

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

## **Relazione per la prova finale**

*Lavorabilità di leghe a memoria di forma*

Tutor universitario: Prof.ssa Bruschi Stefania

Presutto Alessandro, 1201670

Anno Accademico: 2021/2022



# Indice

Microstruttura e proprietà del Nitinol.....	4
Settori di impiego.....	7
Utensili da taglio e parametri di processo.....	10
Influenza della superelasticità sulla lavorabilità della lega.....	16
Lavorazione criogenica.....	24
Bibliografia.....	33

## **Microstruttura e proprietà del Nitinol**

Le leghe sono soluzioni solide di due o più componenti: tra le più comuni ci sono gli acciai (leghe Fe-C), quelle prese in esame sono le leghe a memoria di forma.

Le leghe a memoria di forma (in inglese shape memory alloys - SMA) sono dei particolari composti metallici che successivamente all'aver subito una deformazione richiesta dall'operazione da eseguire possiedono la capacità di tornare alla forma originale se sottoposte ad appropriato trattamento termico.

Anche grazie a questa peculiare capacità stanno attraendo un interesse crescente in svariati settori, quali aerospaziale, chimico e medicale.

Il numero di leghe a memoria di forma è in continuo aumento, tuttavia, tra i cosiddetti metalli intelligenti (in inglese smart metals) il più utilizzato è sicuramente il Nitinol (NiTi) costituito da Nickel e Titanio in percentuali atomiche pressoché uguali tra loro.

Il Nitinol presenta ottime proprietà meccaniche in termini di una maggiore deformazione (fino all'8%), maggiore stabilità termica e possiede inoltre un'ottima resistenza a corrosione oltre ad essere molto duttile.

Le sue proprietà dipendono principalmente dalla composizione della lega e dal processo di lavorazione, includendo il trattamento termico effettuato.

Le leghe NiTi possono esistere in differenti fasi, ossia, in altri termini, a livello microstrutturale, la disposizione degli atomi di Nickel e di Titanio può variare.

Infatti, la peculiare microstruttura del Nitinol si presenta in fase martensitica a basse temperature mentre in fase austenitica a temperature più elevate.

La trasformazione di fase che si verifica nel Nitinol dipende dall'inizio e dalla fine delle transizioni termiche delle fasi cristalline di martensite e austenite. È importante capire la trasformazione senza diffusione per prevedere il comportamento meccanico della lega.

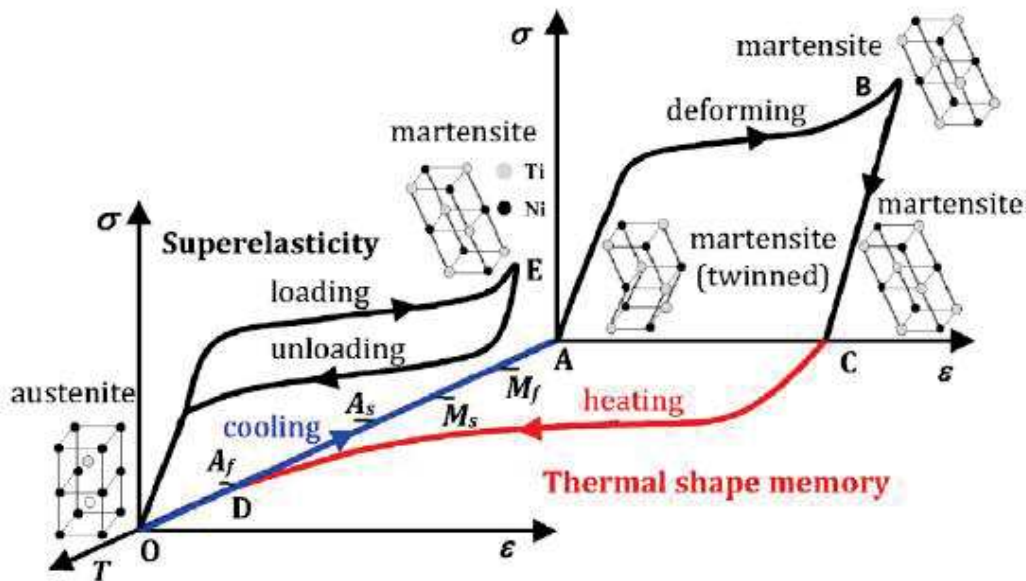


Figura 1 Diagramma tensione-deformazione-temperatura del Nitinol

Si assume il Nitinol inizialmente in fase austenitica al punto O.

Senza alcuna sollecitazione applicata il Nitinol viene fatto raffreddare fino a raggiungere il punto A, durante tale processo si verifica la trasformazione da austenite in martensite (twinned) che termina una volta superata la temperatura di martensite finish ( $M_f$ ).

Il materiale viene deformato attraverso la riorientazione degli atomi dal punto A al punto B. Successivamente rilasciando il carico dal punto B si raggiunge il punto C, ossia, si ha il recupero della quota parte elastica da parte della lega, il materiale però rimane deformato. La trasformazione da una fase all'altra del Nitinol è reversibile, di conseguenza, una volta che la lega viene riscaldata ad una temperatura maggiore rispetto a quella di austenite finish ( $A_f$ ), il materiale esegue la trasformazione cristallina inversa e gli atomi si dispongono nuovamente secondo la struttura austenitica, ossia, la lega riprende la conformazione regolare e rigida iniziale recuperando la deformazione pseudoplastica. La temperatura alla quale la lega "ricorda" la sua forma originale può essere modificata mediante variazione della composizione o con appropriati trattamenti termici.

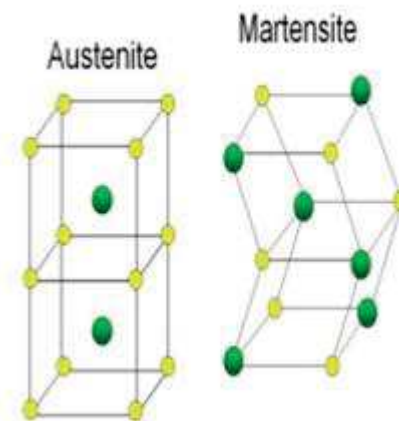
Si manifesta cioè l'effetto di memoria di forma

A causa degli effetti legati alla memoria di forma e alla superelasticità, elevata duttilità, un elevato tasso di incrudimento, la breve vita dell'utensile e la formazione di bava sono punti critici per quanto riguarda la lavorazione del Nitinol.

Le caratteristiche delle diverse forme del reticolo cristallino del Nitinol sono le seguenti:

- Austenite: è la fase stabile ad alta temperatura. È caratterizzata da un reticolo a simmetria cubica a corpo centrato (BCC), in cui gli atomi occupano i vertici di due reticoli cubici compenetrati. Il materiale in questa fase è duro e difficilmente deformabile;
- Martensite: è la fase stabile a bassa temperatura. È caratterizzata da una grande flessibilità e dalla capacità di essere facilmente deformata senza che tale deformazione sia permanente, infatti, questa fase si forma e si accomoda in forma twinned, ovvero speculare rispetto ad un piano ideale tra due celle, non creando difetti irreversibili nel reticolo cristallino.

In questa fase, il materiale sottoposto ad uno sforzo meccanico è in grado di sopportare un alto grado di deformazione senza tuttavia rompere i legami chimici, poiché, i diversi piani cristallini sono dotati di una elevatissima mobilità relativa.



*Figura 2 Disposizione degli atomi di Ni e Ti nelle due fasi*

È noto che le proprietà delle SMA sono significativamente governate dal loro metodo di fabbricazione.

## Settori di impiego

Le leghe a memoria di forma trovano applicazione in diversi campi, dalla medicina all'industria automobilistica e aerospaziale, includendo principalmente connettori e interruttori elettrici, termostati, molle, connettori per tubi ad alta pressione, unione di materiali compositi, antenne telefoniche mobili, strumenti e impianti chirurgici, applicazioni aerospaziali (per esempio sensori, dispositivi d'apertura antenne a regolazione termica, basamenti ad azionamento termico per applicazioni solari).

Le leghe a memoria di forma rappresentano un'alternativa leggera agli attuatori convenzionali quali i sistemi idraulici, pneumatici e motorizzati. In questo caso, per esempio, nel settore automotive sono solitamente utilizzate le leghe con cosiddetto effetto a due vie, poiché il cambio di forma avviene con il riscaldamento oppure con il raffreddamento. Tali attuatori, compatti, economici e innovativi, possono originare slittamenti o carichi ed essere attivati da cambiamenti nel campo magnetico o elettrico oppure nella temperatura. Un'altra applicazione riguarda gli smorzatori, impiegati per esempio per attenuare le vibrazioni e proteggere le strutture civili da fenomeni sismici.

Un obiettivo in campo industriale è la realizzazione di strutture intelligenti, col compito d'eseguire funzioni speciali sotto l'influenza di stimoli esterni: per esempio sensori e attuatori intelligenti integrati in ponti o ali d'aereo, in cui possono reagire a deformazioni eccessive o alla comparsa di cricche, oppure parti di vari ausili di biomedicina, tipo arti artificiali.

Tra la vasta gamma d'apparecchiature e dispositivi medici utilizzati in radiologia interventistica, ortopedia, neurologia e cardiologia, il Nitinol è adottato in particolare come materiale intelligente per gli stent, la cui funzione è impedire l'occlusione dei vasi sanguigni. Questi dispositivi sono strutture tubolari realizzate a partire da tubi di Nitinol che vengono poi tagliate utilizzando il laser.

Ci sono campioni di stent autoespandibili in Nitinol: uno stent per applicazioni coronariche è principalmente espandibile con palloncino, mentre per scopi non vascolari o periferici è autoespandibile; il suo diametro è maggiore di quello del vaso bersaglio, ed è contenuto in un sistema di rilascio basato su catetere. Raffreddato a meno di 5 °C (vale a dire nello stato martensitico), lo stent autoespandibile è assai deformabile, quindi può essere introdotto nel corpo attraverso un'incisione minuta o un'apertura naturale del corpo. Rilasciato dal dispositivo d'erogazione, si espande al suo diametro maggiore predeterminato sino a raggiungere la parete carotidea o dell'arteria coronarica. Gli stent, grazie a questa trasformazione di fase, sono progettati per mostrare la superelasticità nell'intervallo di temperatura del corpo umano; pertanto, essi richiedono il completamento della martensite senza stress alla trasformazione di fase dell'austenite al di sotto di questa temperatura.

I dispositivi medici invasivi e gli impianti inseriti in modo endovascolare (soprattutto quelli metallici come gli stent e le valvole cardiache), in particolare, possono presentare problemi generali di resistenza, usura e tensioni residue. Tali dispositivi, una volta impiantati nelle arterie o nelle carotidi, sperimentano invariabilmente condizioni di carico in vivo per l'intera vita del paziente, in particolare lo stress dinamico della pulsazione e l'aggressione dell'ambiente biologico, per esempio l'ambiente ionico del sangue. Questi scenari possono portare a fratture minori senza conseguenze per la longevità dello stent, o invece alla completa rottura con conseguenti danni ai pazienti.

Eventi di frattura fino al 50%, probabilmente a causa di spostamenti ciclici in vivo, sono stati segnalati in un numero di stent dopo un anno. Poiché le varie applicazioni del Nitinol implicano carichi ripetitivi, la conoscenza delle proprietà di crescita della cricca da fatica di questo materiale è fondamentale per comprendere i micromeccanismi di danno, in particolare con riferimento alle conseguenze della trasformazione della fase martensitica indotta dallo stress geometricamente reversibile sulla crescita delle cricche resistenza. Il limite di fatica del materiale, in particolare, può risultare inferiore alla somma delle sollecitazioni residue e di carico e in questo caso possono verificarsi rotture da fatica. Diversi studi e ricerche su stent, tubi e campioni di Nitinol sono stati effettuati fino a ora, fornendo un mosaico di informazioni su diversi aspetti relativi alla microstruttura, al comportamento a fatica e alla meccanica computazionale. Di recente sono stati compiuti studi sulla fattibilità dell'analisi a livello di micro e nanoscala di questi materiali, al fine di fornire un utile supporto per valutare la resistenza meccanica e alla corrosione e il comportamento a fatica.

Tra gli altri molteplici impieghi industriali delle leghe a memoria di forma possono infine citarsi, in maniera non esaustiva, i seguenti:

- dispositivi di regolazione termica, rivelatori d'incendio, temporizzatori, valvole di sicurezza a espansione termica e per gas domestico per l'industria termoidraulica;
- dispositivi di sicurezza per armi per l'industria della difesa;
- dispositivi di smorzamento per l'ingegneria civile;
- dispositivi rivelatori di surriscaldamento freni, dispositivi di riduzione vibrazioni e rumori e numerosi concept sviluppati riguardanti l'aumento del comfort, componenti tecnici o meccanici, il risparmio energetico e l'aumento della sicurezza nel veicolo per l'industria automobilistica;
- elementi per dispositivi d'indicazione temperatura, per l'industria alimentare e quella farmaceutica;
- ingranaggi a rumore ridotto e dispositivi termici antisurriscaldamento per l'industria degli elettrodomestici;
- perni per fratture ossee e raddrizzatori delle ossa per il settore medico;



- valvole antivibrazione, materiali antivibranti per costruzione d'ingranaggi e portautensili;
- rivetti autobloccanti, giunzioni e anelli di tenuta;
- componenti robotici;
- indumenti intelligenti che, deformati meccanicamente, in seguito a riscaldamento in flusso d'aria calda ritornano alla loro forma originale.

## **Utensili da taglio e parametri di processo**

Identificare le difficoltà è il primo fondamentale step per avvicinarsi alla lavorazione di queste leghe, poiché così facendo si possono adottare misure per sviluppare approcci migliori risolvendo, o al più, riducendo le complicazioni.

Poiché le NiTi SMA sono sensibili alla temperatura, difficili da lavorare e le temperature di trasformazione di fase sono relativamente basse, l'effetto risultante della lavorazione sulla risposta termo-meccanica del materiale, specialmente a causa dell'elevata deformazione, è molto più complesso rispetto ad altri materiali di ingegneria.

Processi di lavorazione convenzionali quali tornitura, foratura, fresatura, rettifica e molti altri continuano ad essere un obiettivo importante per i ricercatori a causa della loro predominanza nel settore e delle loro caratteristiche ben note.

Si vuole studiare l'applicabilità di diversi materiali per utensili da taglio per quanto concerne la lavorazione delle NiTi SMA durante il processo meccanico di tornitura con l'obiettivo di evidenziare eventuali differenze nelle proprietà meccaniche al variare della temperatura di lavorazione.

La selezione dell'utensile, del materiale da lavorare, i parametri di taglio (velocità, avanzamento, e profondità di passata) e le condizioni di lavoro sono estremamente importanti per ottenere il prodotto finito desiderato.

Sono stati selezionati comuni materiali da taglio per leghe a base di Nickel (Ni) o Titanio (Ti), ossia, inserti di carburo cementato sia rivestito sia no, diamante policristallino, nitrato di boro cubico e diversi altri materiali ceramici da taglio.

È chiaro come il carburo cementato senza rivestimento non è adatto per le lavorazioni riguardanti le NiTi SMA a causa dell'elevata usura utensile. L'usura si manifesta in maniera più significativa sia sul fianco dell'utensile sia sul petto dello stesso con la formazione di diversi crateri.

Utilizzando un opportuno rivestimento si può diminuire in maniera significativa l'usura utensile.

Per esempio, utilizzando un inserto rivestito da nitrato di titanio (TiN) si nota come la larghezza della landa d'usura diminuisca significativamente.

I migliori risultati sono ottenuti con l'utilizzo di un inserto in carburo cementato con rivestimento a più strati. In particolare, il rivestimento consiste in otto strati alternati di carbo-nitrato di titanio (TiCN) e nitrato di titanio-alluminio (TiAlN) limitati inferiormente e superiormente da due strati di nitrato di titanio (TiN).

L'alto potenziale dei materiali da taglio come il nitruro di boro cubico (CBN) e il diamante policristallino (PCD) è dovuto alla loro estrema durezza e resistenza all'usura durante il processo.

La lavorazione di leghe a base di Ni con utensili da taglio in CBN è economicamente preferibile. Il PCD, invece, è principalmente utilizzato per lavorare metalli leggeri come alluminio o magnesio ma anche leghe a base di Titanio.

Nella parte superiore della Figura 3 vengono disposti gli utensili in CBN e PCD al termine del processo di tornitura di una NiTi SMA. Usando il PCD si verifica un'elevata usura adesiva, inoltre, la bassa duttilità del diamante policristallino combinata con le alte forze di taglio può provocare un'improvvisa rottura dell'utensile da taglio. L'usura dell'utensile non può essere prevista ed evitata mediante la variazione dei parametri di processo quali la velocità di taglio, l'avanzamento o la dimensione dei grani del PCD.

Non è possibile notare l'insorgere dell'usura quando si usano inserti in CBN.

A parità di condizioni di taglio, l'usura utensile è maggiore utilizzando inserti in CBN rispetto ad utensili in carburo cementato rivestito durante la lavorazione di tornitura.

Considerando anche l'elevato costo del CBN gli utensili in carburo cementato rivestiti sono preferibili.

La parte inferiore della Figura 3 presenta utensili da taglio in materiale ceramico dopo la lavorazione di tornitura delle NiTi SMA. Entrambi i materiali non sono in grado di lavorare le leghe di Nitinol, indipendentemente dai parametri di taglio.

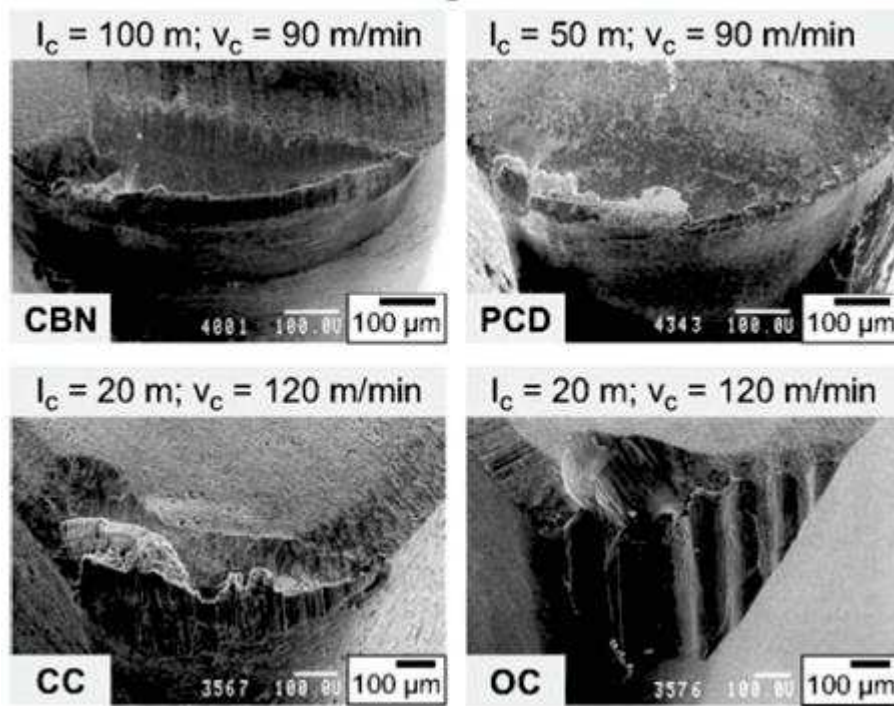


Figura 3 Usura utensili al termine del processo di tornitura

L'influenza dei parametri di taglio quali velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata e il lubrorefrigerante utilizzato sulla lavorabilità del Nitinol è stata studiata considerando utensili in carburo cementato a più strati (TiCN/TiAlN). Rispetto a materiali convenzionali, la vita dell'utensile è molto più breve durante la lavorazione del NiTi e spesso termina con l'insorgenza dell'usura.

I risultati ottenuti dalla variazione della velocità di taglio durante il processo di tornitura delle NiTi SMA mostrano come elevate velocità di taglio sono preferibili. Infatti, a più basse velocità di taglio ( $V_c < 60$  m/min) si verifica un'usura utensile più elevata e sono richieste forze di taglio maggiori.

Come è possibile notare osservando la Figura 4, la lavorabilità può essere classificata in tre diversi range. A basse velocità di taglio ( $V_c = 20$  m/min) le forze di taglio sono molto elevate e si verifica un'alta usura utensile. Con l'incremento delle velocità di taglio l'usura diminuisce insieme alle forze di taglio.

Scegliendo velocità di taglio più elevate intorno a  $V_c = 100$  m/min l'usura utensile non compare, di conseguenza, aumenta la finitura superficiale.

L'utilizzo di lubrorefrigeranti influisce sulle forze in gioco e sulla velocità di taglio solo nel primo range dove la velocità di taglio è molto bassa.

Nel secondo range, in cui le velocità variano tra 60 m/min e 130 m/min, né le forze né la velocità di taglio sono influenzate dalla presenza di lubrorefrigerante. Infatti, le forze di taglio restano ad un livello quasi costante in un largo intervallo di velocità mentre l'usura utensile cresce lentamente.

Nel terzo range, in cui le velocità di taglio superano i 140 m/min, le forze in gioco e l'usura utensile crescono significativamente per lavorazioni senza lubrorefrigerante.

All'incremento delle velocità di taglio corrisponde un incremento della temperatura all'interno della zona di formazione del truciolo.

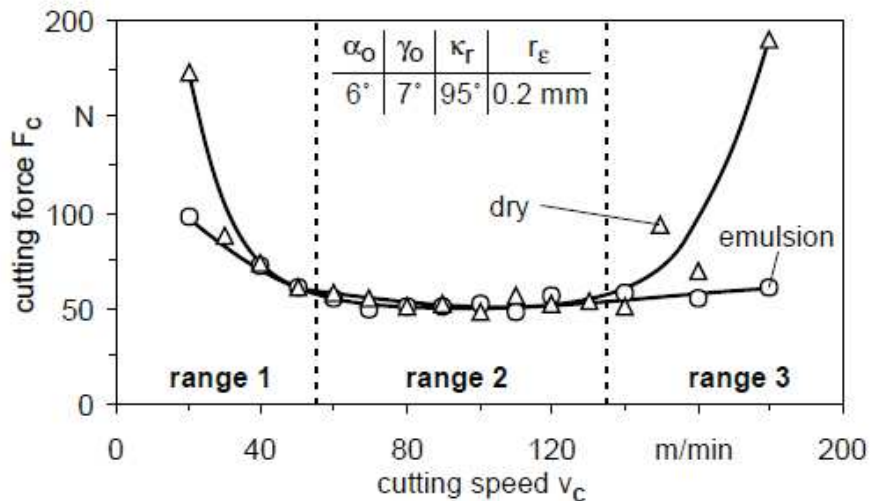


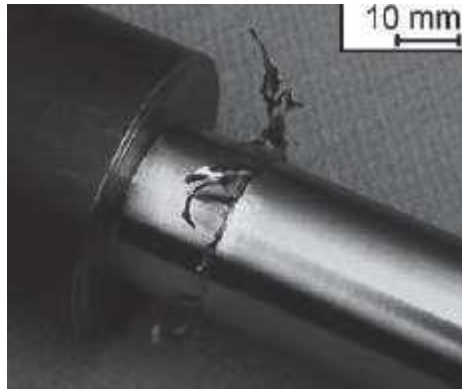
Figura 4 Relazione tra forza di taglio e velocità di taglio

L'elevata usura dell'utensile comporta una maggiore frizione e per questo motivo causa temperature di lavorazione maggiori.

Senza l'utilizzo di un lubrorefrigerante l'incremento della temperatura causa la bruciatura del truciolo e di conseguenza si ha un drastico incremento delle forze di taglio. Invece, mediante l'utilizzo di un fluido lubrorefrigerante si previene la bruciatura del truciolo e sia l'usura utensile che le forze di taglio crescono ma in maniera più moderata.

Per questo motivo, l'utilizzo di un fluido lubrorefrigerante aumenta la vita dell'utensile in lavorazione.

Un altro problema è la formazione di bave durante la tornitura causata dall'elevata duttilità delle leghe di NiTi.



*Figura 5 Formazione di bave in seguito al processo di tornitura*

Infatti, durante la lavorazione di queste leghe, alcune parti del materiale non vengono tagliate dall'utensile bensì vengono spinte fuori dalla zona di contatto. La Figura 6 mostra uno schema riguardante la formazione delle bave. All'inizio (stage 1) la larghezza della bava iniziale  $w_b$  è minore dell'avanzamento  $f$ . Alla successiva rotazione del pezzo in lavorazione non tutta la bava viene rimossa dall'utensile e seguentemente all'incremento dell'usura di quest'ultimo la bava cresce fino a che non è più possibile rimuoverla mediante l'utensile stesso e il restante materiale si aggiunge alla nuova bava formata.

Si ottiene un rapido aumento dell'altezza delle bave  $h_b$  (stage 2) fino a raggiungere diversi millimetri.

A minori velocità di taglio il passaggio tra stage 1 a stage 2 avviene prima, infatti, con l'obiettivo di ridurre la formazione di bave vengono scelte velocità che variano in un intervallo tra 90 m/min e 100 m/min.

Anche ridotti valori di avanzamento comportano una diminuzione dello spessore del truciolo e di conseguenza il passaggio da stage 1 a 2 avviene prima. Per le stesse ragioni, si preferiscono profondità di taglio maggiori.

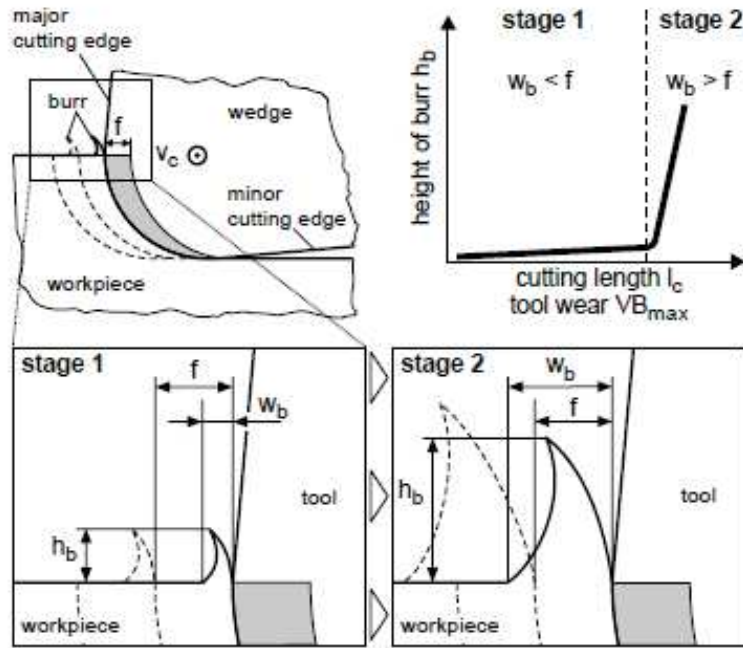


Figura 6 Schema per la formazione di bave durante la tornitura ( $w_b$  = width of burr)

La Figura 7 mostra l'influenza dell'avanzamento sull'usura dell'utensile quando eseguiamo una tornitura a volume di taglio costante. Un basso avanzamento ( $f = 0,03$  mm) incrementa non soltanto la formazione di bava ma genera anche elevata usura utensile. In un range di avanzamento che va tra 0,04 mm e 0,09 mm la larghezza della landa di usura rimane pressoché costante. Perciò, un avanzamento di 0,09 mm è preferibile anche per raggiungere un elevato tasso di rimozione del materiale (MRR).

È dunque preferibile utilizzare un avanzamento  $f$  maggiore rispetto a quanto riportato in letteratura.

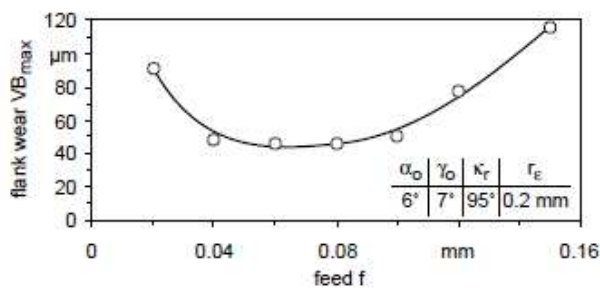


Figura 7 Relazione tra fianco d'usura e avanzamento

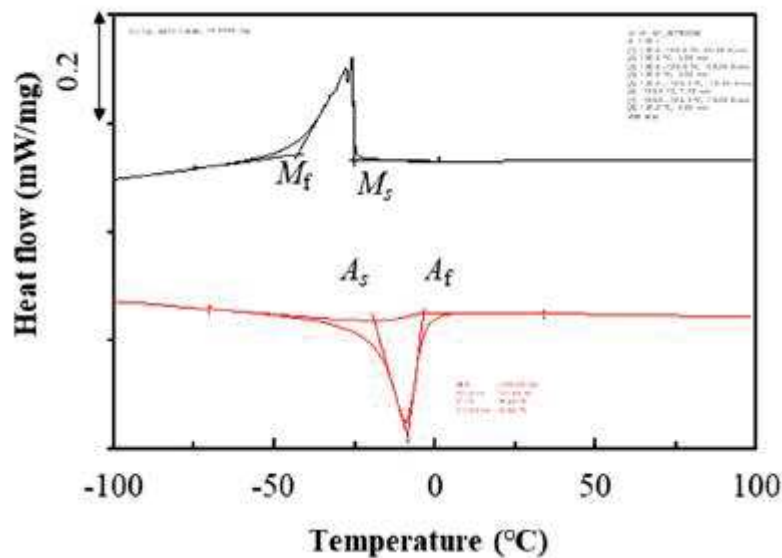
## Influenza della superelasticità sulla lavorabilità della lega

Le leghe di NiTi sono la classe più importante di SMA. Tuttavia, gli effetti di pseudoplasticità e pseudoelasticità causano diverse difficoltà durante la lavorazione di questi materiali.

Lo studio si pone come obiettivo l'analizzare l'effetto della superelasticità, in particolare del recupero della forma del materiale, sulla lavorabilità della lega in fase austenitica a temperatura di lavoro pari a 20 °C mediante l'operazione di tornitura.

Si utilizza una barra cilindrica di diametro 78 mm di Ni<sub>56</sub>Ti<sub>44</sub>, usando un calorimetro a scansione differenziale (DSC) si misurano le temperature di:

- $M_s = -23,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - $M_f = -41,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - $A_s = -17,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - $A_f = -2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- $M_d$  (martensite desist) = 150 °C.



La lega mostra quindi le sue proprie caratteristiche di super elasticità in un range di temperatura che va da -2,5 a 150 °C.

Il pezzo in lavorazione, essendo a  $t_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , si trova in fase austenitica; si può quindi deformare superelasticsearchamente.



L'operazione avviene su un tornio multiuso senza l'utilizzo di alcun fluido lubrificante in condizioni di lavoro pari a quelle ambiente.

Vengono utilizzati utensili in carburo cementato con raggiatura di 4 micrometri e gli angoli superiore ed inferiore sono rispettivamente 5° e 11°.

La temperatura viene misurata mediante l'utilizzo di un'opportuna camera termica mentre le forze in gioco utilizzando un particolare dinamometro, come si nota nella figura sottostante.



Figura 8 Setup del processo di taglio ortogonale

L'effetto della superelasticità sulla lavorabilità della lega viene valutato a diverse velocità di taglio, ossia: 10, 25, 50, 100 m/min mantenendo una profondità di passata costante.

Vengono verniciati sul pezzo da lavorare 14 diversi segni a circa 10° di distanza l'uno dall'altro che segnalano il range di temperatura che raggiunge il pezzo durante il processo, tale range va da 52 °C a 180°C.

Man mano che la lavorazione ha luogo si verifica un aumento del gradiente di temperature in direzione radiale della barra in lavorazione.

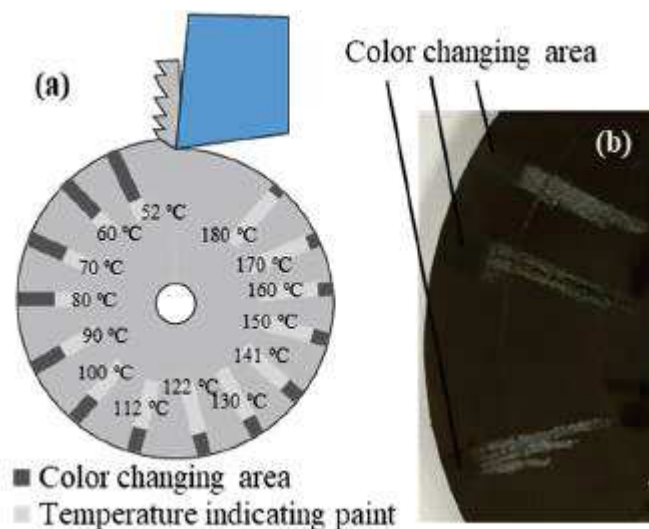


Figura 9 (a) Gradiente di temperatura raggiunta dal pezzo in lavorazione, (b) esempio

Ad una velocità di taglio pari a 25 m/min, l'intero processo di taglio si suddivide in 5 parti come si nota nella successiva Figura.

Nella prime tre fasi le forze subiscono un incremento fino al raggiungimento di una stabilità, durante la quarta parte si ha una notevole diminuzione delle forze di taglio fino ad un certo valore al termine dell'avanzamento, nella parte finale si nota come la forza di spinta (thrust force) sia maggiore della forza principale di taglio.

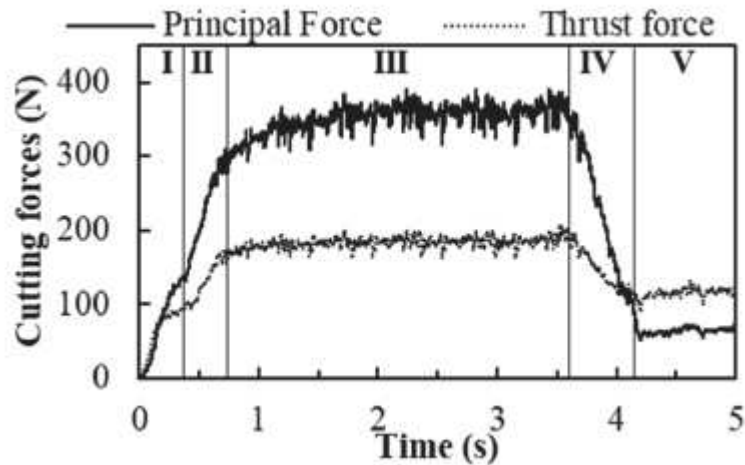


Figura 10 Forze di taglio in funzione del tempo per  $V_c = 25 \text{ m/min}$

A 100 m/min il processo si suddivide in 4 parti, le prime tre mostrano risultati analoghi mentre nella quarta fase le forze decrescono fino ad annullarsi completamente.

Inoltre, nella terza e quarta parte non si nota più il recupero della forma da parte della lega.

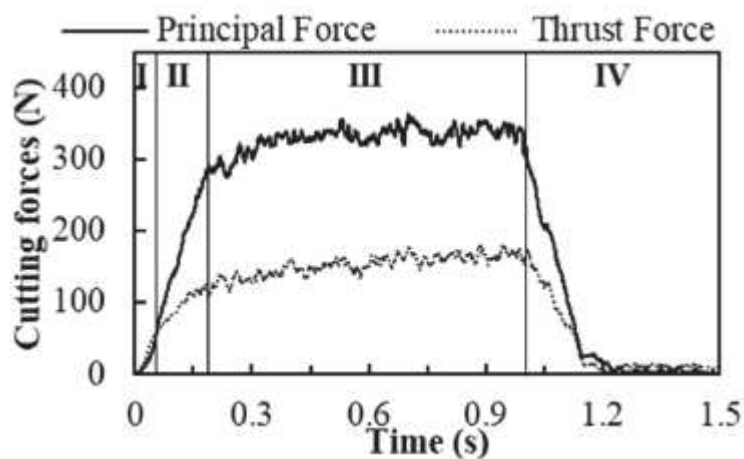


Figura 11 Forze di taglio in funzione del tempo a  $V_c = 100 \text{ m/s}$

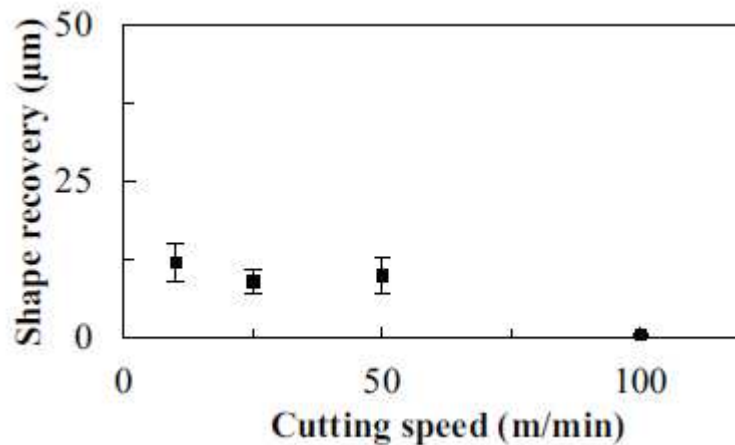


Figura 12 Recupero della forma del materiale durante la parte stabile del processo per tutte le velocità di taglio considerate

Inoltre, superati i 150 °C la trasformazione di fase non ha luogo perché viene superata la temperatura di soglia  $M_d$  (martensite desist). Quanto appena discusso comporta un incremento della finitura superficiale poiché non avviene il recupero della forma dovuto alla trasformazione di fase a 100 m/min.

I risultati ottenuti evidenziano come il processo di recupero della forma sia funzione della velocità di taglio. Infatti, a basse velocità, in corrispondenza del punto di taglio, il materiale lavorato non supera la temperatura di cambio di fase, quindi, si genera un recupero di forma attraverso l'intero processo che va a discapito della finitura superficiale dello stesso.

Con l'aumentare delle velocità di taglio, la temperatura del pezzo in lavorazione aumenta. In particolare, con il raggiungimento di una velocità di taglio pari a 100 m/min la temperatura del materiale in corrispondenza del punto di taglio supera la temperatura di soglia di cambio di fase andando ad inibire il processo di recupero di forma del materiale e ottenendo la finitura superficiale desiderata.

Lo studio si concentra sull'effetto della superelasticità sulla lavorabilità della lega confrontando i risultati ottenuti utilizzando una barra cilindrica di materiale preriscaldato e non a differenti velocità di taglio.

Il pezzo viene preriscaldato ad una temperatura di 175 °C ( $> M_d$ ), a questa temperatura è noto che viene inibito il processo di trasformazione di fase e non si ha recupero della forma del materiale.

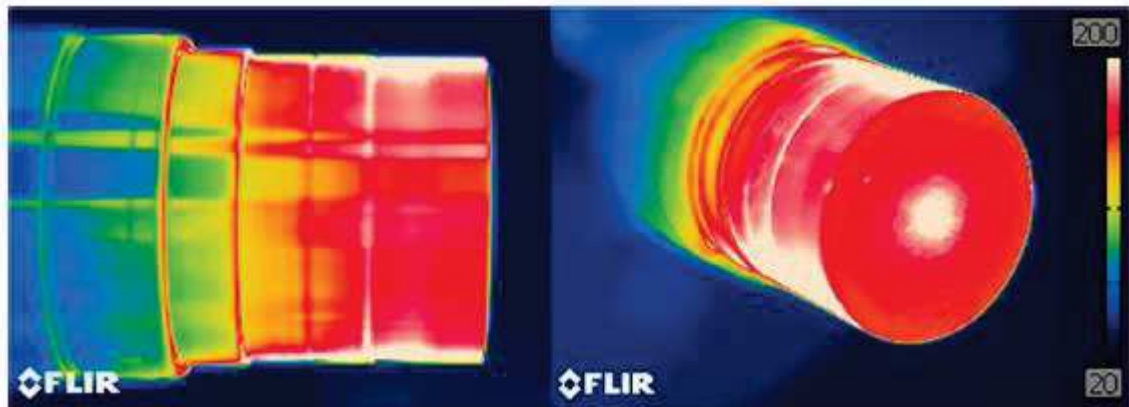


Figura 13 Immagine del pezzo in seguito al preriscaldamento visto da una camera termica

Il pezzo non preriscaldato è a temperatura ambiente,  $t_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Come si nota dalla Figura 14, incrementando la velocità di taglio si nota un incremento delle temperature sia del pezzo in lavorazione che del truciolo. In particolare, se il pezzo non è preriscaldato la  $t_{pezzo}$  aumenta da  $60,5^{\circ}\text{C}$  a  $114,1^{\circ}\text{C}$ , mentre  $t_{truciolo}$  da  $434^{\circ}\text{C}$  a  $820^{\circ}\text{C}$ . Mentre se il pezzo viene preriscaldato le temperature aumentano da  $211^{\circ}\text{C}$  a  $280^{\circ}\text{C}$  per il pezzo mentre da  $436^{\circ}\text{C}$  a  $820^{\circ}\text{C}$  per quanto riguarda il truciolo.

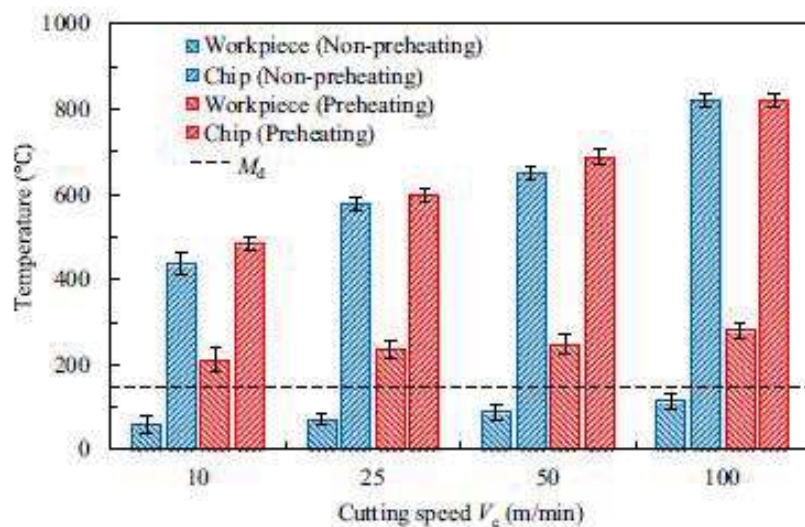


Figura 14 Variazione di temperatura del pezzo in lavorazione e del truciolo

In condizioni di materiale non preriscaldato, a qualsiasi velocità di taglio si esegue la lavorazione la temperatura del pezzo sarà sempre inferiore alla temperatura di soglia  $M_d$ , questo comporta una deformazione superelastica del materiale che può subire una trasformazione di fase.

Per eliminare questo inconveniente si preriscalda la lega in modo da ottenere una temperatura della stessa maggiore di  $M_d = 150^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura di soglia Md è funzione sia della quantità di Nickel presente nella lega che dal trattamento termico subito dalla stessa.

Un'ulteriore manifestazione del recupero di forma del materiale è la resistenza al taglio.

La Figura 15 mostra la variazione delle tre componenti della forza di taglio durante il processo a velocità differenti.

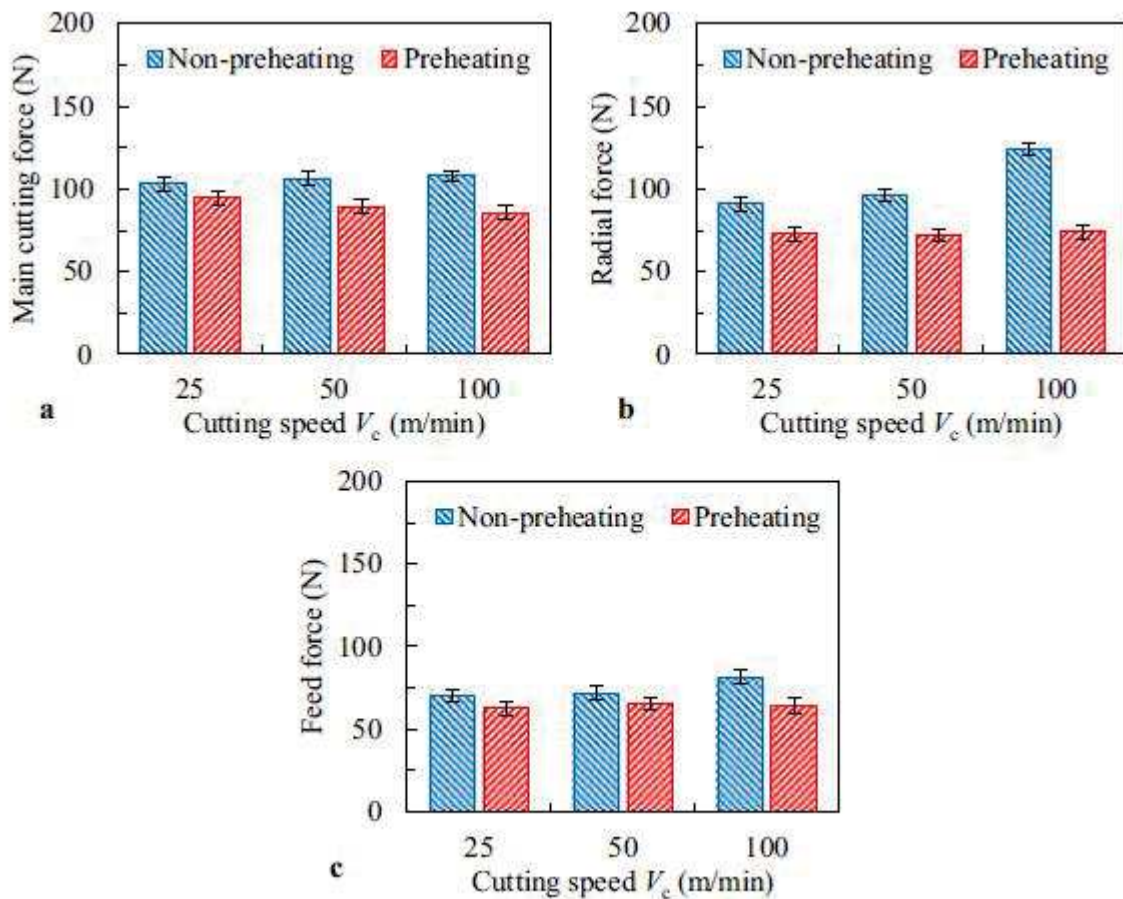


Figura 15 Variazione delle differenti componenti della forza di taglio in funzione delle diverse velocità

Si nota che con l'aumentare delle velocità di taglio le componenti della forza aumentano se in condizione di materiale non preriscaldato. Mentre se il materiale viene preriscaldato, la componente principale della forza diminuisce mentre le restanti due rimangono pressoché costanti.

Un'ulteriore manifestazione dell'effetto del recupero superelastico del materiale in lavorazione è rappresentata dall'usura utensile che influisce sulle prestazioni del processo.

La Figura 16 mostra l'usura del fianco dell'utensile da taglio in funzione del tempo di lavorazione.

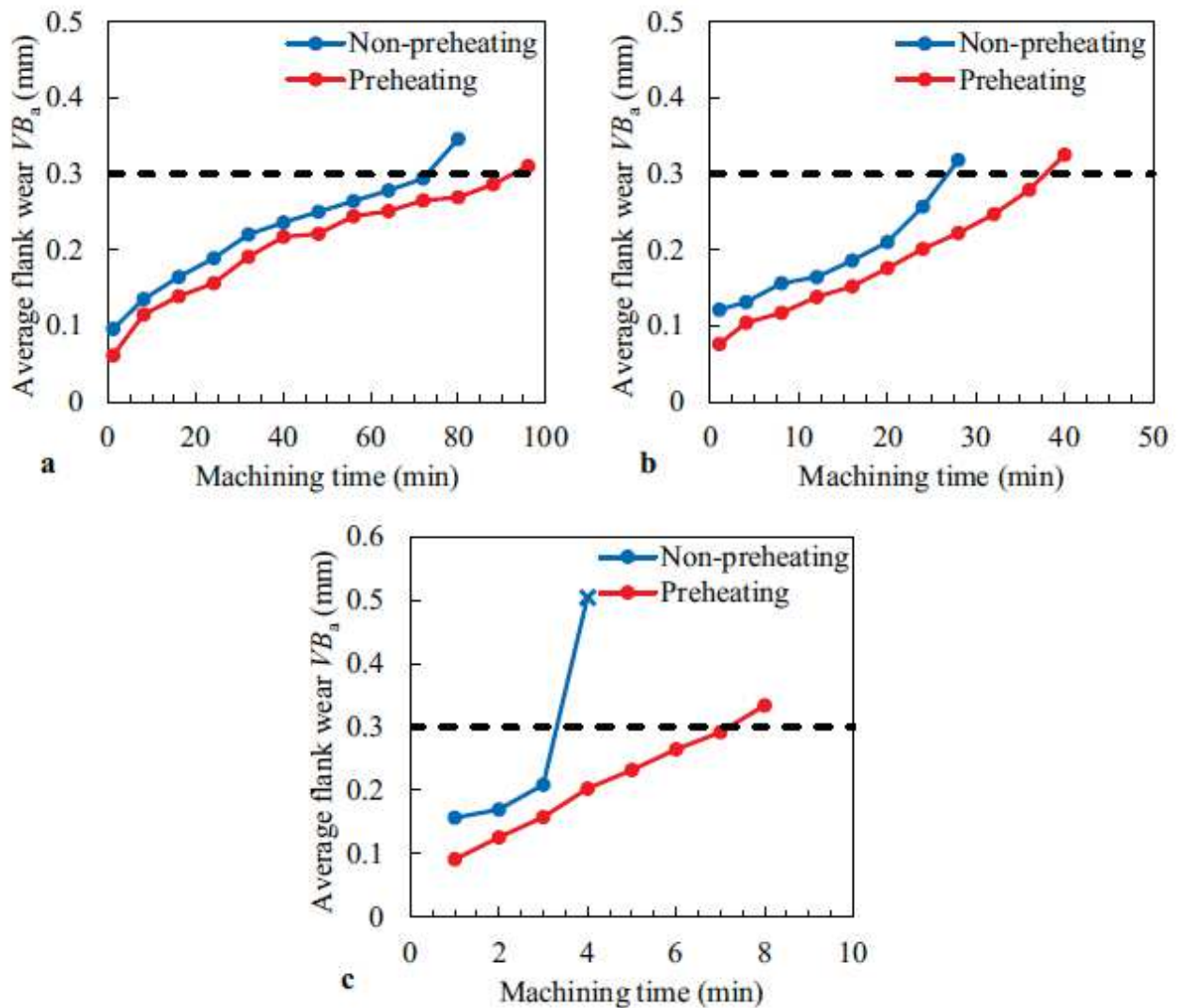


Figura 16 Usura del fianco dell'utensile A  $V_c = 25, 50, 100$  m/min

L'usura utensile cresce vertiginosamente con l'incremento delle velocità di taglio se il materiale non viene preriscaldato, altrimenti, l'usura del fianco presenta un comportamento di leggera crescita.

In entrambe le condizioni di lavoro, con l'incremento delle velocità di taglio si nota una drastica riduzione della vita dell'utensile; in condizioni di materiale preriscaldato il tempo di vita è sempre maggiore, in particolare, a velocità di taglio pari a 100 m/min si nota che se il materiale viene preriscaldato la vita dell'utensile raddoppia rispetto a quella dello stesso che lavora materiale che non subisce preriscaldamento.

Infatti, dopo 4 minuti di lavorazione, l'utensile manifesta una frattura causata da maggiori temperature del truciolo e dell'utensile e maggiori forze resistenti, mentre l'utensile non manifesta alcuna frattura se lavora materiale preriscaldato.

In conclusione, si può affermare che il recupero superelastico, dovuto ad una parziale trasformazione inversa da martensite in austenite, riduce drasticamente la vita dell'utensile da taglio, decrementa la finitura superficiale del pezzo in lavorazione e incrementa le forze di taglio.

Condizioni di lavoro ottimali si ottengono con materiale preriscaldato con velocità di taglio che variano in un range tra 25 e 50 m/min

## Lavorazione criogenica

Lo studio si concentra ora sull'identificare l'effetto della temperatura sull'usura utensile e sulle forze di taglio. Gli stessi parametri sono stati esaminati e comparati anche eseguendo la lavorazione a secco, ossia, in assenza di un fluido lubrorefrigerante e preriscaldando il materiale in lavorazione.

Per lo studio sono stati scelti i seguenti valori: avanzamento,  $f = 0,1$  mm/giro, profondità di passata,  $d = 0,5$  mm e diverse velocità di taglio 12,5, 25 e 50 m/min.

La NiTi SMA è in fase martensitica alla temperatura dell'ambiente di lavoro.

Il refrigerante criogenico utilizzato è azoto liquido ( $LN_2$ ) applicato, durante l'operazione di tornitura, ad una pressione di 1,5 MPa, come illustrato in Figura 17.

L'azoto liquido viene erogato sulla zona di interesse mediante l'utilizzo di due ugelli A e B posti rispettivamente verso il petto dell'utensile e verso il retro del portautensile in maniera tale da mandare il refrigerante sulla punta dell'utensile formando un angolo di circa  $55^\circ$  con il petto dello stesso.

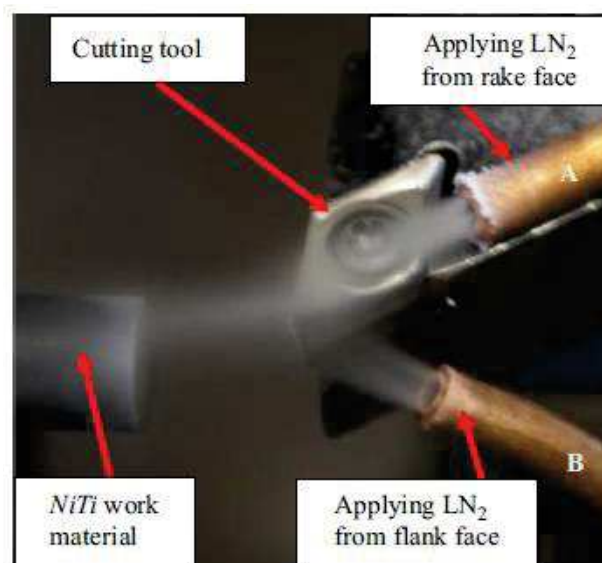


Figura 17 Sistema di erogazione dell'azoto liquido sull'utensile da taglio

Per il preriscaldamento è stata scelta la temperatura di  $175$  °C, la quale è ben sopra la temperatura di austenite finish  $A_f$  pari a circa  $109$  °C, la lega di NiTi si trova quindi in fase austenitica.

L'usura dell'utensile viene costantemente misurata utilizzando un microscopio ottico mentre le forze in gioco vengono valutate usando un dinamometro piezoelettrico.



L'usura, durante la lavorazione del Nitinol, è estremamente rapida se confrontata con quelle dovute alle lavorazioni di altri materiali ingegneristici e questo comporta una riduzione consistente della vita dell'utensile.

Tale fenomeno influenza negativamente le prestazioni della lavorazione come componenti di forza, qualità del pezzo in lavorazione e rugosità superficiale dello stesso. Per questo motivo, l'usura utensile rappresenta un indice complessivo delle prestazioni della lavorazione; il tasso di usura dell'utensile, funzione della velocità di taglio, è il parametro chiave che governa il fenomeno.

È necessario studiare e capire i meccanismi di usura per stabilire condizioni fattibili in cui questo fenomeno è facilmente controllabile. Perciò, nel seguente studio si indagherà l'usura dell'utensile a differenti velocità di taglio durante la lavorazione di una NiTi SMA.

La Figura 10 illustra l'usura dell'utensile da taglio, in corrispondenza del naso, in differenti condizioni di lavoro, ossia, lavorazione a secco, pezzo in lavorazione preriscaldato e raffreddamento criogenico dell'utensile e a differenti velocità di taglio.

Alla velocità di 12,5 m/min, l'usura sembra bassa e ragionevole in tutti e tre i casi presi in esame.

Tuttavia, l'incremento della velocità di taglio comporta un significativo innalzamento dell'usura sia nella condizione di lavorazione a secco che con il pezzo preriscaldato se vengono confrontate con la lavorazione criogenica.

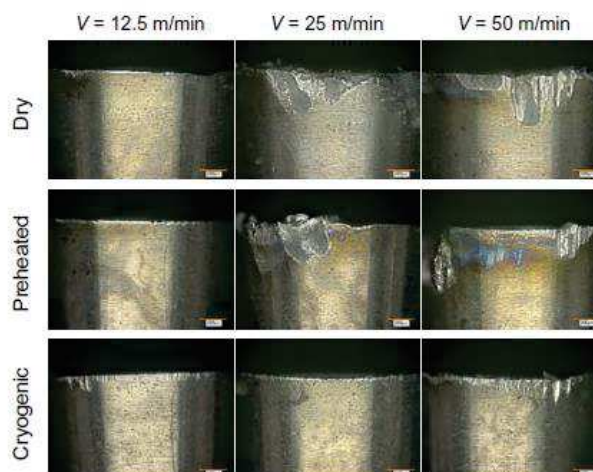


Figura 18 Usura dell'utensile ottenuta facendo variare le velocità di taglio

Come illustrato nella Figura 18, l'usura, valutata sia sul petto che sul fianco dell'utensile da taglio, risulta essere predominante sul petto dello stesso, mentre la regione in cui si verifica maggior usura si trova all'altezza della profondità di passata

Viene misurata l'usura del petto e del fianco per ognuna tra le lavorazioni prese in esame. La massima usura dell'utensile viene illustrata nella Figura 11, dove risulta evidente una sostanziale differenza tra le differenti condizioni di lavorazione.

In particolare, a velocità di taglio più elevata, la lavorazione criogenica riduce in maniera significativa l'usura del petto se comparata con le condizioni di lavoro sta a secco e preriscaldato.

Tuttavia, si nota che alla velocità di taglio più bassa, ossia a 12,5 m/min, la lavorazione criogenica produce una maggior usura del petto rispetto alle altre considerate.

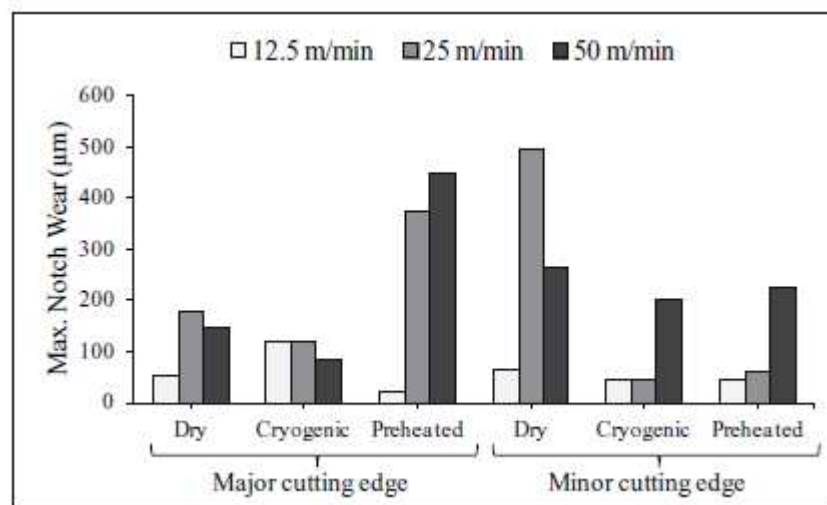


Figura 19 Confronto dell'usura del petto con differenti velocità di taglio e condizioni di lavoro

Durante il processo, sono stati osservati numerosi meccanismi di usura quali usura adesiva, usura abrasiva, microfessurazioni, fatica e deformazione plastica. Il meccanismo di usura predominante dipende dalle condizioni di taglio, dell'utensile e dai materiali del pezzo in lavorazione.

I meccanismi di usura generalmente osservati durante la lavorazione delle leghe a base di Ni e Ti utilizzando un utensile in carburo sono adesione e abrasione.

La Figura 12 mostra un'immagine in tre dimensioni di un utensile usurato alla velocità di taglio pari a 50 m/min. Si notano tre differenti meccanismi di usura. L'usura abrasiva è evidente in tutte e tre le condizioni, infatti, sono presenti profondi solchi osservati sul fianco dell'utensile da taglio indicatori di questo specifico meccanismo.

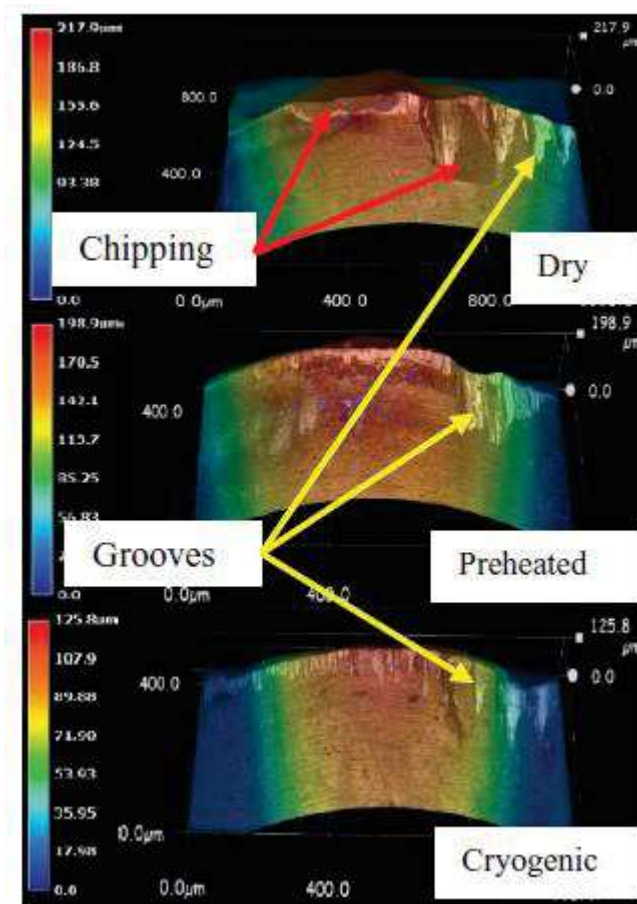


Figura 20 Modelli di usura osservati sul fianco dell'utensile in differenti condizioni di lavoro a 50 m/min

Si osserva che le fessurazioni ottenute lavorando in condizioni di secco e preriscaldando il materiale da lavoro non si notano durante la lavorazione criogenica.

Durante la lavorazione, vengono misurate tre diverse componenti della forza, la forza di taglio  $F_c$  (main cutting force), la forza di avanzamento  $F_t$  (feed force) e una forza di repulsione  $F_r$  (radial force) che tende ad allontanare il pezzo in lavorazione

Tali componenti (forza di taglio principale, forza d'avanzamento e forza radiale) sono importanti indicatori delle prestazioni della lavorazione. Infatti, più le componenti della forza, e quindi la forza in generale, sono alte minore è la lavorabilità. Per questo motivo, determinare l'andamento della forza di taglio influenzata dai parametri della lavorazione e dalle condizioni di lavoro (materiale preriscaldato o raffreddamento criogenico) è molto utile per comprendere i meccanismi di taglio del materiale da lavoro.

La lubrificazione svolge un ruolo molto importante, infatti, può avvicinarsi molto alle interfacce tra utensile e truciolo e utensile e pezzo in lavorazione, in particolare alle aree di contatto in cui avviene lo strisciamento.

La lubrificazione è interessante anche in ottica di riduzione di attrito e adesione tra utensile e truciolo e/o pezzo in lavorazione, i quali si traducono in una riduzione delle componenti della forza richiesta per eseguire la lavorazione che aumentano la lavorabilità della lega [1, 2].

Alcuni studi enfatizzano come il raffreddamento criogenico riduce l'attrito tra utensile da taglio e truciolo [3].

Tuttavia, i risultati sperimentali mostrano come il raffreddamento criogenico riduce la temperatura alla quale avviene il taglio ottenendo un materiale lavorato più duro che si traduce in un incremento delle componenti della forza della lavorazione [4].

Invece, altri studi affermano che la lavorazione criogenica riduce alcune componenti della forza [5, 6].

Il presente studio esamina le differenti forze di taglio in funzione delle diverse velocità di lavorazione in differenti condizioni di lavoro (in assenza di lubrorefrigerazione, materiale da lavorare preriscaldato e lavorazione criogenica). L'effetto della velocità di taglio sulle componenti della forza è evidente in tutte e tre le condizioni.

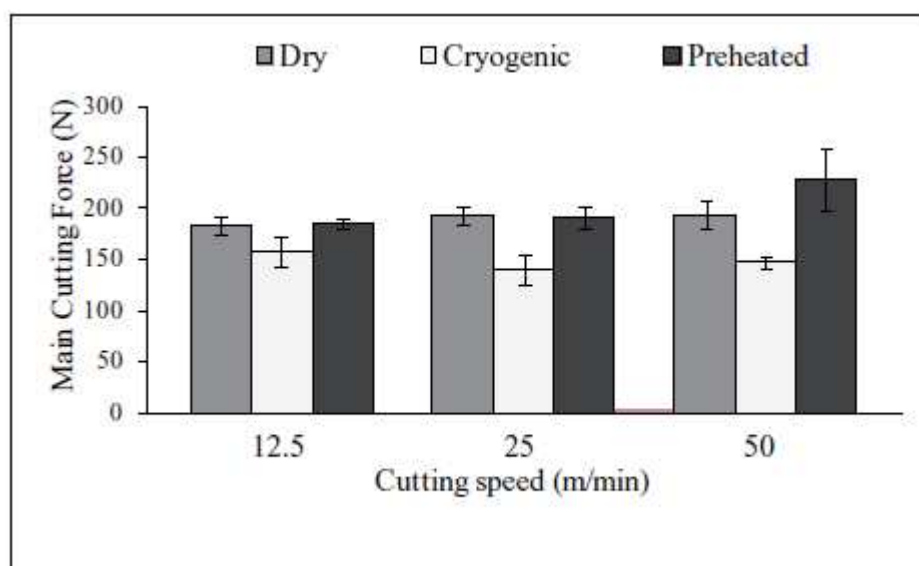


Figura 11 Variazione della forza principale di taglio con velocità di taglio e condizioni di lavoro diverse ( $f=0,1$  mm/rev,  $d=0,5$  mm)

La Figura 21 mostra i dati registrati per la forza di taglio  $F_c$  sotto le diverse condizioni al variare della velocità di taglio.

In assenza di lubrorefrigerazione quindi lavorando a secco, la forza principale è leggermente influenzata dalla velocità di taglio mostrando un andamento crescente.

Anche durante la lavorazione dei campioni di materiale preriscaldato si registra un andamento crescente della forza principale di taglio  $F_c$ .

Tuttavia, nella lavorazione criogenica si osserva una decrescita della forza principale di taglio man mano che si aumenta la velocità di taglio.

Andamenti simili si registrano durante la lavorazione a secco e materiale preriscaldato per quanto concerne la forza radiale  $F_r$  e la forza di avanzamento  $F_t$ , come mostrato in Figura 22 e Figura 23.

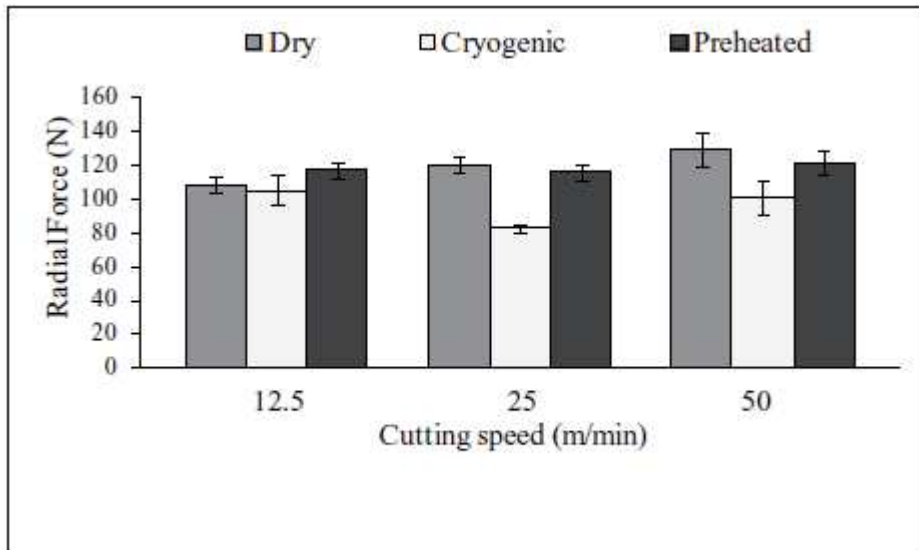


Figura 22 Variazione della forza radiale di taglio con velocità di taglio e condizioni di lavoro diverse ( $f=0,1$  mm/rev,  $d=0,5$  mm)

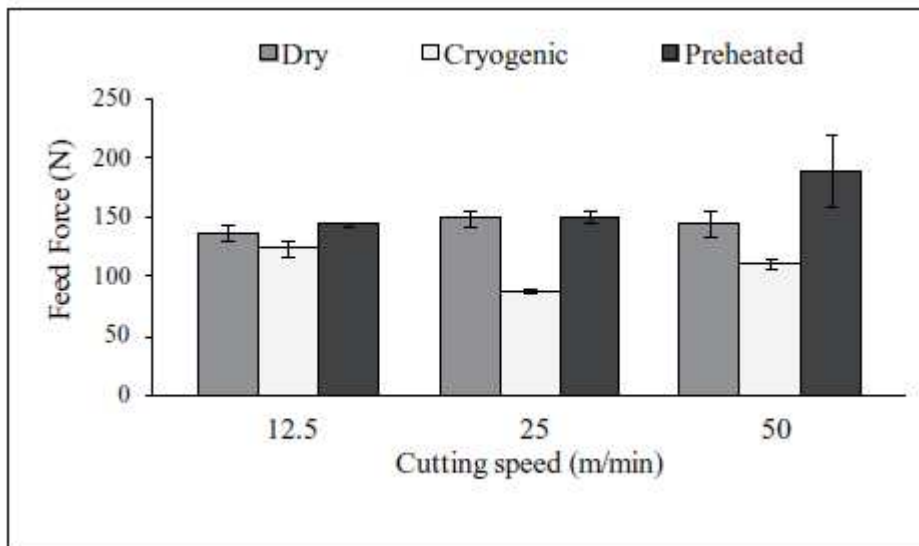


Figura 23 Variazione della forza di avanzamento di taglio con velocità di taglio e condizioni di lavoro diverse ( $f=0,1$  mm/rev,  $d=0,5$  mm)

Nella lavorazione criogenica, le componenti radiali a d'avanzamento della forza aumentano leggermente alla velocità di taglio di 50 m/min se confrontate con la velocità di 25 m/min.

L'incremento delle componenti della forza a seguito dell'aumento della velocità è da attribuirsi al crescere dell'usura utensile. Oltre all'effetto della velocità di taglio si nota una significativa influenza sulle componenti della forza anche da parte delle differenti condizioni di lavorazione.

In particolare, la lavorazione criogenica, se considerata entro determinate condizioni di taglio, genera sempre componenti della forza inferiori rispetto alla lavorazione a secco e con materiale preriscaldato.

Per la lavorazione con campioni di materiale preriscaldato sono stati ottenuti dei risultati interessanti.

Infatti, questa lavorazione genera sempre componenti della forza maggiori rispetto alle altre prese in esame. Poiché vi è una significativa differenza di temperatura tra la lavorazione criogenica e quella con preriscaldamento è necessario studiare lo spessore del truciolo per identificare se la risposta del materiale alla variazione di temperatura influenza l'andamento della forza generata durante la lavorazione.

La Figura 24 mostra i trucioli formati nelle diverse condizioni alla velocità di taglio pari a 12,5 m/min.

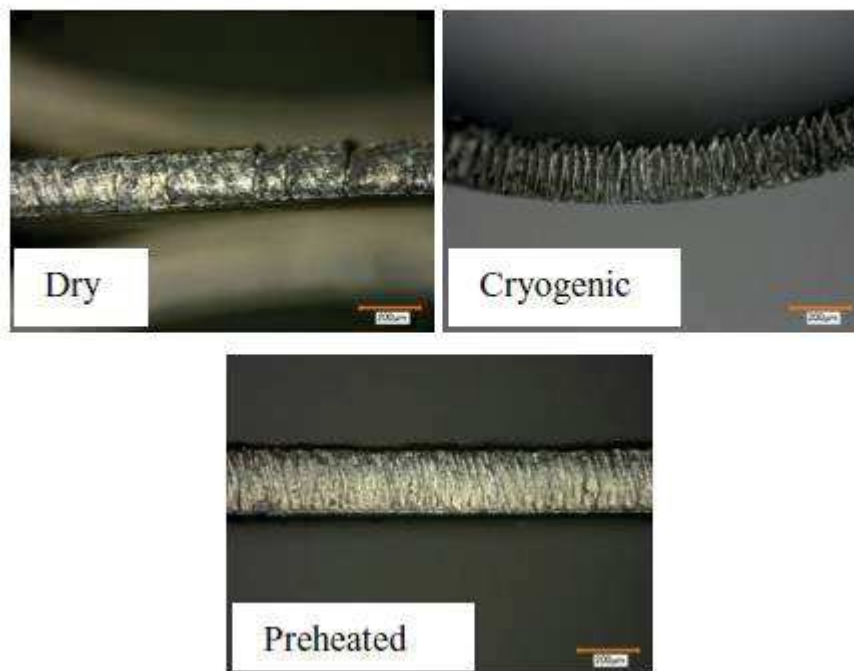


Figura 24 Trucioli generati sotto differenti condizioni di lavoro ( $V = 12,5$  m/min,  $f=0,1$  mm/rev)

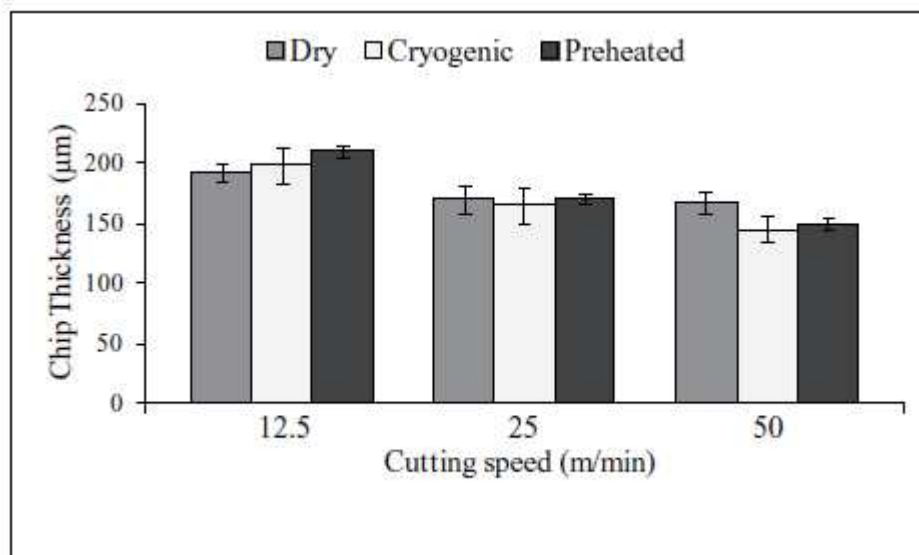


Figura 25 Variazione dello spessore del truciolo con differenti velocità di taglio e condizioni di lavoro ( $f=0,1$  mm/rev,  $d=0,5$  mm)

Lo spessore del truciolo misura come funzione della velocità di taglio è illustrato in Figura 25. Si nota come le differenti condizioni di lavoro non alterano significativamente lo spessore del truciolo.

Inoltre, l'effetto della velocità di taglio sulla variazione dello spessore del truciolo ha un evidente andamento decrescente, coerente con altri materiali ingegneristici.

Il controllo della trasformazione di fase gioca un ruolo fondamentale nel migliorare le prestazioni della lavorazione delle NiTi SMA. Quanto appena detto si esprime in un controllo sia della temperatura del materiale in lavorazione sia della temperatura di taglio che influenzano la tensione di snervamento del materiale stesso.

La temperatura preferibile per lavorare le NiTi SMA è quella appena sotto la temperatura di austenite start  $A_s$ , dove la tensione di snervamento del materiale è minimo [7]. Quando la temperatura supera quella di austenite finish ( $A_f$ ), la tensione di snervamento aumenta notevolmente [7].

Duttilità e la fragilità dipendono dalla fase in cui si trova la lega e sono punti chiave utili nell'interpretare i dati sperimentali.

Una tensione di flusso più bassa e una temperatura minore durante la lavorazione criogenica consentono una deformazione del materiale più semplice riducendo l'usura dell'utensile in maniera significativa. Invece, le lavorazioni a secco e preriscaldata promuovono la formazione della fase austenitica in cui la tensione di snervamento è molto più alta causando dunque un incremento dell'usura utensile.

Si passa ora ad esaminare le componenti della forza ottenute. Come illustrato precedentemente, il preriscaldamento del campione da taglio riduce le componenti della forza a causa di una tensione di flusso minore [8, 9].

Tuttavia, in contrasto con precedenti studi [8, 9], nel caso preso in esame le condizioni di preriscaldamento incrementano significativamente non solo le componenti della forza bensì anche l'usura utensile.

Oltre ai parametri di taglio e alle condizioni di lavoro, la trasformazione di fase allo stato solido ha un effetto significativo sulle prestazioni della lavorazione quali usura utensile e forza da taglio delle NiTi SMA.



## Bibliografia

<https://www.techmec.it/leghe-a-memoria-di-forma/>

<https://www.nanolab.unimore.it/wp-content/uploads/2012/06/niti-background-reading.pdf>

Machining of NiTi based shape memory alloys - K. Weinert, V. Petzoldt

Turning and Drilling of NiTi Shape Memory Alloys - K. Weinert, V. Petzoldt, D. Kotter - Department of Machining Technology - University of Dortmund, Germany

Analysis of Tool-wear and Cutting Force Components in Dry, Preheated, and Cryogenic Machining of *NiTi* Shape Memory Alloys - Y. Kaynaka, H.E. Karacab, R.D. Noebec, I.S. Jawahird

Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloys – Yuebin Guo, Andrea Klink, Chenhao Fu, John Snyder

A Concise Review on Machinability of NiTi Shape Memory Alloys - Barsharani Dasha, Manojit Dasa, Monalisa Dasb, Trupti R Mahapatraa, Debadutta Mishraa

Investigation of high speed cutting performance and phase transformation behavior of NiTi shape memory alloys - Eren Kaya, İrfan Kaya

Effect of Cutting Speed on Shape Recovery of Work Material in Cutting Process of Super-Elastic NiTi Alloy Hao – Yang, Katsuhiko Sakai, Hiroo Shizuka, Yuji Kurebayashi, Kunio Hayakawa and Tetsuo Nagare

Investigation of high speed cutting performance and phase transformation behavior of NiTi shape memory alloys - Eren Kaya1 · İrfan Kaya1

[1] Ezugwu, E.O., Bonney, J., Yamane, Y., 2003. An overview of the machinability of aeroengine alloys, *J Mater Process Tech* 134, p.233-53.

[2] Marksberry, P., Jawahir, I.S., 2008. A comprehensive toolwear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48, p.878-86.

[3/4] Hong, S.Y., Ding, Y.H., Jeong, W., 2001. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *Int J Mach Tool Manu* 41, p.2271-85.

- [5] Bermingham, M.J., Kirsch, J., Sun, S., Palanisamy, S., Dargusch, M.S., 2011. New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V, *Int J Mach Tool Manu* 51, p.500-11.
- [6] Pu, Z., Quteiro, J.C., Batista, A.C., Dillon, O.W., Puleo, D.A., Jawahir, I.S., 2012. Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components, *Int J Mach Tool Manu* 56, p.17-27.
- [7] Benafan, O., Noebe, R.D., Padula II, S.A., Gaydos, D.J., Lerch, B.A., Garg, A., Bigelow, G.S., An, K., Vaidyanathan, R., 2013. Temperature dependent behavior of a polycrystalline NiTi shape memory alloy around the transformation regime, *Scripta Mater* 68, p.571-574.
- [8] Rahman, R. R., Sun, S., Wang, G., Dargusch, M., 2012. An investigation of Cutting forces and Cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al Beta Titanium alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 63, p.58-69.
- [9] Attia, H., Tavakoli, S., Vargas, R., Thomson, V., 2010. Laserassisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions, *CIRP Ann-Manuf Technol* 59, p.83-8.