75 zona bianca

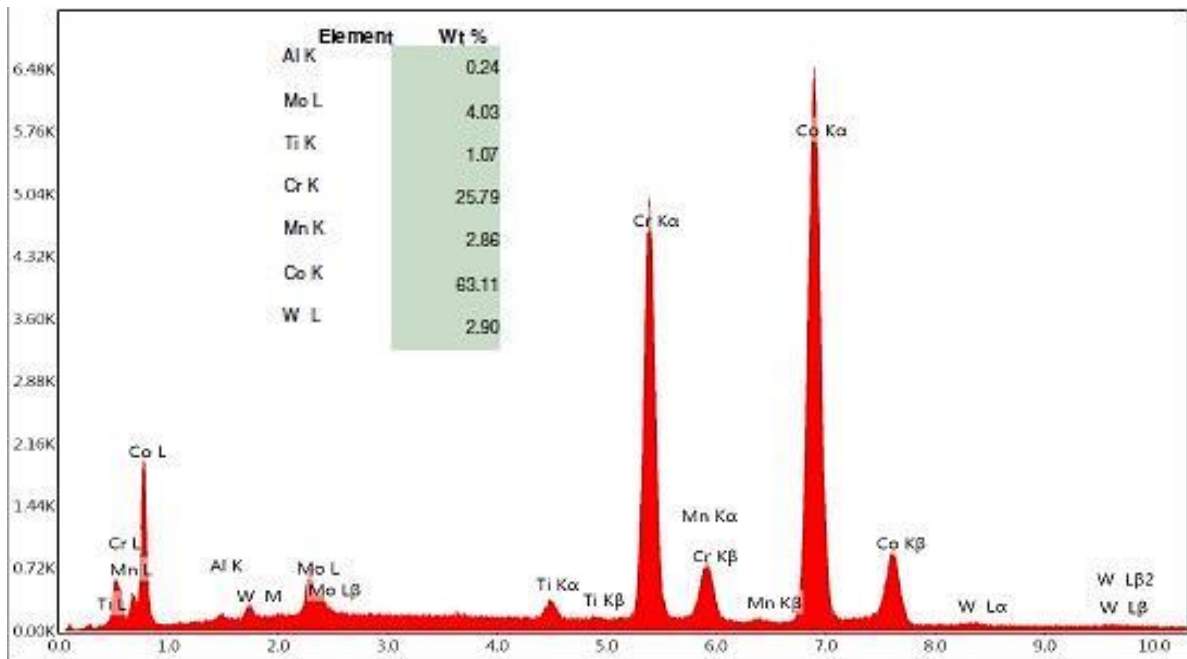


Figura 4.14 Spettro EDS ASTM F75 zona grigia

Aumentando la velocità di taglio a 60 m/min l'unica differenza sostanziale che si nota nella zona relativa all'usura adesiva è la scomparsa dei picchi relativi al rivestimento dell'inserto (alluminio e titanio). Si suppone che con l'aumentare di  $V_c$ , il rivestimento in TiAlN viene totalmente rimosso per usura abrasiva poiché le percentuali di cobalto e cromo trovate sono pressoché le stesse.

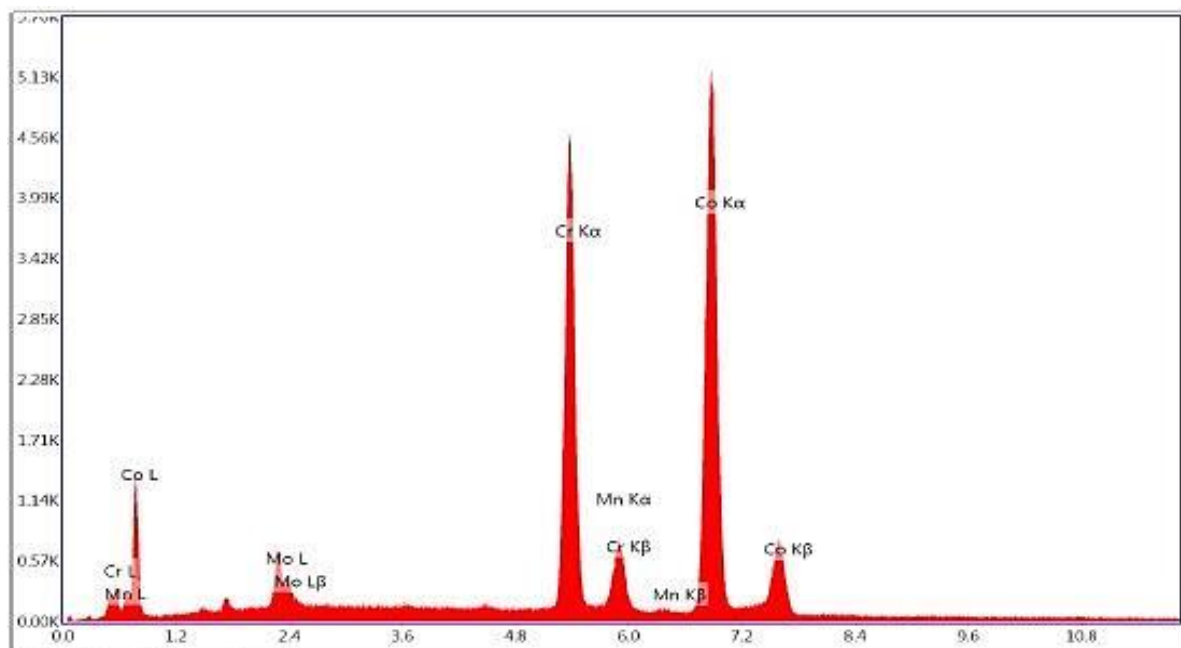


Figura 4.15 Spettro EDS ASTM F75 zona grigia,  $V_c=60$  m/min  $f=0,1$  mm/rev

## 4.2 Qualità superficiale

La qualità superficiale della superficie lavorata è molto importante per componenti usati in impianti chirurgici dove la formazione di detriti da usura, come detto nel capitolo..., porterebbe al mancato funzionamento dell'impianto.

L'integrità superficiale caratterizza inoltre il comportamento a fatica del materiale e le proprietà tribologiche indispensabili nell'accoppiamento di giunti scorrevoli.

L'effetto che i parametri di processo, come la velocità di taglio, l'avanzamento e l'utilizzo del lubrificante, producono sulla superficie è l'oggetto di studio di questo paragrafo.

Per entrambe le leghe (ASTM F1537 e ASTM F75 EBM) sono state effettuate misure di rugosità superficiale mediante rugosimetro portatile e profilometro, inoltre per la prima lega nella condizione a secco è stata anche effettuata un'analisi dei difetti superficiali presenti nella superficie a fine vita.

### 4.2.1 Andamenti di Ra al variare dei parametri di processo - CoCrMo F1537

Nei seguenti grafici vengono riportati gli andamenti di Ra prima nella condizione di piena lubrificazione e successivamente in assenza di lubrificante.

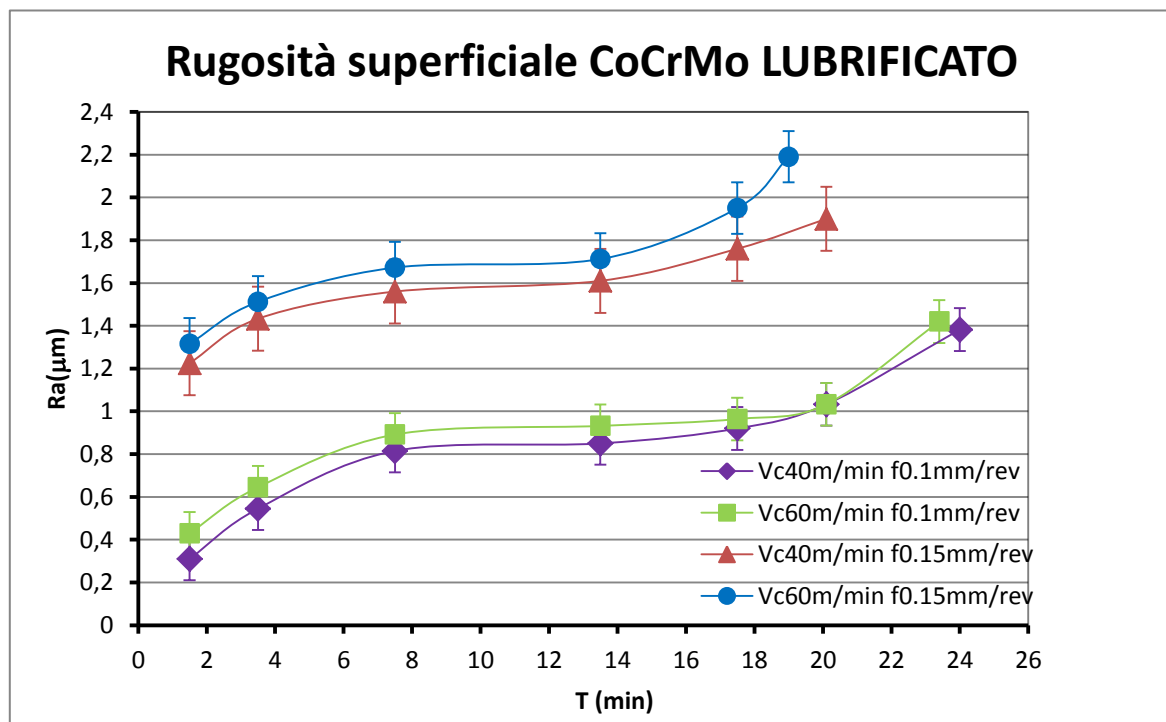


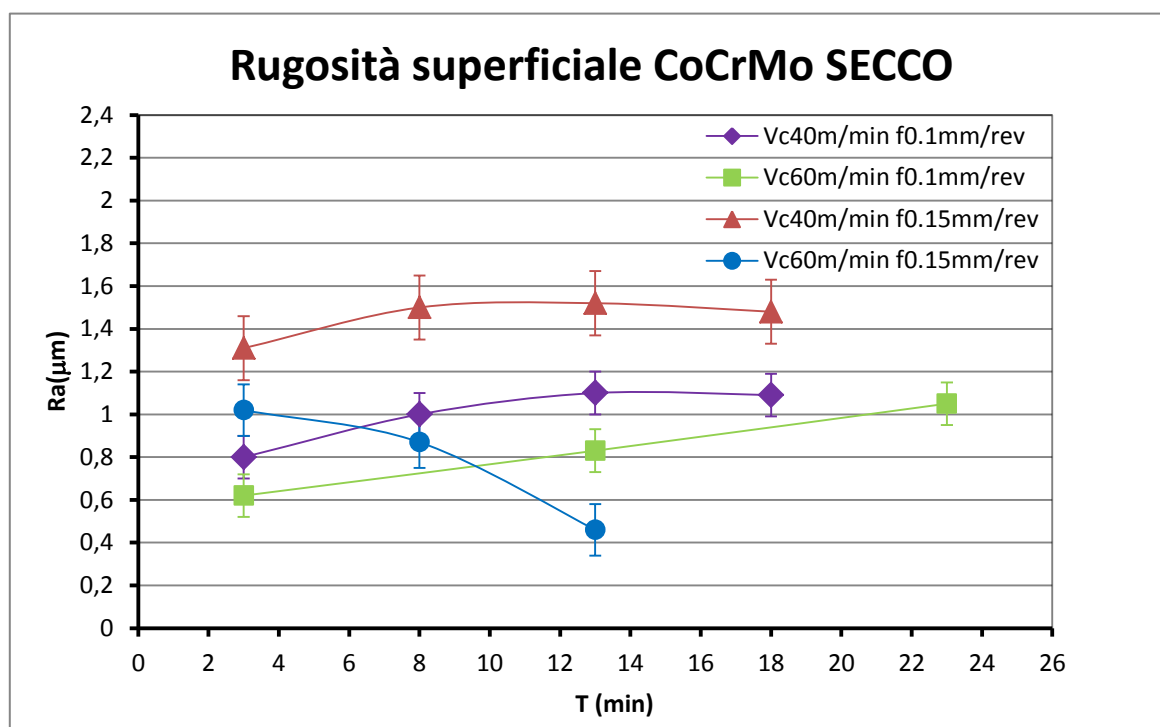
Figura 4.16 Andamento di Ra in funzione del tempo di lavorazione LUBRIFICATO, ASTM F1537

L'andamento delle curve mostrato in figura 4.16 mostra un andamento a S concorde all'andamento di  $V_{bc}$  mostrato nel paragrafo precedente, prova che la rugosità superficiale della superficie lavorata è strettamente correlata all'usura dell'inserto. Si possono distinguere principalmente tre zone: la prima caratterizzata da un rapido aumento di  $R_a$ , una seconda dove il valore di rugosità si stabilizza ed infine un ultimo tratto dove  $R_a$  cresce rapidamente.

L'aumento finale di  $R_a$  è dovuto all'aumento dell'usura dell'inserto, infatti negli ultimi minuti di lavorazione prima di arrivare a  $V_{bc}=0,3$  mm l'inserto, nella zona del naso, è sottoposto alla perdita continua di piccoli frammenti.

Le curve si combinano in due diverse fasce a seconda del valore della velocità di avanzamento, mentre la velocità di taglio non presenta un effetto molto rilevante. Per le velocità di 40 e 60 m/min con avanzamento 0,1 mm/rev la rugosità superficiale rimane sempre al di sotto di  $R_a=1,4$   $\mu\text{m}$  mentre per  $f=0,15$  mm/rev si raggiungono valori di  $R_a$  da 1,9 a 2,2  $\mu\text{m}$ . Quest'ultima condizione non è accettabile per una lavorazione di semifinitura, in particolar modo per applicazioni in campo biomedico.

Valutiamo ora la condizione in assenza di lubrificante per le medesime condizioni:



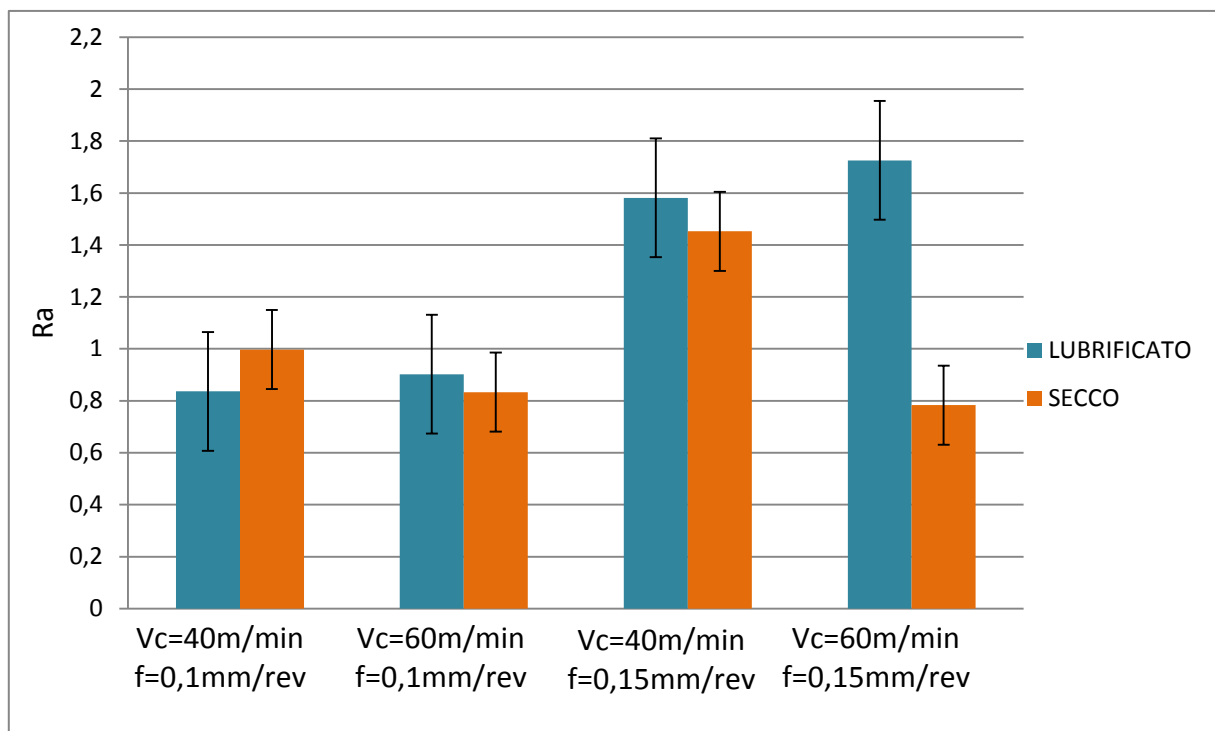
**Figura 4.17** Andamento di  $R_a$  in funzione del tempo di lavorazione SECCO, ASTM F1537

L'andamento delle curve è nettamente diverso. Si può subito notare la condizione  $V_c=60$  m/min  $f=0,15$  mm/rev dove eccessiva usura dell'inserto nel tempo porta ad una diminuzione del valore di  $R_a$ . La superficie, come si potrà osservare in seguito dalle immagini al

profilometro, risulta come appiattita dall'utensile il quale a 15 minuti presenta una superficie del naso totalmente abrasa, smussata e ricoperta di materiale lavorato (usura adesiva).

Anche negli altri tre casi si può osservare a fine lavorazione una leggera diminuzione del valore di Ra, correlato sempre al materiale aderito sull'inserto che funge da rivestimento dello stesso preservandolo da un'ulteriore usura abrasiva.

L'effetto della velocità di taglio sulla rugosità superficiale risulta minore rispetto all'effetto dovuto all'incremento dell'avanzamento.



**Figura 4.18** Effetto Del lubrificante sulla rugosità superficiale

L'istogramma indica il valore medio di Ra nelle varie combinazioni di velocità di taglio e avanzamento per le condizioni a secco e con il lubrificante.

I valori mostrano quando osservato sopra negli andamenti di Ra: per tutti parametri, ad esclusione di Vc=40m/min e f=0,1mm/rev, la condizione con lubrificazione assente risulta avere valori di rugosità superficiale minori grazie all'aumento dell'attrito tra truciolo e utensile con il conseguente aumento di adesione di materiale sul fianco dell'inserto la cui geometria viene così preservata.

Solamente nel caso con i valori più bassi di Vc e f, la condizione a secco mostra valori di Ra media più elevati rispetto alla condizione con l'utilizzo di lubrificante.



## 4.2.2 Immagini al profilometro della superficie lavorata - CoCrMo F1537

Piena lubrificazione

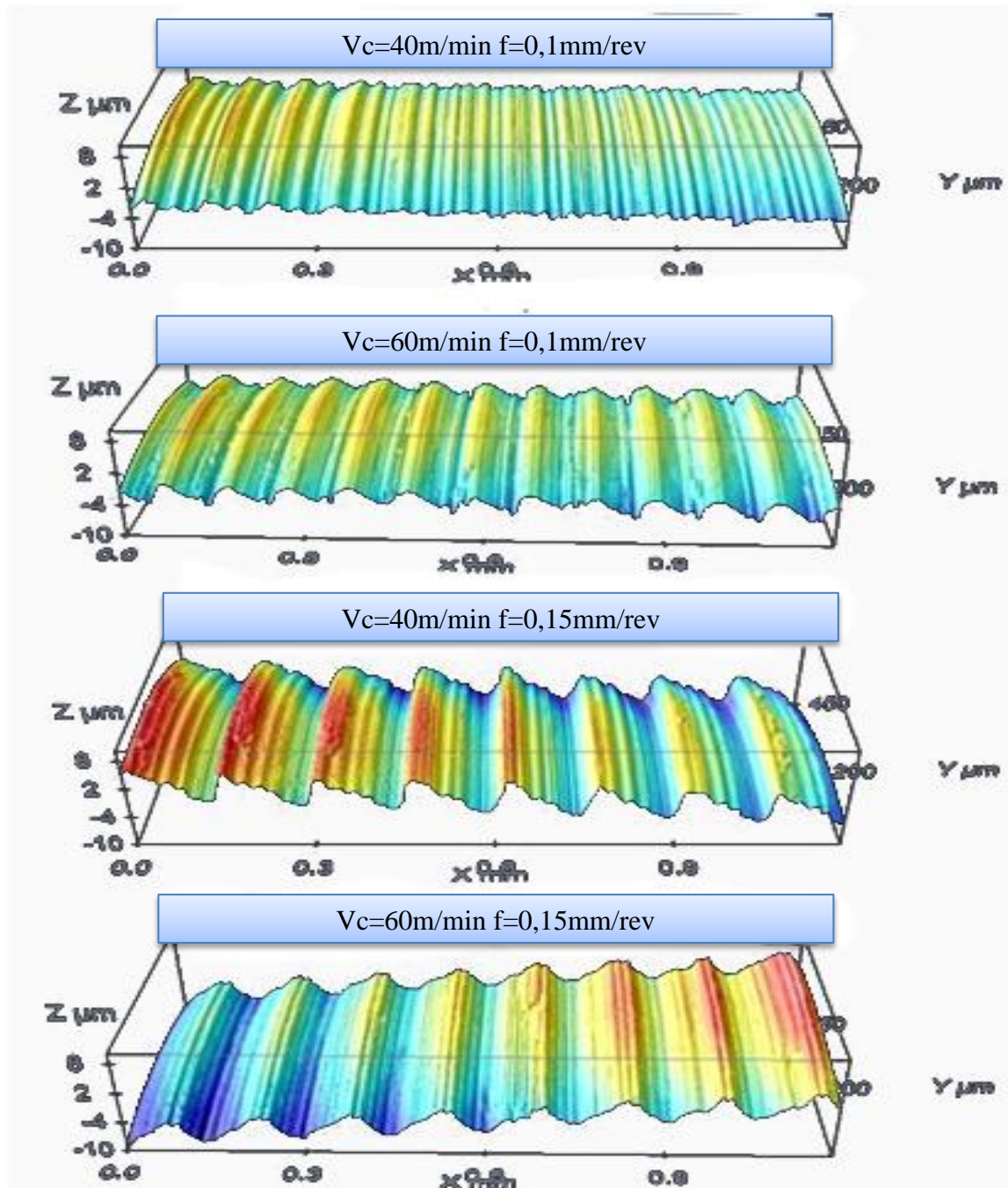


Figura 4.19 Topografie superficiali LUBRIFICATO, ASTM F1537

## Lubrificazione a secco

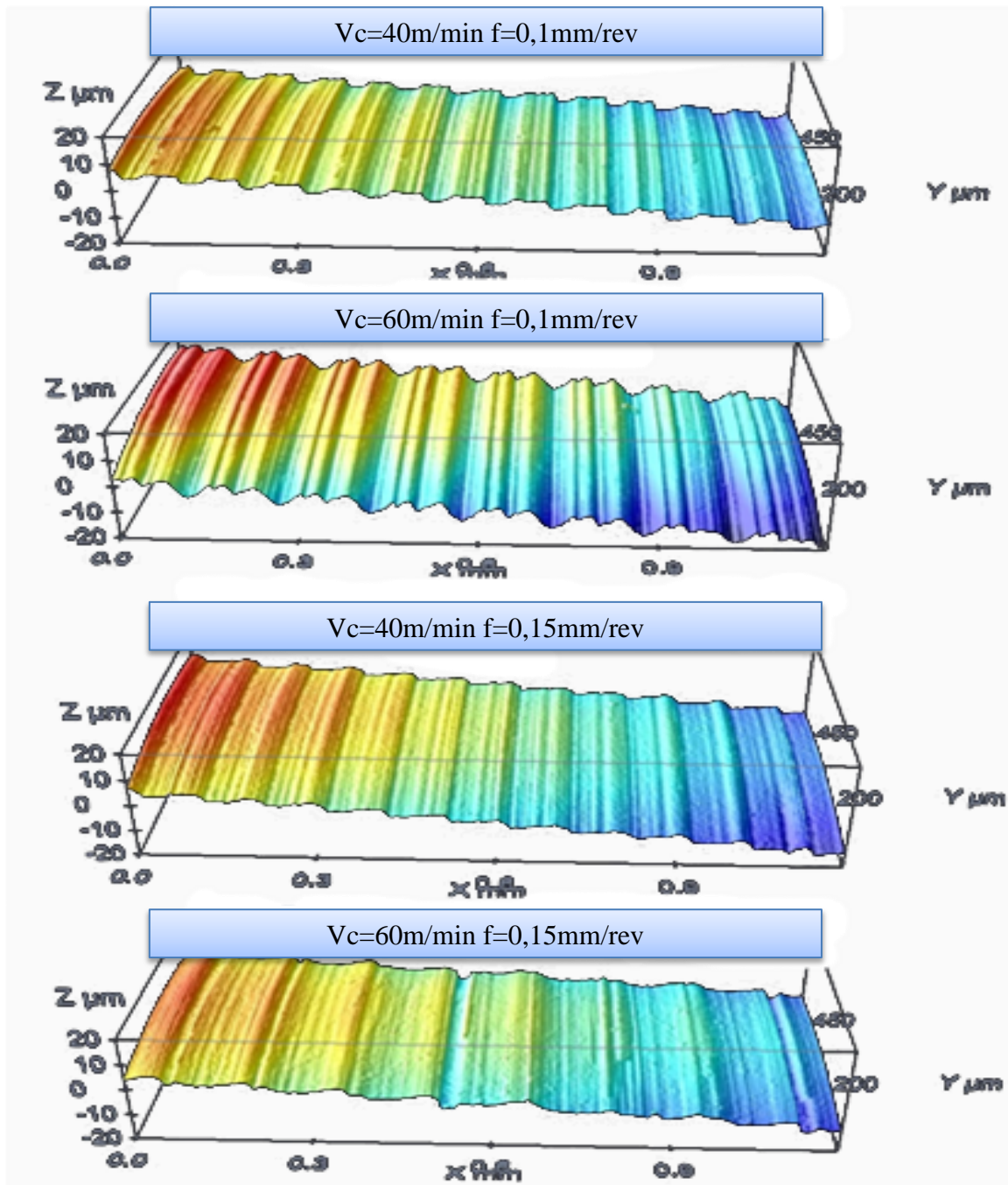


Figura 4.20 Topografie superficiali SECCO, ASTM F1537

Le figure 4.19 E 4.20 mostrano le topografie 3D delle superfici lavorate per tornitura nelle condizioni a secco e lubrificato per un tempo fissato di 10 minuti, in modo tale da poter valutare l'effetto dei parametri di taglio sulla superficie, indipendentemente dalla condizione di usura dell'utensile.

In questo tempo infatti gli inserti presentano all'incirca la stessa condizione di usura permettendo così un più corretto confronto sulla lavorabilità.

In entrambi i casi esaminati, per tutte le condizioni non sono presenti irregolarità superficiali generalmente dovute alla presenza del tagliente di riporto sull'inserto.

Anche da queste immagini è possibile apprezzare l'impatto significativo dell'avanzamento sulla lavorazione rispetto all'effetto meno marcato che produce invece un aumento di velocità da 40 a 60 m/min. Infatti con l'utilizzo del lubrificante le condizioni con  $f=0,1$  mostrano valori meno marcati di rugosità superficiale rispetto alle due condizioni con avanzamento maggiore.

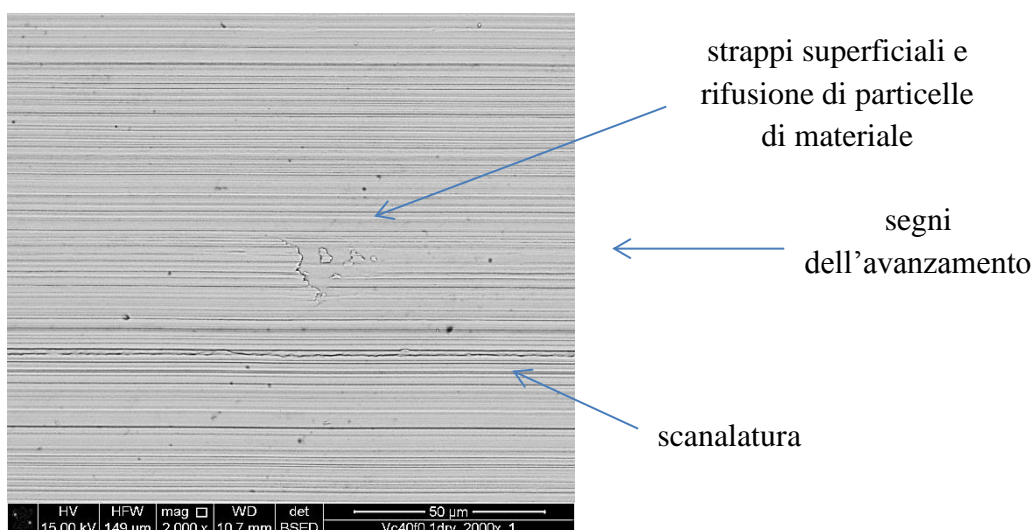
L'eliminando il lubrificante, invece, adottando  $f=0,15$  mm/rev, la smussatura dell'inserto modifica le proprietà di taglio dell'utensile e di conseguenza la superficie tornita risulta più liscia nonostante le condizioni più gravose. Sebbene queste condizioni diano valori di rugosità accettabili, per ottenere una buona integrità superficiale risulta preferibile lavorare in presenza di lubrificante con un avanzamento di 0,1 mm/rev e aumentando la velocità a 60 m/min.

#### 4.2.3 Difetti superficiali - CoCrMo F1537

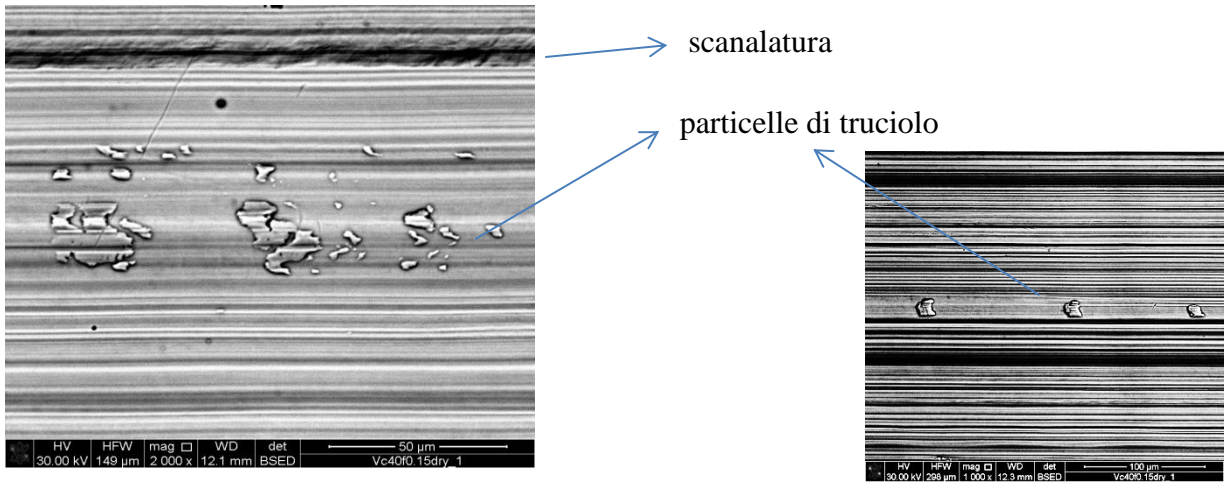
Per indagare meglio l'effetto che, l'assenza di lubrificante, ha avuto sull'integrità superficiale sono state effettuate delle foto al SEM della superficie lavorata.

Usando alti ingrandimenti e gli elettroni retrodiffusi si sono evidenziati numerose irregolarità come: graffiature superficiali, fessurazioni, segni di avanzamento, strappi superficiali, detriti di microtrucioli, cavità superficiali, zone di scorrimento, materiale ripiegato sulla superficie.

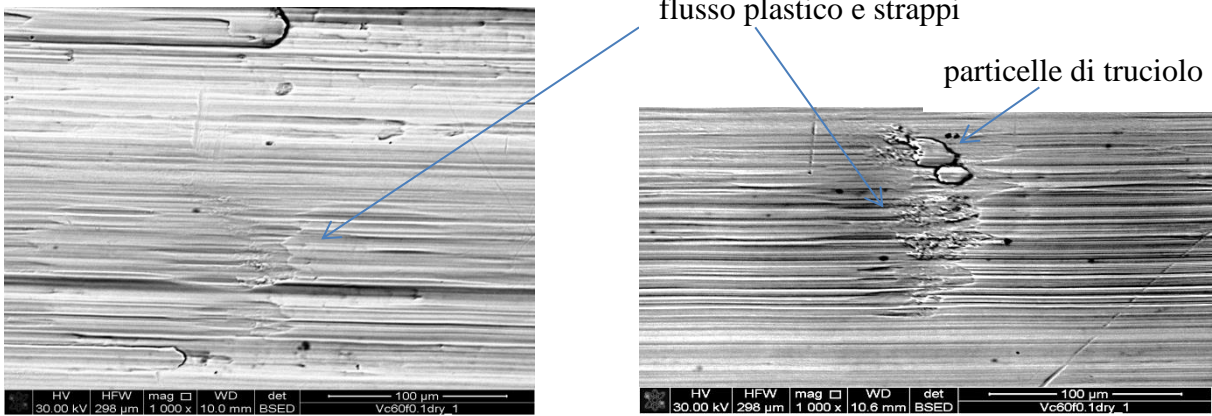
-  $V_c=40$  m/min;  $f=0,1$  mm/rev



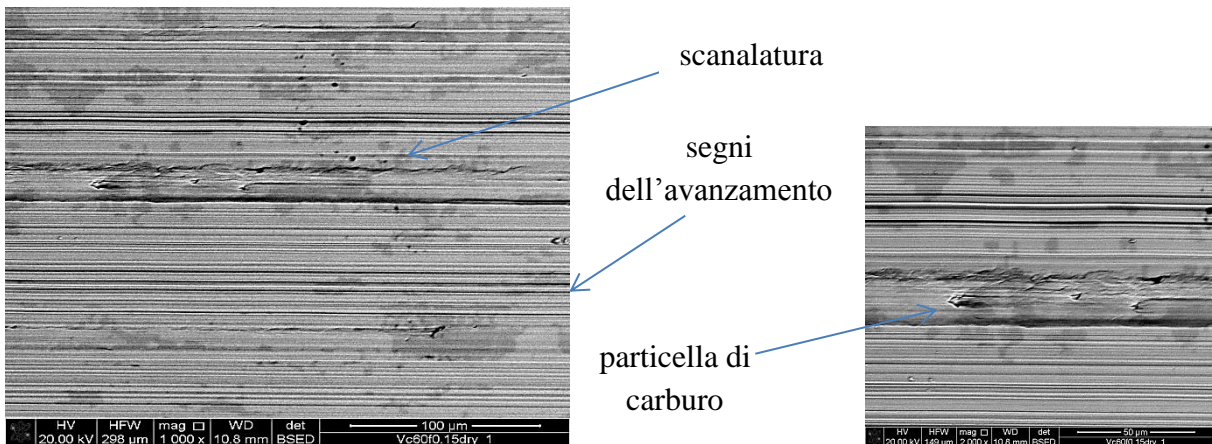
-  $V_c=40\text{ m/min}; f=0,15\text{ mm/rev}$



-  $V_c=60\text{ m/min}; f=0,1\text{ mm/rev}$

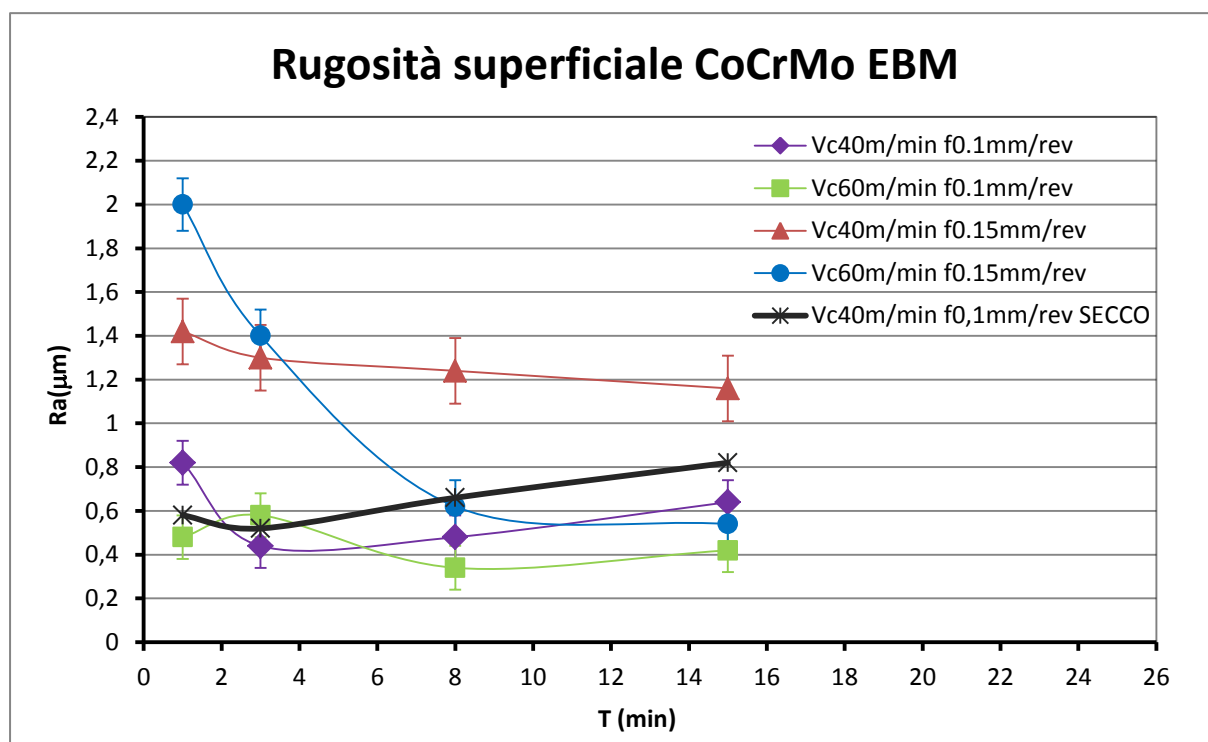


-  $V_c=60\text{ m/min}; f=0,15\text{ mm/rev}$



**Figura 4.21** Difetti superficiali, ASTM F1537 condizione in assenza di lubrificante

#### 4.2.4 Andamenti di Ra al variare dei parametri di processo - CoCrMo F75 EBM



**Figura 4.22** Andamento di Ra in funzione del tempo di lavorazione, ASTM F75

Il grafico mostra l'andamento di Ra nelle varie condizioni di tornitura.

In questo caso, a differenza delle curve mostrate per la lega ASTM F1537, non è possibile definire una dipendenza tra rugosità e parametri senza considerare l'usura a cui l'inserto è stato sottoposto. Sono presenti infatti sia cali di Ra con l'aumento del tempo di lavorazione, dovuti alla morfologia del naso dell'inserto che si appiattisce, sia aumenti del valore di rugosità dovuti invece al materiale aderito o a parti di rivestimento dell'inserto che si staccano e si depositano in superficie.

Nel caso a velocità di taglio 60 m/min e avanzamento 0,15 mm/rev tra il primo minuto e gli 8 minuti di lavorazione c'è un brusco calo di rugosità che passa da valori di 2  $\mu\text{m}$  a 0,6  $\mu\text{m}$ , per poi rimanere costante a 15 min. Una situazione opposta si verifica invece per Vc=40 m/min e f=0,1 mm/rev dove inizialmente il valore di Ra diminuisce rapidamente per 3 minuti di lavorazione ma in seguito aumenta all'aumentare del tempo di tornitura.

Le velocità di taglio combinate con avanzamenti di 0,1 mm/rev mostrano andamenti pressoché simili e con valori di rugosità più bassi rispetto al caso Vc=40 m/min e f=0,15 mm/rev. La condizione estrema invece (Vc=60 m/min, f=0,15 mm/rev) si distacca completamente dalle precedenti. L'andamento con l'assenza di lubrificante si accosta maggiormente alle condizioni con avanzamento di 0,1 mm/rev anche se la rugosità a fine prova risulta maggiore.

### 4.2.5 Immagini al profilometro della superficie lavorata - CoCrMo F75 EBM

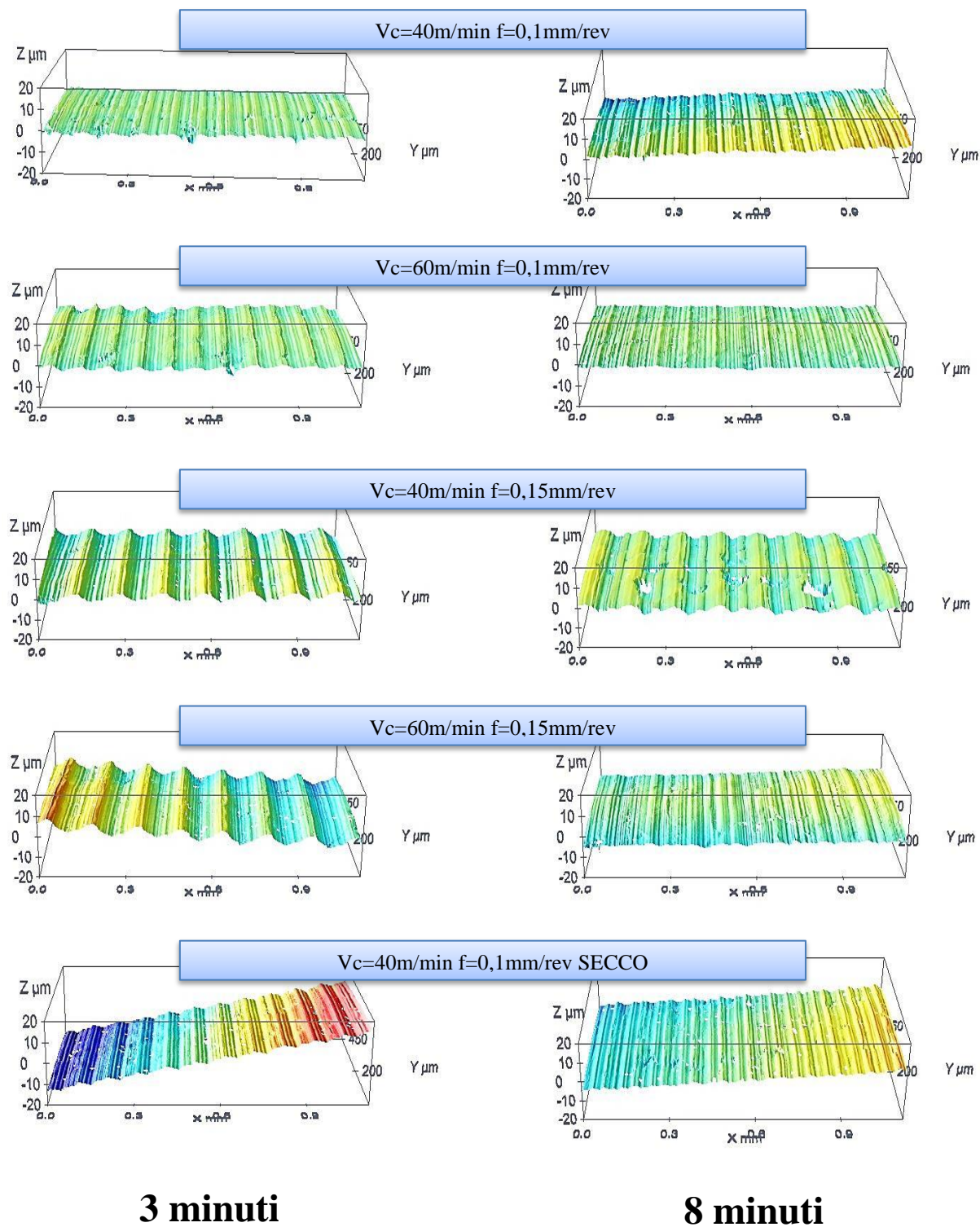
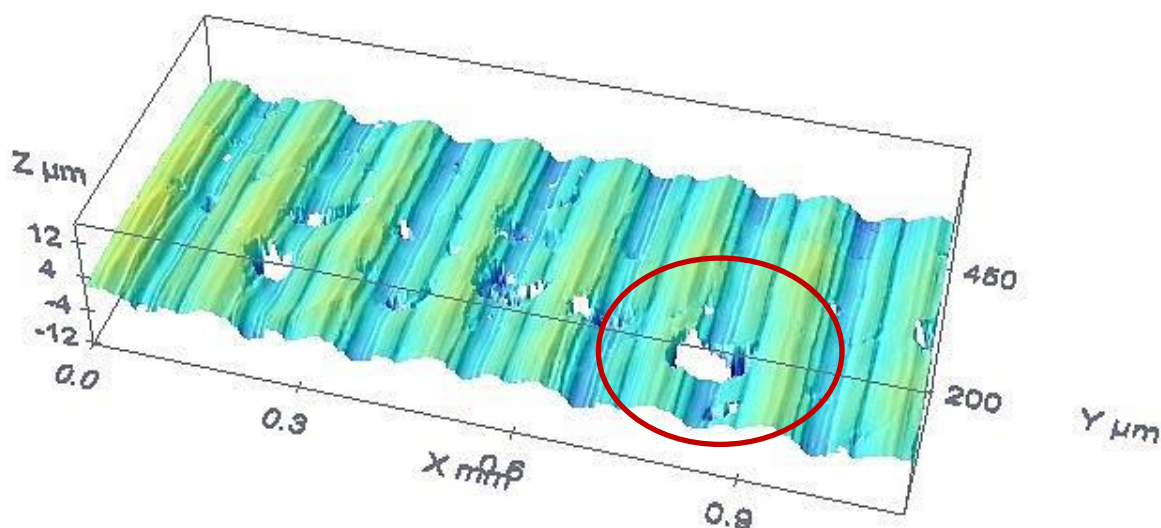


Figura 4.23 Topografie delle superfici lavorate a 3 e 8 minuti, ASTM F75

Le immagini al profilometro mostrano le superficie tornite dopo 3 e 8 minuti di lavorazione. La prima cosa che si nota sono le irregolarità presenti in superficie come segni di lavorazione doppi e buchi. I segni di lavorazione doppi sono causati dall'usura dell'inserto: frammenti di materiale aderito, di rivestimento o di parte del truciolo, che depositandosi in superficie, genera questi segni durante le successive passate. I segni di lavorazione sono presenti per tutti i parametri analizzati e per avanzamenti di 0,15 mm/rev diventano doppi.

I fori in superficie invece si ipotizza siano strettamente correlati al materiale: la lega ASTM F75 EBM che è stata lavorata, presenta un basso allungamento a rottura. Il materiale infatti si trova nello stato pre trattamento termico, di conseguenza è ricco di carburi (non ancora solubilizzati) che ne aumentano la durezza e la fragilità.

Lo strato asportato durante il processo di tornitura viene come strappato dalla superficie, rompendosi per frattura fragile e generando così delle cavità sulla superficie.



**Figura 4.24** Imperfezioni superficiali,  $V_c=40$  m/min  $f=0,15$  mm/rev

Questo aspetto viene confermato anche dalla morfologia del truciolo che macroscopicamente si presenta come polvere per tutte le combinazioni di velocità di taglio e avanzamento, in assenza o in presenza di lubrificante.

Gli andamenti di rugosità mostrati precedentemente con il supporto di queste immagini diventano più chiari. Considerando come tempi solamente 3 e 8 minuti, per tutti i parametri si riscontra come dal grafico., una diminuzione di rugosità ad eccezione del caso con  $V_c=40$  m/min e  $f=0,1$  mm/rev dove la rugosità aumenta.

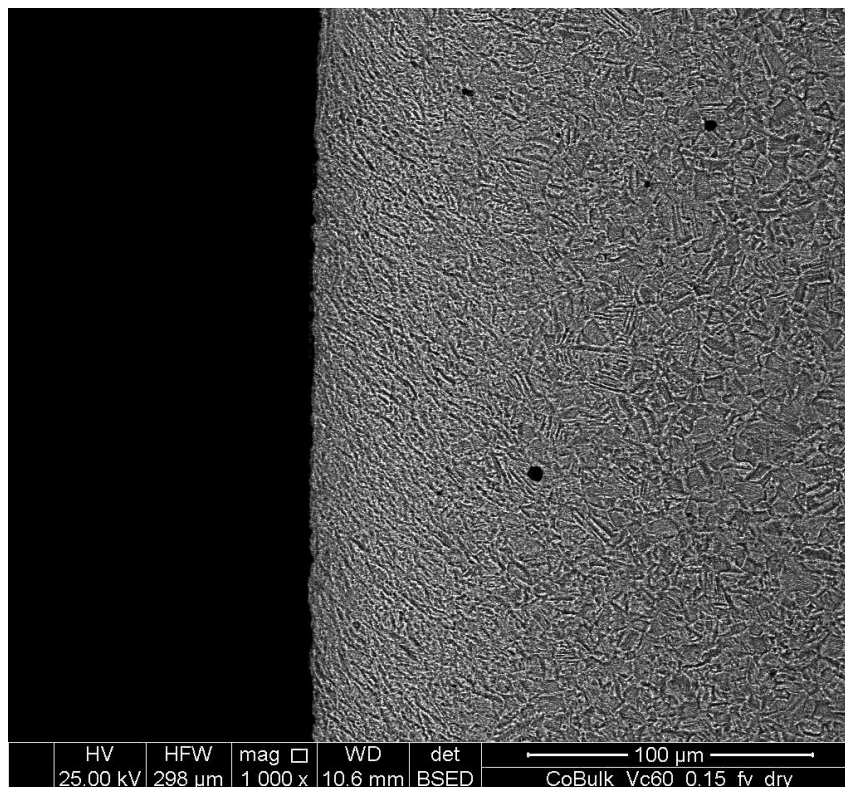
## 4.3 Microstruttura

Per analizzare l'effetto dei parametri di taglio sulla microstruttura di entrambe le leghe sono state raccolte micrografie al SEM della superficie lavorata nelle diverse condizioni di taglio a secco e con l'utilizzo del lubrificante. All'analisi sono stati aggiunti dei profili di microdurezza effettuati radialmente dalla superficie lavorata all'interno del campione.

### 4.3.1 Analisi cristallografica: micrografie - CoCrMo F1537

Le micrografie mostrano un affinamento della grana con deformazione dei grani stessi sotto la superficie lavorata nella direzione della velocità di taglio. Le elevate temperature in gioco soprattutto per parametri come  $V_c=60\text{m/min}$  e  $f=0,15\text{mm/rev}$  permettono di caratterizzare la lavorabilità del materiale.

Una banda di larghezza .. circa, sotto la superficie lavorata, presenta grani allungati con una precisa orientazione dei bordi grano. Questa deformazione è il risultato della deformazione imposta al materiale ad elevate temperature durante la lavorazione.



**Figura 4.25** Effetto della lavorazione sulla microstruttura: affinamento della grana



4.3.2 Microdurezza - CoCrMo F1537

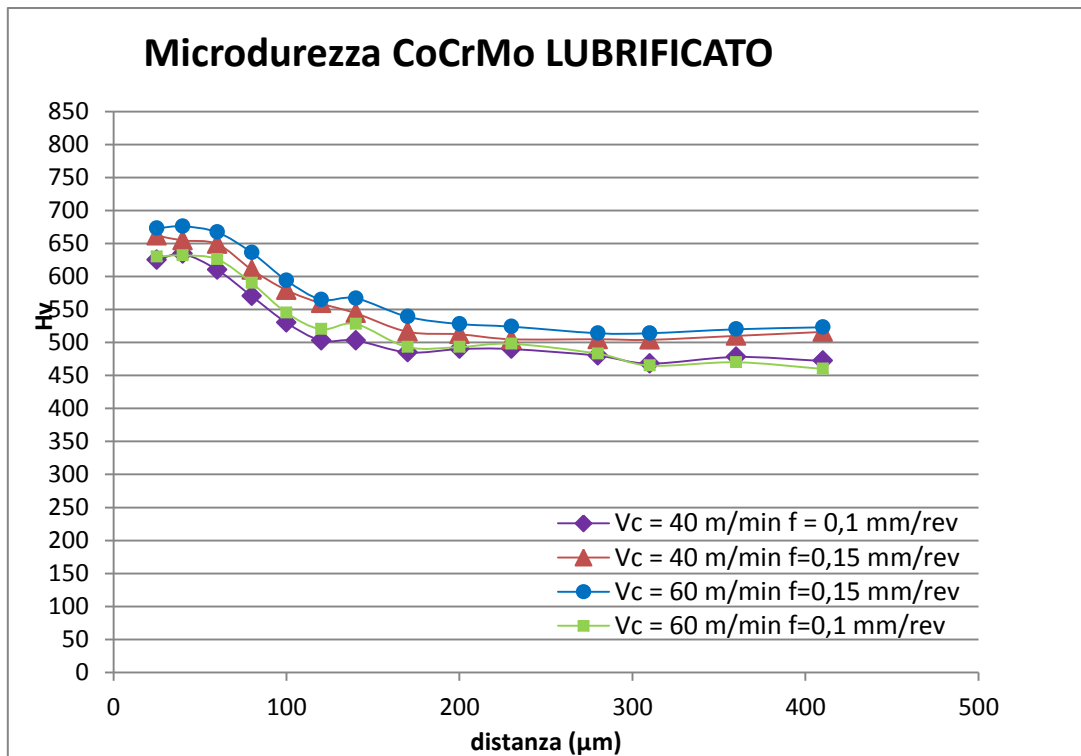


Figura 4.26 Andamenti della microdurezza in tornitura con lubrificante

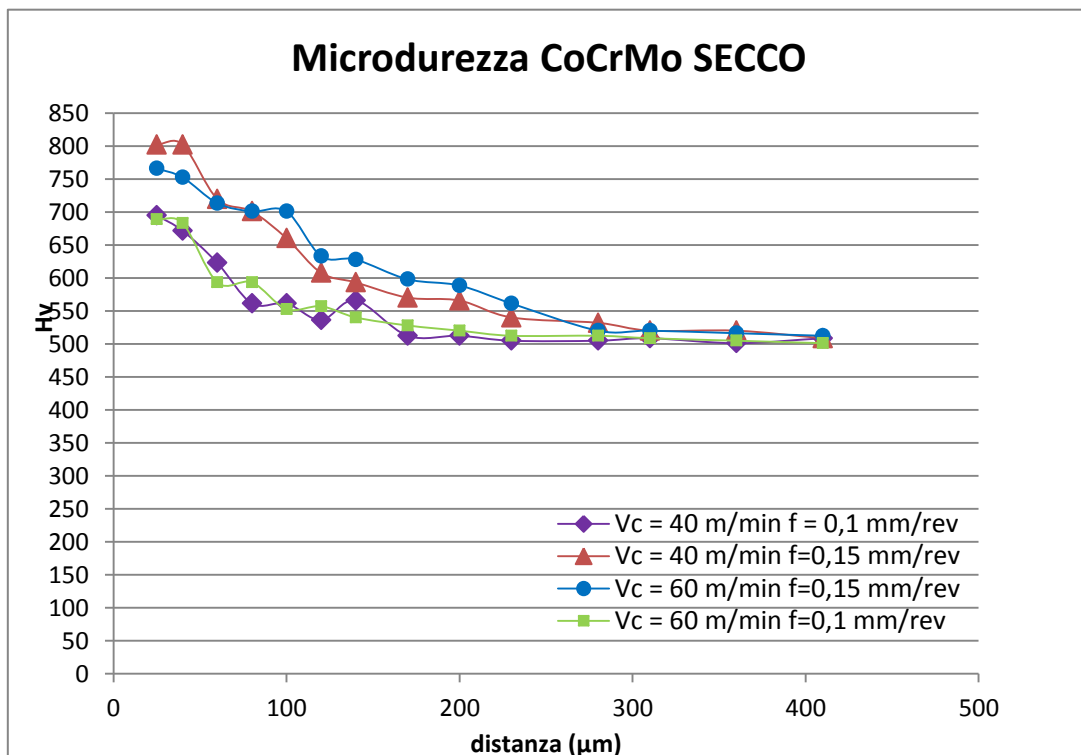


Figura 4.27 Andamenti della microdurezza in tornitura a secco

Confronto condizione a secco e lubrificato

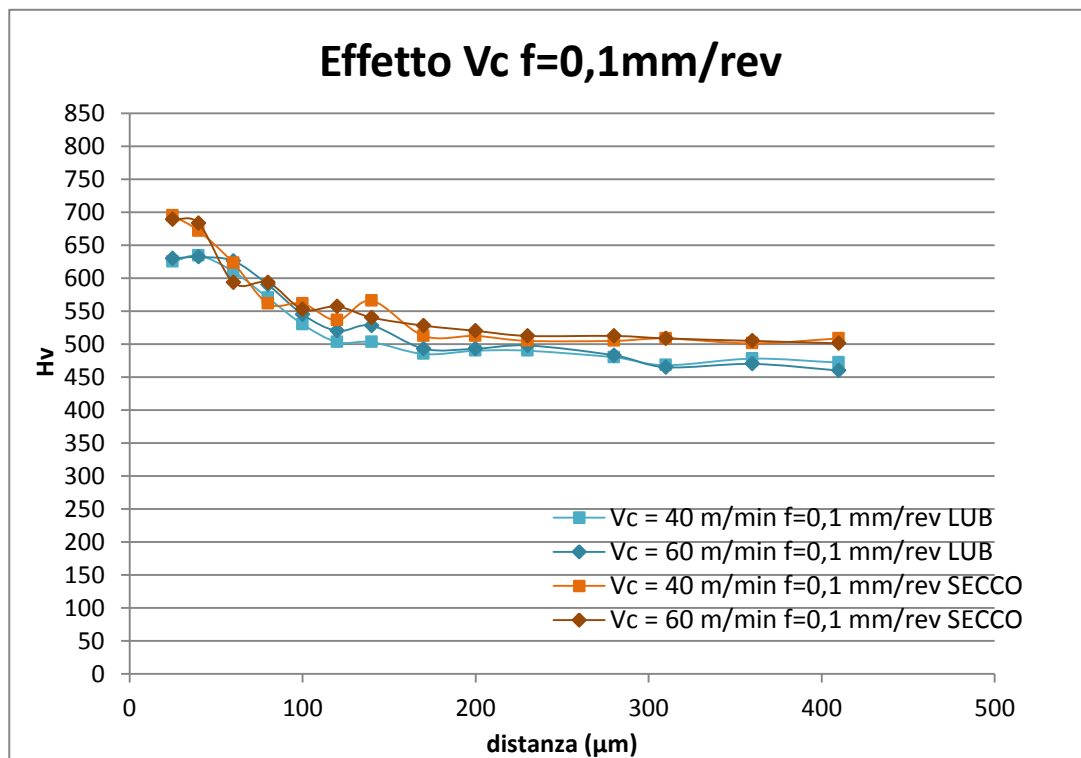


Figura 4.27 Effetto del lubrificante sulla microdurezza in tornitura con f=0,1 mm/rev

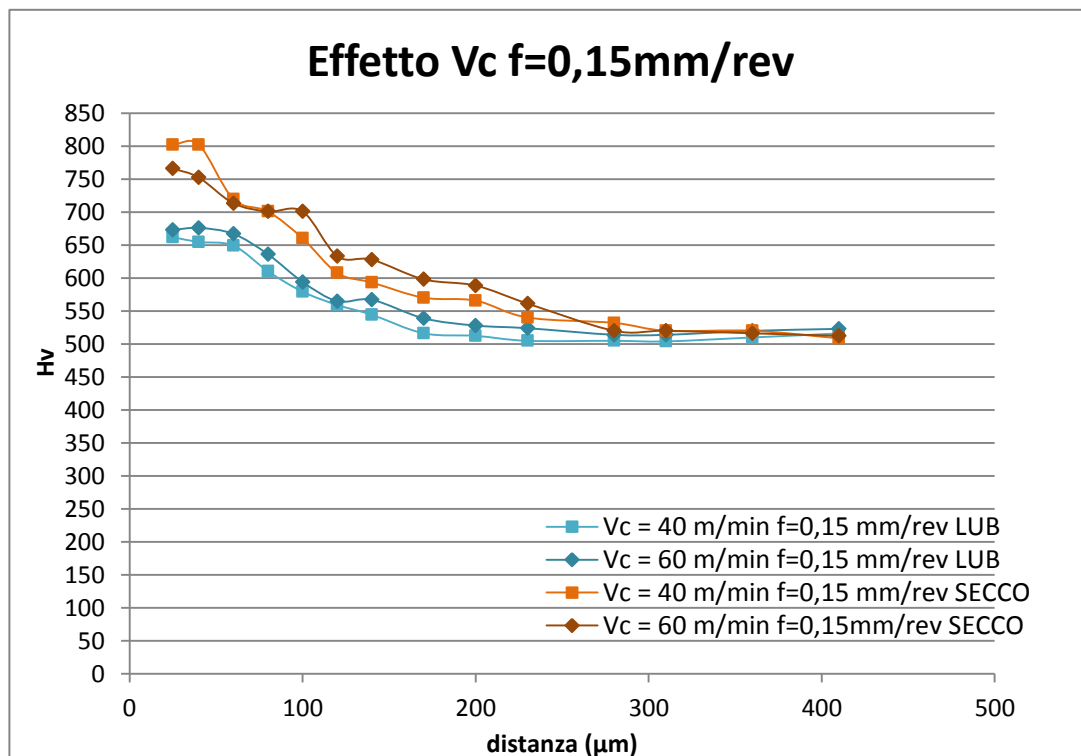


Figura 4.28 Effetto del lubrificante sulla microdurezza in tornitura con f=0,15 mm/rev

I grafici sopra riportati mostrano l'andamento della durezza Vickers per tutte le condizioni di taglio testate nella condizione di  $V_{bc}=0,3$  mm (fine vita dell'inserto). Come detto precedentemente questa lega è caratterizzata da una bassa Stacking Fault Energy, questo implica che durante il processo di tornitura essa sia sottoposta ad un forte incrudimento dello strato superficiale che si traduce in un aumento di durezza.

In presenza di lubrificante lo strato incrudito è di circa  $100\ \mu\text{m}$  e raggiunge valori di  $670\ \text{Hv}$  per avanzamenti di  $0,15\ \text{mm/rev}$  e valori di  $630\ \text{Hv}$  circa per  $f=0,1\ \text{mm/rev}$ , mostrando così un incrudimento di  $130/150\ \text{Hv}$  rispetto al centro del materiale. Le quattro condizioni di taglio presentano tutte andamenti molto simili che si differenziano tra loro solamente per qualche decina di Vickers.

Con l'assenza di lubrificante si nota un aumento di durezza dello strato superficiale che arriva a valori di  $800\ \text{Hv}$  con avanzamento pari a  $0,15\ \text{mm/rev}$ , mentre a  $700\ \text{Hv}$  per il parametro di avanzamento minore. Questo risultato rispecchia un maggiore affinamento della grana cristallina dovuto alle elevate temperature in gioco che, durante la lavorazione a secco, si creano tra utensile e superficie lavorata.

La zona incrudita risulta di  $230\ \mu\text{m}$  circa, più larga rispetto alla situazione precedente. Nella figura 4.28 si può notare come le curve si accoppino a due a due a seconda del valore di avanzamento adottato: anche in quest'analisi l'effetto della velocità di avanzamento risulta preponderante rispetto alla velocità di taglio, come si può notare nelle figure.

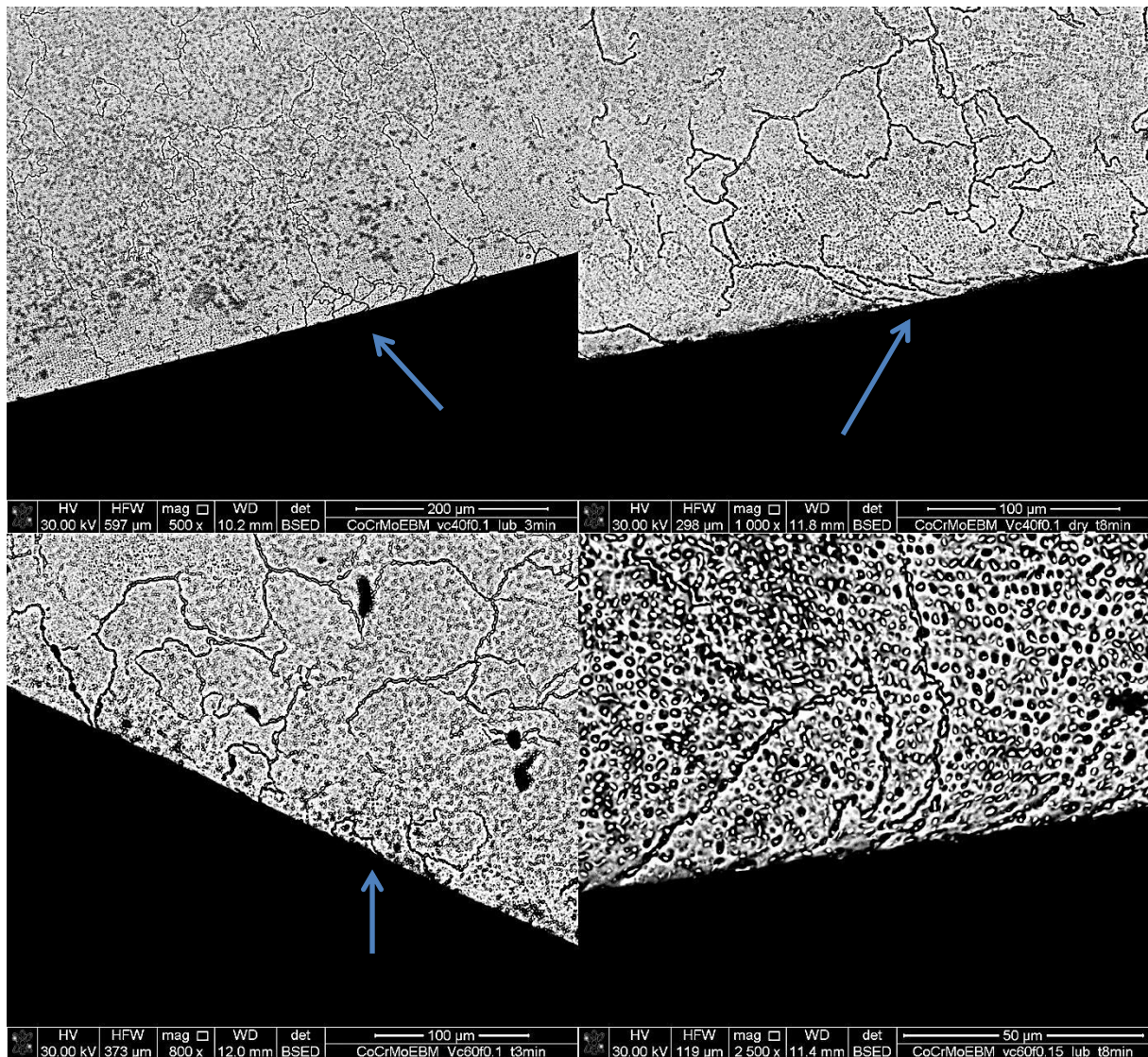
Per valori di avanzamento di  $0,1\ \text{mm/rev}$  l'effetto del lubrificante è incisivo solamente nei primi  $50\ \mu\text{m}$ , dopo dei quali le condizioni si equivalgono diversamente al caso con  $f=0,15\ \text{mm/rev}$ .

### 4.3.3 Analisi cristallografica: micrografie - CoCrMo F75 EBM

La particolare struttura della lega ASTM F75 prodotta per Electron Beam Melting non ha permesso la valutazione precisa dell'effetto dei singoli parametri sulla microstruttura.

Dalle immagini ottenute al microscopio elettronico a scansione è possibile notare, nella zona adiacente alla superficie lavorata, un affinamento della grana con deformazione dei bordi grano con morfologia allungata nella direzione della velocità di taglio come avveniva per la lega ASTM F1537. Questo effetto è dovuto alla deformazione meccanica e alle elevate temperature in gioco durante il processo di lavorazione.

L'analisi svolta non ha portato a definire come i singoli parametri di avanzamento o velocità di taglio abbiano quantitativamente influito sul cambiamento microstrutturale, tuttavia si è potuto osservare l'effetto che la lavorazione ha avuto sul materiale.



**Figura 4.29** Effetto della lavorazione sulla microstruttura della lega ASTM F75

#### 4.3.4 Microdurezza - CoCrMo F75 EBM

Uno studio più approfondito dell'effetto dei parametri di taglio sulla microstruttura è stato possibile attraverso le misurazioni di microdurezza.

I profili sono stati fatti per tutte le condizioni nei tempi 3 e 8 minuti in modo tale da stabilire più correttamente il legame della velocità di taglio e dell'avanzamento, indipendentemente dalla condizione di usura dell'inserto.

La prima cosa che si può notare, rispetto ai profili presentati per la lega ASTM F1537, è il valore più elevato di durezza del materiale bulk che se per la prima lega era di 500 Hv circa per il CoCrMo prodotto per EBM raggiunge valori di 600 Hv (caratteristica legata al processo produttivo, vedi figura 4.30). L'incrudimento superficiale è molto elevato, soprattutto per la condizione con  $V_c=60$  m/min e  $f=0,15$  mm/rev con lubrificante il cui profilo di durezza si discosta da tutti gli altri con valori in superficie di 1060 Hv. Per questi parametri infatti, nonostante la scelta dei primi minuti di lavorazione come tempi di analisi, l'elevata usura riscontrata sull'utensile risulta avere un ruolo fondamentale.

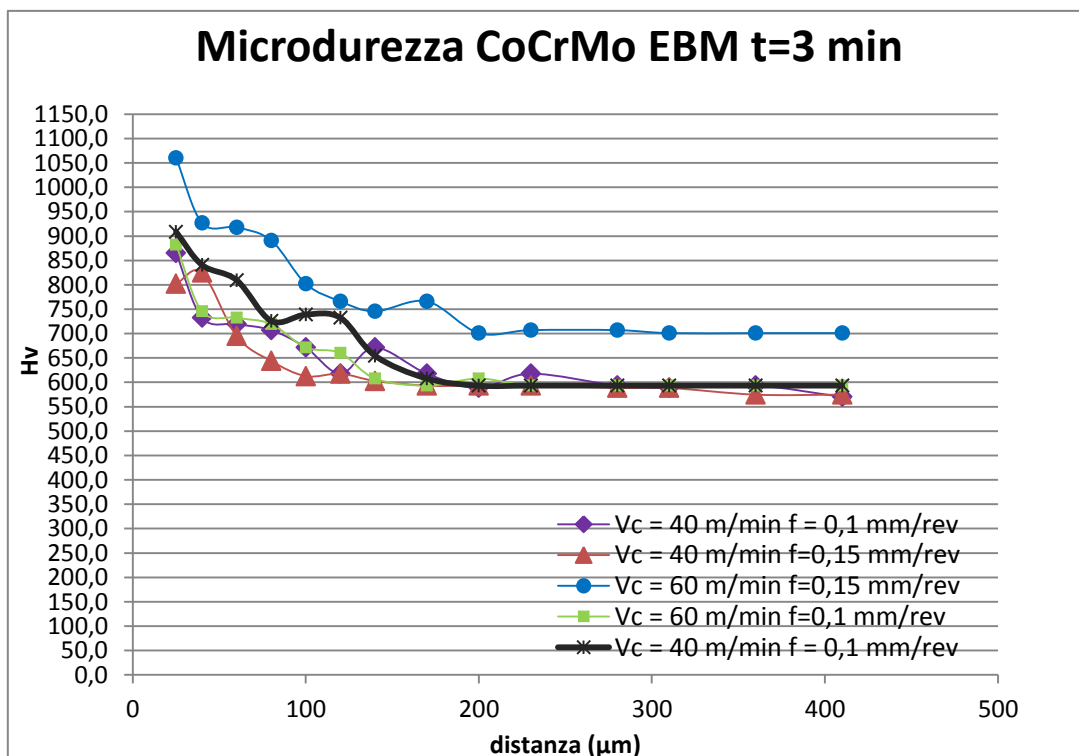


Figura 4.30 Profili di microdurezza in tornitura a 3 minuti

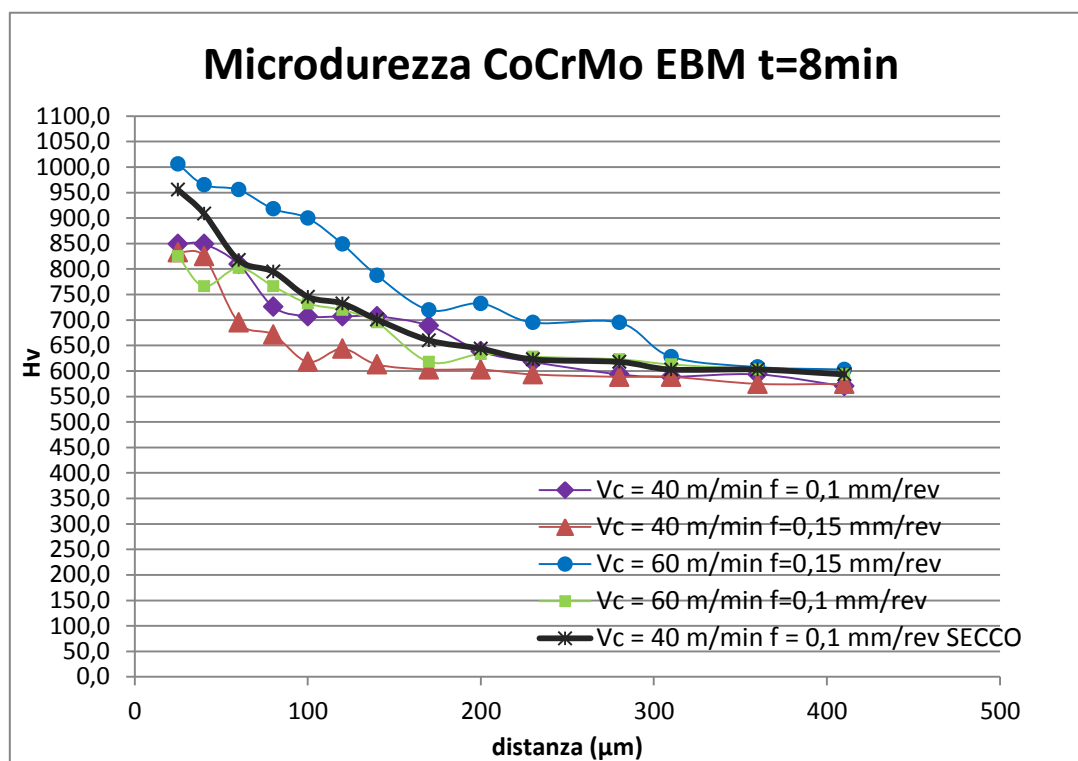


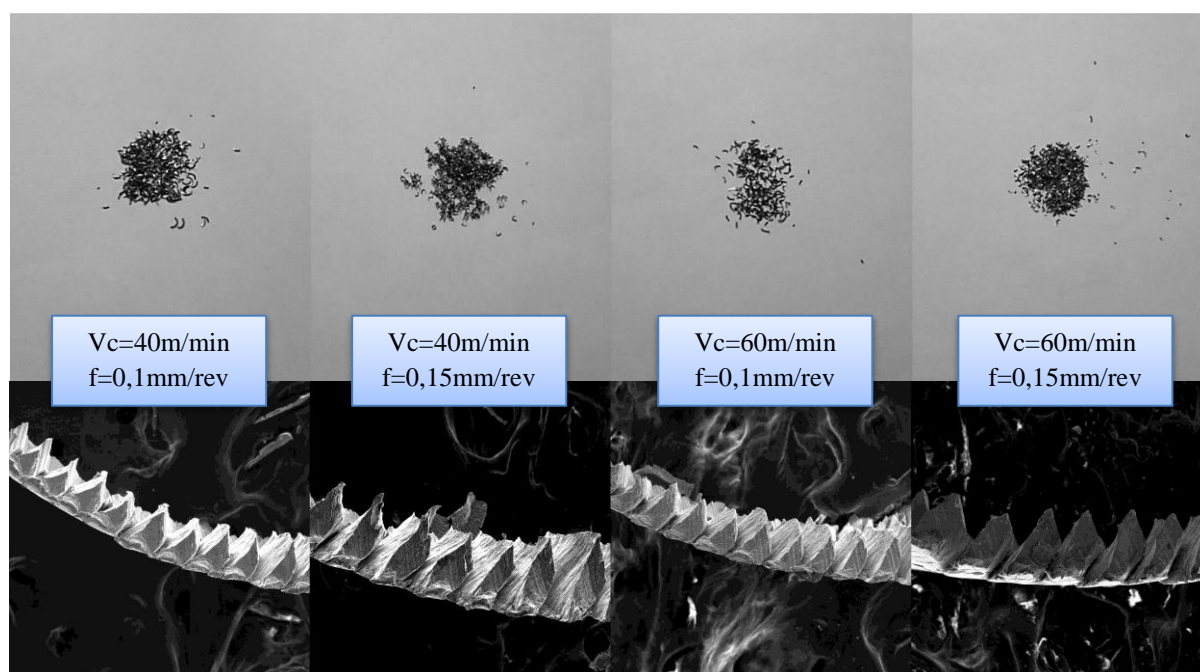
Figura 4.31 Profili di microdurezza in tornitura a 8 minuti

## 4.4 Morfologia truciolo

In questo capitolo verranno illustrate le foto della morfologia del truciolo prodotto durante le lavorazioni di tornitura delle leghe ASTM F1537N e ASTM F75 EBM. Le diverse morfologie sono state prima catalogate macroscopicamente in base ai diversi parametri di taglio e alla presenza del lubrificante, mentre successivamente è stata svolta un'analisi sulla segmentazione del truciolo con immagini al microscopio elettronico a scansione.

### 4.4.1 Foto della morfologia dei trucioli di CoCrMo F1537

*Piena lubrificazione*



**Figura 4.32** *Morfologia del truciolo al variare dei parametri di taglio in presenza di lubrificante*

Nella condizione di piena lubrificazione, la morfologia del truciolo non cambia significativamente con i parametri di taglio utilizzati e con l'usura dell'utensile come si vede in figura 4.32. I trucioli si presentano come frammenti di piccoli archi di misura tra i 5 e i 10 mm.

La frammentazione del truciolo è stata facilitata dal flusso del refrigerante che ha anche contribuito a diminuire la temperatura in gioco e quindi non sono osservabili, all'aumentare del tempo di lavorazione, differenze di colorazione. Per tutte le condizioni il truciolo risulta segmentato con minime variazioni di distanza picco-valle.

Lubrificazione a secco

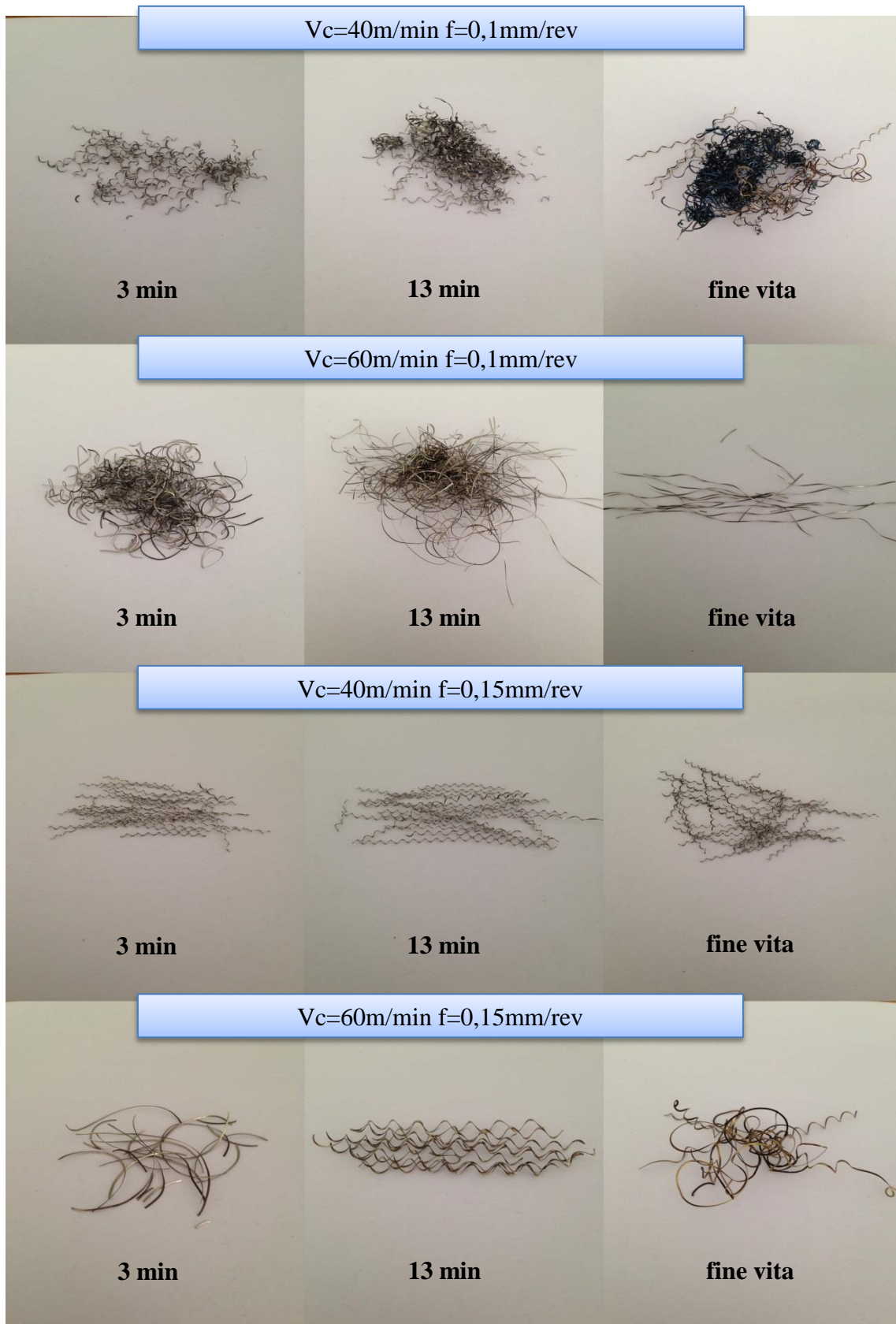
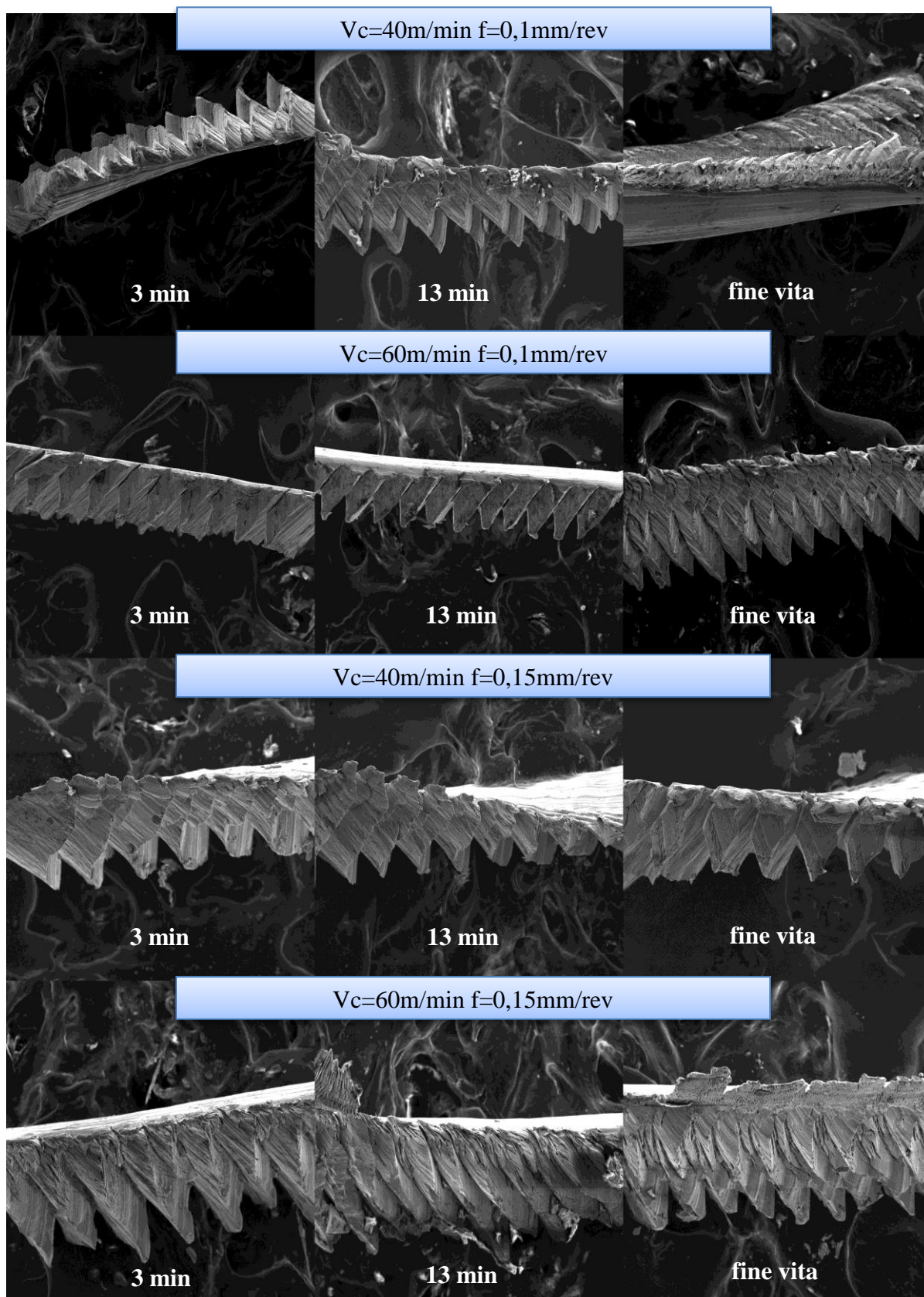


Figura 4.33 Foto della morfologia del truciolo al variare dei parametri di taglio in assenza di lubrificante





**Figura 4.34** Foto al SEM della morfologia del truciolo al variare dei parametri di taglio in assenza di lubrificante

Nella condizione a secco i trucioli si presentano, a livello macroscopico, con una morfologia totalmente diversa dal caso con il lubrificante e dipendente dalle condizioni di taglio nonché soprattutto dall'usura dell'inserto. Questa dipendenza è l'effetto delle alte temperature che vengono raggiunte durante il processo soprattutto con avanzamenti di 0,15 mm/rev o con tempi di lavorazione molto elevati.

Nel caso di  $V_c=40$  m/min e  $f=0,1$  si può osservare come a fine vita dell'inserto il truciolo ha cambiato colorazione diventando di un colore blu scuro sintomo del fatto che l'inserto totalmente usurato strisciava sulla superficie aumentando l'attrito e così anche la temperatura. Una situazione analoga accade a  $V_c=60$  m/min e  $f=0,15$  mm/rev dove, raggiunto  $V_{bc}=0,3$  mm, il truciolo inizia a deformarsi e a cambiare colorazione.

A 13 minuti, quando l'usura dell'inserto non è ancora discriminante, si possono osservare importanti variazioni in base ai parametri di taglio. La velocità di taglio ha una forte dipendenza infatti il truciolo a 40 m/min ha una morfologia ad elica mentre a 60 m/min si presenta come dei lunghi filamenti aggrovigliati. Nel primo caso il passo dell'elica aumenta con avanzare dell'usura dell'inserto e anche il colore, come detto precedentemente, passa dall'argento all'oro per poi arrivare al blu scuro.

La rottura del truciolo non è stata controllata nel caso a secco come nel caso che prevedeva l'utilizzo del lubrificante e per questo motivo si sono formati alcuni grovigli di truciolo attorno al porta utensile. Aumentando l'avanzamento a 0,15 mm/rev si riesce a controllare maggiormente la rottura del truciolo.

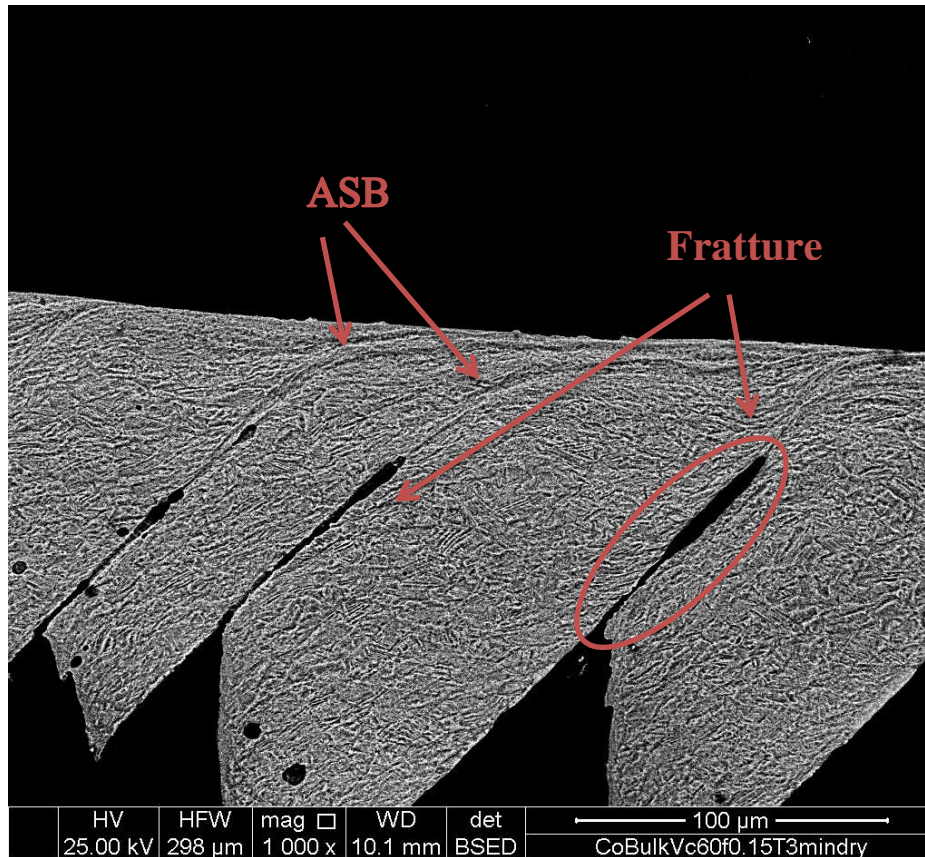
In tornitura a secco la morfologia dei trucioli ottenuta non è desiderata nei processi produttivi per i continui arresti del processo di lavorazione necessari per pulire la zona di taglio e le porzioni di truciolo aggrovigliate attorno al portautensili.

Analizziamo ora le immagini ottenute al SEM.

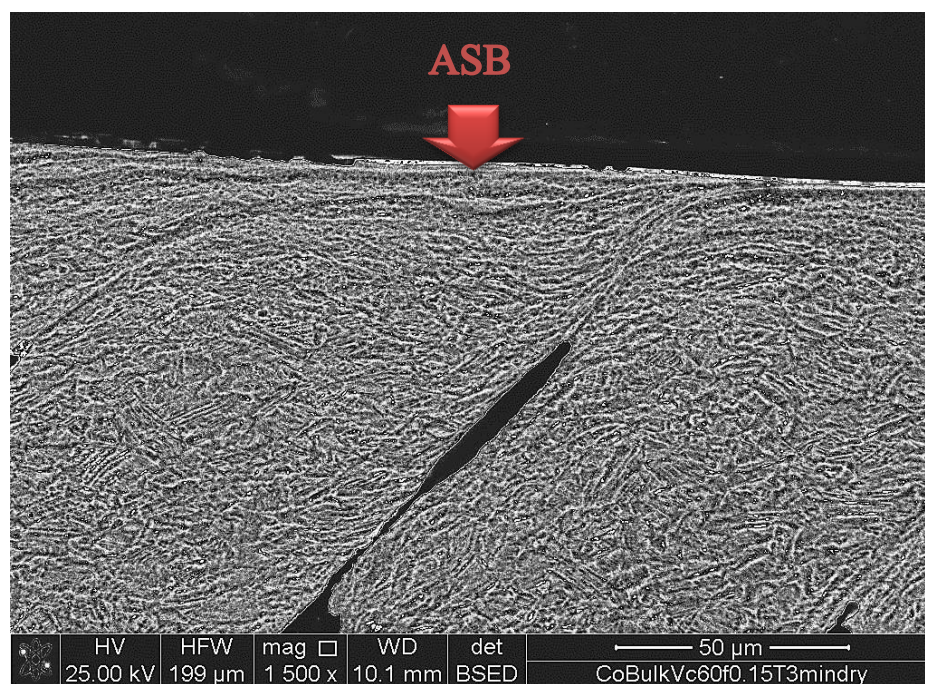
In entrambe le condizioni di lubrificazione e per tutti i parametri di taglio il truciolo prodotto dalla lega ASTM F1537 è segmentato.

Il fenomeno della segmentazione è tipico delle superleghe a base nichel e delle leghe di cobalto. In letteratura non sono stati effettuati studi sulla segmentazione del truciolo di leghe a base cobalto, ma i meccanismi descritti nel capitolo... per altre tipologie di leghe sono stati applicati nel seguente studio per analizzare il truciolo prodotto nella lavorazione di tornitura della lega CoCrMo.

## 4.4.2 Segmentazione del truciolo della lega CoCrMo



**Figura 4.35** Micrografia del truciolo di ASTM F1537 Vc=60 m/min f=0,1 mm/rev



**Figura 4.36** ASB e fratture

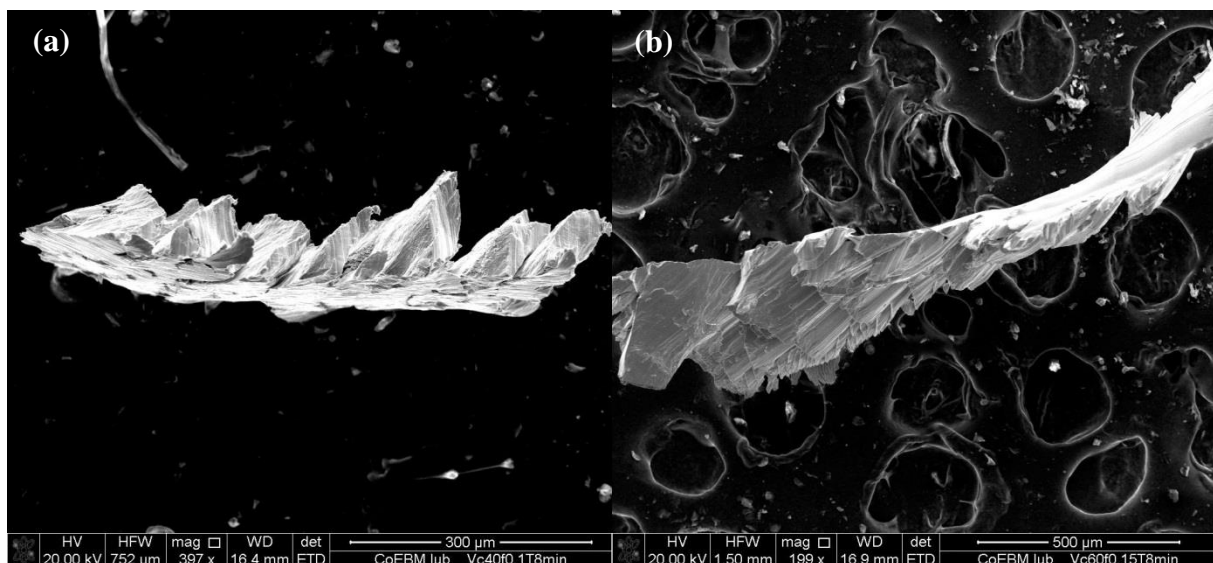
Le immagini sopra riportate si riferiscono a frammenti di truciolo tornito con  $V_c=60$  m/min e  $f=0,15$  mm/rev in assenza di lubrificante.

La segmentazione è dovuta alla presenza di zone in cui la deformazione per scorrimento risulta concentrata con picchi di temperatura che quando il processo avviene così velocemente non hanno abbastanza tempo per diffondere soprattutto per materiali, come in questo caso con bassa conducibilità termica. Questo crea delle bande di scorrimento adiabatiche caratterizzate dalla presenza di deformazione plastica dove i grani risultano allungati nella direzione di scorrimento. Dal confronto in letteratura con altri materiali si può supporre che le bande siano deformate e non trasformate poiché dalle figure 4.35 e 4.36 non si evidenzia ricristallizzazione nella zona di scorrimento secondaria mentre nella banda di scorrimento primaria si nota un affinamento della grana.

La segmentazione però non è dovuta solamente alla presenza delle ASB ma sono presenti anche delle crepe che si creano periodicamente sulla superficie libera del pezzo davanti all'utensile e si propagano verso la punta di quest'ultimo. Quando, un accumulo di deformazione locale, raggiunge un valore di deformazione critico avviene la frattura del materiale la quale si propaga lungo le bande di scorrimento creando così una morfologia di truciolo segmentata.

#### 4.4.3 Foto della morfologia dei trucioli di CoCrMo F75 EBM

Il truciolo di CoCrMo EBM si presenta in tutte condizioni di lavorazione come polvere, a causa del comportamento duro e fragile del materiale. Microscopicamente si denota una segmentazione discontinua e irregolare.



**Figura 4.37** Morfologia del truciolo ASTM F75(a)  $V_c=40$  m/min  $f=0,1$  mm/rev (b)  $V_c=60$  m/min  $f=0,15$  mm/rev

# Conclusione

Il lavoro svolto in questa tesi ha visto l'analisi dell'effetto dei parametri di tornitura come velocità di taglio, avanzamento e condizione di lubrificazione, sulla lavorabilità di due leghe in CoCrMo prodotte una per forgiatura e una per tecnologia delle polveri.

I risultati ottenuti possono essere riassunti per entrambe le leghe in termini di usura dell'inserto, qualità superficiale, variazioni microstrutturali della superficie lavorata e morfologia del truciolo ottenuto.

Per la lega ASTM F1537 in entrambe le condizioni di lubrificazione si è riscontrata, attraverso le immagini al SEM e l'analisi EDS, usura adesiva sull'inserto. In assenza di lubrificante la quantità di materiale incollato è maggiore e l'usura inizia per tempi di lavorazione inferiori rispetto alla condizione con il lubrificante. L'effetto della velocità di taglio sull'usura dell'inserto viene limitata dall'utilizzo del refrigerante, mentre si osserva la presenza di maggiori scheggiature in questa condizione dovute al minor apporto di materiale incollato che però non hanno causato una durata minore della vita dell'utensile.

Tutti i tempi di vita registrati, come ampiezza del labbro di usura (parametro  $V_{bc}$ ), risultano industrialmente accettabili con forte dipendenza del valore di avanzamento rispetto alla velocità di taglio.

I valori di  $R_a$  in piena lubrificazione mostrano un tipico andamento a S e risultano accettabili per velocità di avanzamento pari a 0,1 mm/rev mentre sono troppo elevati per  $f=0,15$  mm/rev. A secco con avanzamenti di 0,1 mm/rev si ottengono valori di rugosità migliori rispetto alle prove effettuate con il lubrificante e aumentando l'avanzamento a 0,15 mm/rev anche l'effetto della velocità di taglio diventa influente. Le topografie effettuate con il profilometro hanno evidenziato che nonostante i valori più bassi di  $R_a$  nella condizione a secco, l'integrità superficiale è migliore con l'utilizzo del lubrificante. Non sono presenti irregolarità superficiali tra i segni di lavorazione in entrambe le condizioni.

In seguito al processo di tornitura si è apprezzata un'affinazione della grana cristallina nello strato superficiale nella direzione della velocità di taglio. Questo è stato confermato oltre che dalle immagini al SEM della microstruttura anche da profili di microdurezza.

Gli andamenti di durezza per la condizione con lubrificante non sono dipendenti in maniera significativa né dalla velocità di taglio né dall'avanzamento, mentre nella condizione in assenza di lubrificante si nota un aumento della durezza superficiale all'aumentare della velocità di avanzamento a causa delle temperature maggiori sviluppate durante il processo.

La morfologia del truciolo a livello macroscopico è molto diversa: se con l'utilizzo del lubrificante non sono presenti variazioni di colorazione e dipendenza dalla velocità di taglio,

nel caso a secco si notano variazioni di colorazione all'aumentare del tempo di lavorazione e cambiamenti di forma in base alla velocità di taglio e all'avanzamento adottati.

È fondamentale notare che mentre l'utilizzo del lubrificante consente un buon controllo della rottura del truciolo, nella condizione a secco quest'ultimo rimane in parte aggrovigliato al porta utensile provocando un arresto della lavorazione.

Attraverso una precisa preparazione metallografica di frammenti di truciolo è stato possibile attribuire alla morfologia di truciolo segmentato la presenza di bande di scorrimento adiabatiche e cricche nella zona di scorrimento secondaria.

Per quanto riguarda la lega di CoCrMo prodotta per EBM la campagna prove è stata impostata secondo tempi definiti fino ad arrivare ad un tempo massimo di fine vita di 15 minuti. Il materiale più duro e abrasivo rispetto al precedente ha portato ad un apporto di materiale incollato sul petto dell'utensile maggiore con successiva usura per craterizzazione. L'usura di tipo abrasivo sul fianco dell'utensile invece si è ridotta rispetto al caso precedente.

Il valore di avanzamento di 0,15 mm/rev combinato ad una velocità di taglio di 60 m/min è risultato troppo gravoso per l'inserto che dopo 3 minuti di lavorazione mostrava già un'usura eccessiva. Per questi motivi la rugosità superficiale si è dimostrata fortemente correlata alla condizione dell'inserto mostrato una diminuzione dei valori di Ra con valori al di sotto di 1  $\mu\text{m}$  per tutti i parametri utilizzati tranne che per  $V_c=40$  m/min e  $f=0,15$  mm/rev. Le topografie hanno evidenziato la presenza di irregolarità superficiali come segni di lavorazione doppi e crateri, probabilmente attribuibili alla natura dura e fragile del materiale lavorato.

Anche in questo caso la lavorazione ha portato ad un affinamento della grana cristallina con allungamento dei bordi grano nella direzione di lavorazione. I profili di microdurezza hanno evidenziato un sensibile incrudimento della lega in superficie con un aumento dell'ampiezza della banda affinata passando da 3 a 8 minuti di lavorazione.

La morfologia del truciolo, a causa della fragilità del materiale, si presenta sotto forma di polvere e microscopicamente la segmentazione risulta meno regolare.

Prendendo quello che è stato osservato importanti sviluppi futuri potrebbero prevedere l'ottimizzazione della microstruttura del materiale di partenza. Conoscendo le caratteristiche ottimali di lavorazione e avendo un'opportuna analisi DTA e DSC del materiale (necessaria per indagare il campo delle trasformazioni di fase, range di solubilizzazione, ecc..) risulta interessante analizzare un determinato trattamento termico pre-lavorazione che aumenti la lavorabilità del materiale.

# Riferimenti Bibliografici

- [1] Kalpakjian, S. R. Shimd, *Tecnologia Meccanica*, V edizione 2008, Practice-Hall Inc.
- [2] Georgios P. Petropoulos, Constantinos N. Pandazaras, J. Paulo Davim, *Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining* (2010)
- [3] Durul Ulutan, Tugrul Ozel, *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 51 (2011) 250-280
- [4] C. Z. Duan, L. C. Zhang, *Adiabatic shear banding in AISI 1045 steel during high speed machining: Mechanisms of microstructural evolution*, Materials Science and Engineering A 532 (2012) 111-119
- [5] Z. P. Wan, Y. E. Zhu, H. W. Liu, Y. Tang, *Microstructure evolution of adiabatic shear bands anche mechanisms of saw-tooth chip formation in machining Ti6Al4V*, Materials Science and Engineering A 531 (2012) 155-163
- [6] C. Z. Duan, L. C. Zhang, H. Y. Yu, M. J. Wang, *An Investigation into the Microstructure of Adiabatic Shear Banding in AISI 1045 Hardened Steel due to High Speed Machining*, Advanced Materials Research Vols. 154-155 (2011) pp 321-324
- [7] G.G. Ye, S.F. Xue, M.Q. Jiang, X.H. Tong, L.H. Dai, *Modeling periodic adiabatic shear band evolution during high speed machining Ti6Al4V alloy*, International Journal of Plasticity 40 (2013) 39–55
- [8] Sandvik Coromant, *Turning tools* 2012.
- [9] P.C. Wanigarathne, A.D. Kardekar, O.W. Dillon, G. Poulachon, I.S. Jawahir, *Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature*, Wear 259 (2005) 1215–1224
- [10] International Organization for Standardization, *Tool-life testing with single point turning tools*, 1993.ISO 3685
- [11] Matteo D'Amato, Università degli Studi di Trento, *Cobalto e leghe di cobalto per applicazioni biomedicali* (2007-2008)
- [12] Luca Facchini, *Microstructure and mechanical properties of biomedical alloys produced by Rapid Manufacturing techniques*, Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Trento

- [13] R.S. Kircher, A.M. Christensen, K.W. Wurth, *Electron Beam Melted (EBM) Co-Cr-Mo Alloy for Orthopaedic Implant Applications*, Medical Modeling, Inc., Golden, CO 80401
- [14] D. A. Axinte<sup>1</sup>, P. Andrews<sup>2</sup>, W. Li<sup>3</sup>, N. Gindy<sup>1</sup>, P.J. Withers<sup>3</sup>, *Turning of advanced Ni based alloys obtained via powder metallurgy route*
- [15] R. Shivpuri, J. Hua, P. Mittall, A. K. Srivastava, *Microstructure-Mechanics Interactions in Modeling Chip Segmentation during Titanium Machining*
- [16] 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*, Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 372– 384
- [17] Valery Marinov, *Manufacturing Technology, Tool Wear and Tool Life*
- [18] Bin Zou, Ming Chen, Chuanzhen Huang, Qinglong An, *Study on surface damages caused by turning NiCr20TiAl nickel-based alloy*, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 5802–5809
- [19] Wilson Corrêa Rodrigues, Luiz Roberto Broilo, Lírío Schaeffer, Gerhard Knörnschild , Fidel Romel Mallqui Espinoza, *Powder metallurgical processing of Co–28%Cr–6%Mo for dental implants: Physical, mechanical and electrochemical properties*, Powder Technology (2010)
- [20] Guy Sutter, Xuefeng Bi, Alain Molinari, Gautier List, *Chip Flow and Scaling Laws in High Speed Metal Cutting*, J. Manuf. Sci. Eng. 134(2), 021005 (Apr 04, 2012)
- [21] <http://94.81.55.92/omarpoint/default.aspx>
- [22] Safian Sharif, Erween Abd Rahim, Hiroyuki Sasahara, *Machinability of Titanium Alloys in Drilling*, Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, A.K.M. Nurul Amin, ISBN 978-953-51-0354-7, March 16, 2012



# Ringraziamenti

Ringrazio in primo luogo la Professoressa Bruschi che ha permesso la realizzazione di questa tesi ed è sempre stata presente e disponibile, il Dott. Alberto Bordin e il Dott. Marco Breda per i pomeriggi passati a ricercare l'attacco chimico più appropriato.

Ringrazio in particolar modo i miei genitori, Lorena e Maurizio che oltre al loro sostegno economico in questi anni mi sono sempre stati vicino sostenendomi in tutte le mie scelte, le mie delusioni e le mie vittorie.

Ringrazio mia zia Catia e i miei nonni Fernanda e Giuseppe che mi hanno sempre aiutata nel momento del bisogno.

Ringrazio il miglior team di studio di Ingegneria composto da Giorgia, Ale, Tommaso, Sofia, Rosi e Massimo che hanno reso i pomeriggi di studio divertenti senza mai perdere di vista l'obiettivo.

Ringrazio le mie amiche Arianna, Giulia, Carlotta, Sara e Giulia le migliori di sempre che mi hanno fatto trascorrere questi cinque anni al massimo.

Ringrazio le mie coinquiline Micol e Martina che hanno reso l'appartamento un po' come "casa", con le risate, i consigli ma soprattutto con le costanti "ore piccole".