



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

**TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DEI
PROCESSI INDUSTRIALI E DEI MATERIALI**

(Laurea Triennale DM 270 – Indirizzo Materiali)

**VALUTAZIONE DELLA MACHINABILITY DELLA LEGA
NIMONIC 263, INFLUENZA SUL TRUCIOLO E SULLA
SUPERFICIE DEI PARAMETRI DI TAGLIO**

Relatore: Prof. Andrea Zambon

Coordinatore aziendale: Davide Busato

Laureando: ALEX PERSICO

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Indice

| | |
|---|----|
| INTRODUZIONE | 1 |
| CAPITOLO 1 -L'Azienda | 3 |
| CAPITOLO 2 – Lavorazione della lega Nimonic 263 | 5 |
| 2.1 ANELLO IN NIMONIC 263..... | 5 |
| 2.2 FASI DI LAVORO..... | 9 |
| 2.2.1 Forgiatura..... | 9 |
| 2.2.2 Trattamento termico..... | 10 |
| 2.2.3 Lavorazioni meccaniche..... | 11 |
| CAPITOLO 3 – Machinability e controllo truciolo | 15 |
| 3.1 TRUCIOLABILITA'..... | 15 |
| 3.1.1 Forze di taglio..... | 16 |
| 3.1.2 Spessore del truciolo..... | 16 |
| 3.1.3 Fattore di ricalcamento..... | 17 |
| 3.1.4 Angolo di scorrimento..... | 17 |
| 3.1.5 Analisi per diffrazione di raggi x..... | 19 |
| 3.1.6 Microstruttura e orientazione dei grani nel truciolo..... | 19 |
| 3.2 MICRODUREZZE..... | 20 |
| 3.2.1 Preparazione del provino..... | 20 |
| 3.2.2 Prove di micro-durezza..... | 21 |
| CAPITOLO 4 – Rugosità superficiale | 25 |
| 4.1 RUGOSITA'..... | 25 |
| 4.2 MISURAZIONE DELLA RUGOSITA'..... | 27 |
| 4.3 RUGOSIMETRO..... | 28 |
| 4.4 DETERMINAZIONE DELLA RUGOSITA'..... | 28 |
| 4.5 RUGOSITA' RISCONTRATA..... | 30 |
| CAPITOLO 5 – Usura inserti | 33 |
| 5.1 USURA SUL FIANCO..... | 33 |
| 5.2 TAGLIENTE DI RIPORTO..... | 34 |
| 5.3 ESPERIENZA..... | 35 |
| CAPITOLO 6 – Produttività-equazione di Taylor | 37 |
| 6.1 CRITERIO DI MINIMO COSTO..... | 37 |
| 6.2 DURATA DEL TAGLIENTE – RELAZIONE DI TAYLOR..... | 39 |
| 6.3 CRITERIO DI MASSIMA PRODUTTIVITA'..... | 40 |
| 6.4 ESPERIENZA..... | 43 |
| CONCLUSIONI | 46 |
| RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | |

Introduzione

Nel campo della produzione di turbine per la produzione di energia, la ricerca e lo sviluppo volgono lo sguardo verso l'utilizzo di nuovi materiali in grado di sopportare temperature sempre maggiori, infatti il rendimento del processo di combustione che è di circa il 30% riesce ad essere migliorato di qualche punto percentuale aumentando la temperatura di alcuni gradi centigradi. Lo sviluppo di queste nuove leghe, di cui prende parte anche la super lega al Nichel Nimonic263, oggetto di interesse in questa trattazione, costringono ad una nuova pianificazione dell'organizzazione del lavoro, poiché le caratteristiche proprietà meccaniche di durezza e resistenza, e termiche di bassa conducibilità ne sfavoriscono la lavorazione.

La particolare forma, accuratezza dimensionale e tolleranze geometriche richieste, come in questo caso ma anche in generale, possono essere ottenute solamente mediante lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo. I vincoli tecnologici di questa tecnica sono rappresentati dai parametri di taglio e dalla scelta dell'insero. È quindi necessario adottare i parametri ottimali e la scelta dell'insero coerente con il tipo di lavorazione al fine di migliorare la lavorazione ed adottare la miglior strategia economica.

L'attività di tirocinio svolta presso Asfo riguarda l'acquisizione dei dati e lo sviluppo di nuove strategie durante le lavorazioni meccaniche al tornio di tre anelli realizzati in una super lega al Nichel, Nimonic 263. I risultati ottenuti servono a migliorare il ciclo produttivo dei successivi 40 anelli.

Nel primo capitolo viene presentato il materiale che costituisce il prodotto finito, la composizione e le diverse proprietà fisiche e chimiche che possiede. Segue poi la spiegazione delle diverse fasi di lavoro che precedono le lavorazioni meccaniche, ponendo poi l'attenzione proprio su quest'ultime.

Nel secondo capitolo vengono fornite alcune nozioni fondamentali per quanto riguarda la lavorabilità del materiale, come avviene l'asportazione del truciolo e i diversi fattori che lo caratterizzano; il capitolo si concentra poi sulle prove di micro-durezza eseguite sui trucioli prodotti durante la lavorazione.

Il terzo capitolo riguarda la rugosità superficiale: cosa si intende con questo termine, come avviene la misurazione, i fattori che ne determinano il grado e le prove eseguite sul materiale in esame.

Nel quarto capitolo vengono presentati brevemente due tipi di usura riscontrati durante la lavorazione: il labbro di usura ed il tagliente di riporto.

Infine, nel quinto ed ultimo capitolo, si pone l'attenzione sull'economicità e produttività della lavorazione. Dopo una breve presentazione dei diversi parametri di cui bisogna tener presente durante questa analisi, vengono esposte le prove eseguite per trovare la relazione che intercorre tra velocità e tempo di contatto dell'inserito per questo tipo di materiale.

Le conclusioni riassumo i risultati riscontrati e costituiscono il punto di partenza per le lavorazioni successive.

Capitolo 1

Presentazione dell'azienda

ASFO s.p.a si occupa della produzione di anelli forgiati e laminati in acciaio e leghe non ferrose, utilizzati principalmente nel settore del Power Generation, dell'Oil & Gas e della meccanica in generale. Fa parte del gruppo Fomas, gruppo leader nei forgiati e laminati a livello mondiale, e costituisce con i suoi due stabilimenti e quasi 350 persone la *Large Ring Division*. La produzione prevede la lavorazione di anelli da un diametro interno minimo di 100mm, fino ad un diametro esterno massimo di 7000 mm per un peso di 15 tonnellate.

ASFO (Acciai Speciali Forgiati) nasce a Chiuppano (VI) nel 1969, rilevando una precedente realtà locale F.A.L.G. e nel 2004 espande i propri reparti nella proprietà a Villamarzana (RO) inizialmente con un officina meccanica e successivamente con un reparto per la lavorazione a caldo. Fra i due stabilimenti sono presenti tre linee di lavorazione a caldo dotate di pressa e laminatoio, 30 forni forgia, una linea automatica per i trattamenti termici, e 22 macchine utensili, il tutto contornato dai reparti di controllo dimensionale, di controlli non distruttivi e laboratori metallurgici e tecnologici.

Asfo riesce così a garantire la gestione interna di tutte le fasi di produzione, dall'acquisto della materia prima al prodotto finito pronto all'assemblaggio, eseguendo tutte le certificazioni richieste dal mercato.

L'azienda è molto flessibile anche per quanto riguarda la varietà di materiali che lavora, che comprende: acciai al carbonio, acciai microlegati e legati, acciai induriti per precipitazione, acciai resistenti alle alte temperature, acciai per applicazioni criogeniche, acciai inossidabili, duplex, super leghe a base Nichel, a base Titatio e Rame.

Capitolo 2

Lavorazione della lega Nimonic 263

L'anello in Nimonic 263 (Figura 2.1), oggetto di interesse della trattazione, costituisce un elemento interno di una turbina a gas per la produzione di energia, situato nella parte terminale, è responsabile del direccionamento dei gas combusti. Le particolari proprietà fisiche e chimiche possedute dalla lega sono idonee per l'utilizzo in condizioni critiche di esercizio e vengono di seguito esposte.

Successivamente viene presentato sommariamente il processo produttivo, che termina con le lavorazioni meccaniche ed è proprio su quest'ultime che viene concentrata l'attenzione.



Figura 2.1 Anello in lega Nimonic 263 finito.

2.1 Anello in Nimonic 263

Il prodotto finito costituisce un componente di una turbina a gas per la generazione di energia. Situato nella zona successiva al comparto rotorico della turbina (quando è già avvenuta la combustione) è responsabile del direccionamento e contenimento dei gas combusti. L'anello costituisce uno scudo termico e opera come valvola per il rilascio dei gas, ciò è ottenuto mediante un pacco lamellare montato all'interno dell'anello, tenuto in battuta contro un altro componente della turbina grazie a delle molle, le quali cedono e lasciano passare il gas ogniqualvolta la pressione risulta sufficiente.

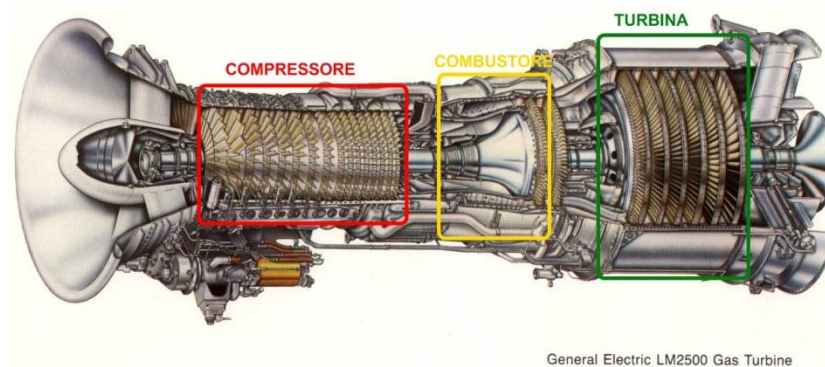


Figura 2.2 Turbina a gas per la produzione di energia elettrica.

A causa dell'elevata pressione dei gas e delle elevate temperature presenti, i diversi componenti meccanici che operano in questa zona della turbina devono essere realizzati con materiali tali da sopportare elevati sforzi meccanici, creep, shock termici ed essere chimicamente stabili e resistenti all'ossidazione. Le super leghe al Nichel rispondono bene a questi requisiti e fanno parte della famiglia delle super leghe resistenti al calore HRSA (heat resistant super alloy) insieme alle leghe a base di ferro e a base di Cobalto. Le prime, ricavate da acciai inossidabili austenitici dopo diverse lavorazioni, sono particolarmente adatte per la realizzazione di alberi, anelli e tubi di rivestimento, pur presentando minor resistenza meccanica a caldo rispetto agli altri due gruppi. Le leghe a base di Cobalto mostrano una resistenza alla corrosione a caldo superiore alle alte temperature rispetto alle leghe al Nichel. Esse sono però anche più costose ed il loro uso è limitato alle parti dove avviene la combustione nelle zone più calde del motore.

Anche all'interno di uno stesso gruppo i materiali reagiscono in modo diverso alle sollecitazioni fisiche e chimiche, e lo stesso trattamento termico influisce sulla durezza del componente e quindi sui diversi meccanismi di usura che si possono verificare durante la lavorazione.

Le superleghe a base Nichel sono le più complesse e le più utilizzate per gli elementi che lavorano ad alta temperatura. Il loro uso si estende fino a temperature impensabili per i più comuni sistemi di leghe e costituiscono per esempio più del 50% dei componenti di motori nei più avanzati aerei oggi in commercio.

La superlega al Nichel identificata con il nome di Nimonic 263 presenta la composizione chimica rappresentata in tabella :

Tabella 2.1 Composizione percentuale in peso del Nimonic 263

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|--------|--------|------|------|------|------|-------|-------|
| Ni | Cr | Co | Mo | Ti | Al | Fe | Mn | C | Si |
| balance | 20.5 | 20 | 5.93 | 2.20 | 0.57 | 0.45 | 0.19 | 0.060 | 0.060 |
| B | Cu | P | S | | | | | | |
| 0.002 | <0.01 | <0.005 | <0.002 | | | | | | |

Le fasi più importanti che possono essere presenti nelle leghe a base Nichel sono:

- Matrice gamma (γ). Si tratta della matrice a struttura cristallina cubica a facce centrate (CFC) che può contenere un'alta percentuale di elementi in soluzione come cobalto, ferro, molibdeno e tungsteno.

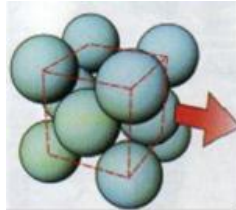


Figura 2.3 Distribuzione atomica di una struttura cubica a facce centrate

- Gamma primo (γ'). Alluminio e titanio sono aggiunti in quantità tale da far precipitare la fase CFC γ' (Ni_3Al , Ti), che è coerente con la matrice gamma austenitica.
- Gamma seconda (γ''). La combinazione di Nichel e Niobio, in presenza di ferro, forma una struttura CCC (cubica a corpo centrato) di Ni_3Nb , il quale è coerente con la matrice gamma, sebbene induca grandi deformazioni nelle zone di bordo fase. Tale fase garantisce ottime proprietà resistenziali a basse e medie temperature ma è instabile sopra gli 815°C .
- Carburi. Il carbonio aggiunto in percentuali variabili tra 0.05 e 0.2% in peso si combina con altri elementi reattivi quali titanio, niobio e tantalio per formare carburi (MC). Durante il trattamento termico e anche durante l'utilizzo dei componenti realizzati con tali leghe, i carburi suddetti tendono a trasformarsi in M_{23}C_6 e/o M_6C , che precipitano a bordo grano. In tale posizione essi hanno un effetto benefico per quanto riguarda il mantenimento delle proprietà ad alta temperatura ostacolando lo scorrimento dei piani ed aumentando la resistenza a creep.

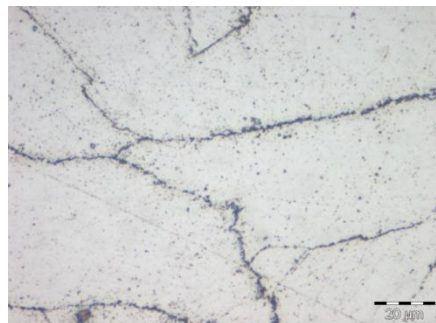


Figura 2.4 Micrografia dei grani della lega nimonic 263 allo stato invecchiato: ingrandimento 50x, attaccata con glicerina per 45 secondi.

Tabella 2.2 *Proprietà fisiche del Nichel.*

| Nichel Proprietà | |
|------------------------------|----------------------------|
| Proprietà fisiche | |
| Numero Atomico | 28 |
| Massa atomica | 58,6943 kg/kmol |
| Densità a 20°C | 8,90 kg/dm ³ |
| Temperatura di fusione | 1453 °C |
| Coeff.di dilataz.lineare | 13,1 10 ⁻⁶ 1/K |
| Resistività elettrica a 20°C | 6,4 10 ⁻⁸ ohm m |

L'aggiunta di certi elementi in soluzione nella matrice cubica a facce centrate γ contribuisce ad ottenere resistenza alle più severe condizioni di temperatura e durata di utilizzo del componente. Alcune superleghe possono essere usate anche a 0.85 Tm (temperatura di fusione) e per tempi superiori alle 100.000 ore a temperature elevate. Tali condizioni possono essere sopportate in quanto:

- L'aggiunta di cromo comporta la formazione di uno strato superficiale di Cr_2O_3 , che garantisce una bassa diffusione degli elementi metallici verso l'esterno e di elementi ossigeno, azoto e zolfo verso l'interno;
- La tendenza a formare ad alta temperatura Al_2O_3 comporta un'eccezionale resistenza all'ossidazione.

La gamma primo è il composto intermetallico Ni_3Al , stabile solo in un intervallo ristretto di composizione; esso precipita come particelle sferoidali nelle leghe semplici del Nichel e con una bassa frazione volumetrica rispetto alla matrice, mentre nelle leghe ad alto contenuto di Al e Ti si trova sotto forma di precipitati cuboidali.

Diversamente dalla γ' , che causa disordine reticolare, la γ'' aumenta la resistenza del materiale per un'alta coerenza di deformazione nel reticolo.

I carburi svolgono funzioni diverse nelle superleghe. In primo luogo essi precipitano a bordo grano nel caso di leghe al Nichel mentre nelle superleghe a base cobalto e base ferro occupano sia i siti inter-granulari che posizioni all'interno del grano stesso. Inizialmente si riteneva che tali carburi a bordo grano potessero diminuire la duttilità del materiale, ma ora si è visto che esercitano anche un effetto benefico per quel che riguarda il mantenimento delle proprietà ad alta temperatura. I carburi più comuni presenti nelle leghe a base Nichel sono del tipo MC, M_{23}C_6 e M_6C .

Le proprietà meccaniche e termiche che distinguono questo tipo di lega sono ottenute mediante trattamento termico di invecchiamento, attraverso il quale avviene la precipitazione

della fase gamma primo e dei carburi. Grazie all'elevata temperatura è resa possibile la diffusione atomica che favorisce i successivi fenomeni di precipitazione e coalescenza. Programmando accuratamente il ciclo termico del materiale all'interno del forno è possibile ottenere il numero e la grandezza dei grani ottimali per ostacolare lo scorrimento dei piani.

2.2 Fasi di lavoro

2.2.1 Forgiatura

Il ciclo di realizzazione del componente in studio avviene tramite il processo a caldo della Forgiatura e successiva laminazione. Con il termine *forgiatura* si indica una famiglia di processi impiegati per la realizzazione di componenti nei quali la deformazione plastica ad alta temperatura avviene per l'applicazione di compressione mediante l'utilizzo di stampi e/o utensili vari. La pressa idraulica utilizzata per quest'esperienza, è capace di generare una forza di 4500 tonnellate ed è dotata di stazione di foratura e tranciatura in automatico. Le prime fasi di lavoro hanno l'obiettivo di ricavare la "*formaggella*" termine che identifica il passaggio del lingotto fuso in elemento ridotto a caldo tramite operazioni di pressatura. Poiché durante la deformazione plastica il volume del cilindro rimane costante, ogni riduzione di altezza è seguita da un incremento di diametro (Figura 2.5)

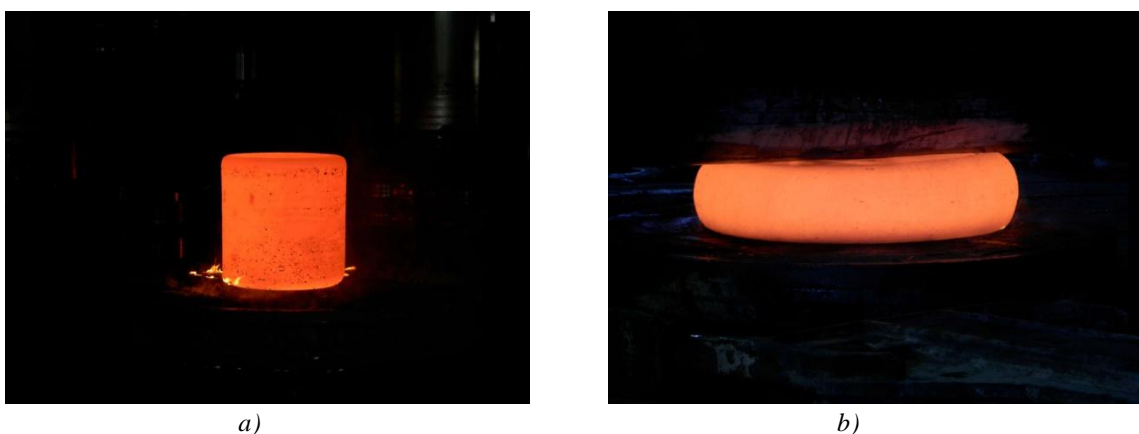


Figura 2.5 Processo di forgia: a) billetta cilindrica indeformata; b) materiale deformato dopo ripetute azioni di riscaldamento e compressione mediante la pressa.

Il foro centrale è ottenuto mediante una spina, utilizzando della specifica attrezzatura predisposta nell'impianto. Seguono le fasi di mandrinatura e laminazione le quali provvedono ad allargare il foro centrale e raggiungere il diametro interno ed esterno richiesto; si passa

quindi dalla forma tonda e piena della billetta iniziale, ad un anello grezzo di circa 1600 mm ottenuto con l'alternanza di fasi di forgiatura e laminazione.

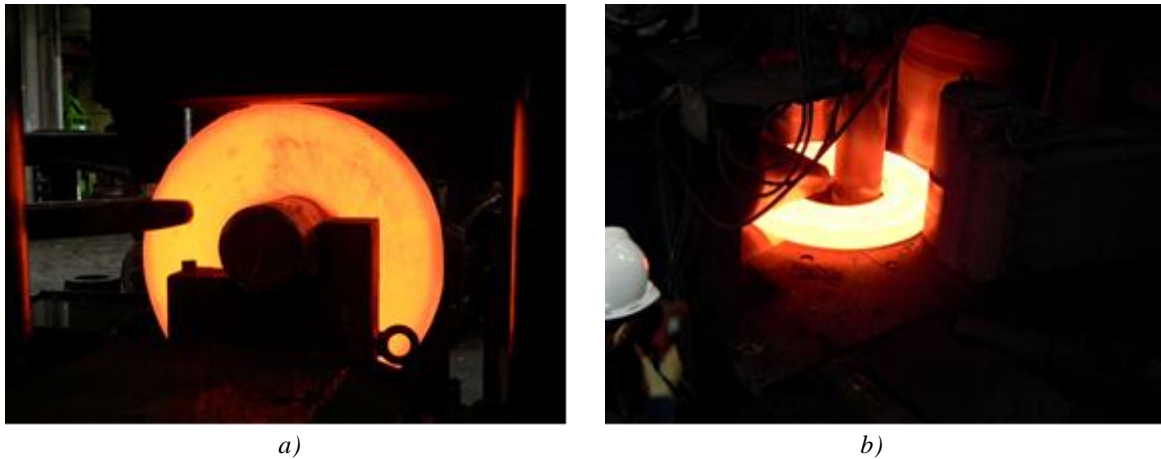


Figura 2.6 Deformazione plastica per l'ottenimento delle dimensioni richieste: a) operazione di mandrinatura; b) operazione di laminazione.

Una seconda forgiatura in stampo permette al componente di assumere la forma finale studiata dall'ufficio tecnico.



Figura 2.7 Anello deformato terminate le operazioni di forgia.

2.2.2 Trattamento termico

Una volta ottenute le dimensioni richieste, il particolare grezzo è pronto per il trattamento termico massivo. Il processo prevede due fasi: la solubilizzazione allo stato grezzo e in secondo step l'invecchiamento.

La prima provvede a rendere il materiale metastabile in condizione di sovrasaturazione attraverso un trattamento termico che prevede un incremento di temperatura controllato fino a circa 1150°C, il mantenimento a questa temperatura per tre ore e successivo raffreddamento in aria a temperatura ambiente.

Il successivo invecchiamento prevede invece la precipitazione della fase gamma primo coerente con la matrice gamma. La velocità con cui avviene la precipitazione varia con la temperatura ed è necessario adottare una temperatura specifica: a temperature molto basse, la velocità di reazione è controllata dalla velocità alla quale gli atomi migrano; a temperature molto elevate, comanda la velocità con cui i nuclei possono formarsi. È necessario quindi adottare la temperatura giusta affinché sia la nucleazione che la crescita possano avvenire in modo idoneo. Per la Nimonic 263 è stata ottenuta una grandezza dei grani pari a 2 e ciò è stato reso possibile grazie ad un trattamento che prevede un innalzamento di temperatura fino ad 800°C, il mantenimento per 8 h ed il successivo raffreddamento in aria a temperatura ambiente.

Poiché dopo l'invecchiamento si assiste ad un incremento di durezza, si esegue questo trattamento termico dopo una pre-sgrossatura del particolare in modo da abbassare il sovrametallo presente. Non è possibile tuttavia eseguire il trattamento di invecchiamento come ultimo processo poiché la precipitazione potrebbe causare il rilascio di tensioni residue nel materiale a causa della lavorazione meccanica, che potrebbero modificare la geometria dell'anello.

2.2.3 Lavorazioni meccaniche

Le tornitura è una delle lavorazioni meccaniche più utilizzate in produzione e sono necessarie per ottenere le geometrie finali e le caratteristiche superficiali richieste dall'ingegneria del particolare in lavoro.

Nelle lavorazioni per asportazione il materiale viene rimosso dalla superficie del pezzo producendo trucioli, i quali presentano due superfici: una che è stata a contatto con il petto dell'utensile, l'altra che rappresenta la superficie originaria del pezzo. La prima ha un aspetto lucido a causa dello sfregamento del truciolo sul petto dell'utensile, la seconda invece, non è entrata in contatto con alcun corpo solido e presenta un andamento a gradini dovuto al meccanismo di scorrimento. Il meccanismo di base può essere rappresentato dal modello bidimensionale rappresentato in Figura 2.8.

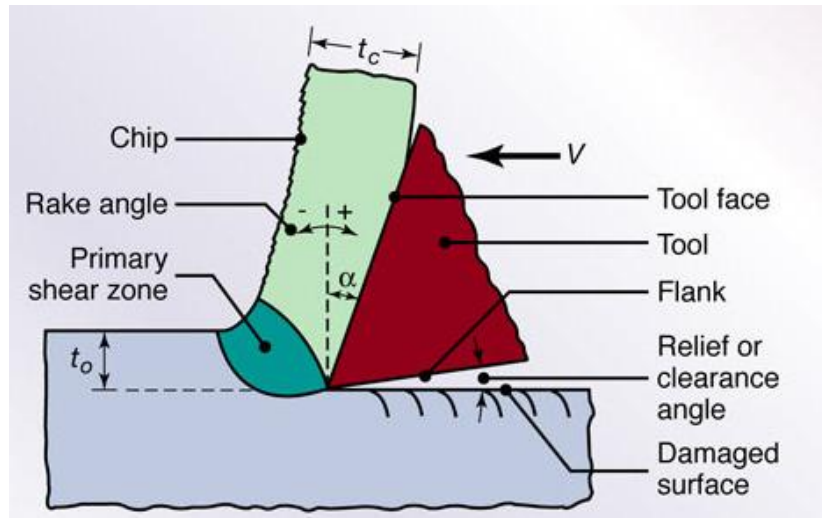


Figura 2.8 *Rappresentazione schematica del processo di taglio ortogonale.*

Nella figura si vede come l'utensile rappresentato in rosso (tool) impatta con il materiale del pezzo con il petto dell'utensile (tool face) e lascia la superficie appena lavorata con il fianco (flank). L'utensile si muove lungo il pezzo con una certa velocità V_c (V), e profondità di passata a_p (t_o). L'angolo di spoglia superiore α (rake angle) influisce sull'angolo di scorrimento, che qui non viene ben definito, ma compreso in una generale zona di scorrimento primaria (primary shear zone). Il truciolo che viene a formarsi (chip) ha le caratteristiche geometriche sopra elencate e presenta uno spessore t_c che è sempre maggiore della profondità di passata ($t_c > t_o$).

Durante il processo di taglio le principali variabili sono:

- 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, quali velocità di taglio, avanzamento, profondità di passata;
- Tipo di fluido lubro-refrigerante;
- Caratteristiche della macchina utensile;
- Portautensile e attrezzature di fissaggio.

Le variabili dipendenti invece sono:

- Tipo di truciolo prodotto;
- Forza richiesta ed energia dissipata;
- Innalzamento di temperatura nel pezzo, nel truciolo e nell'utensile;
- Usura, scheggiatura e rottura dell'inserto;
- Finitura ed integrità superficiale del pezzo dopo la lavorazione.

In questo studio viene posta l'attenzione nel controllo del truciolo e nella rugosità superficiale, avendo cura di scegliere gli utensili più adatti per questo processo ed utilizzare

dei parametri di taglio che rendano più economica la lavorazione. In particolare per il controllo del truciolo vengono scelti dei parametri adeguati per la giusta formazione di quest'ultimo (ad esempio profondità di passata maggiore della metà del raggio), ne sarà valutata la micro-durezza ed il variare di questa a diversi gradi di usura del tagliente. Per la rugosità superficiale vengono studiati i parametri influenti e attraverso una previsione matematica sono scelti quelli più adeguati; ricorrendo un controllo a posteriori viene verificata la teoria ipotizzata.

Capitolo 3

Machinability e controllo truciolo

Nel capitolo seguente, viene spiegato il processo fondamentale attraverso il quale avviene la rimozione del materiale dalla superficie, mediante asportazione del truciolo. Vengono quindi elencati i diversi parametri che influiscono sulla formazione del truciolo e quelli che ne caratterizzano la qualità una volta formatosi. Infine vengono presentate le prove di micro-durezze eseguite sui trucioli: si vuole verificare che la parte del truciolo che ha subito la maggiore deformazione plastica e quindi presenta la maggior durezza è la parte a contatto con l'inserto; si è cercata una differenza dei valori della micro-durezza quando i trucioli sono formati utilizzando un inserto nuovo e con un inserto usurato.

3.1 Truciolabilità

Le super leghe al Nichel sono molto utilizzate nelle applicazioni industriali per le loro uniche proprietà termiche e meccaniche. Le stesse sono anche la causa della scarsa lavorabilità, soprattutto per la possibilità di incrudimento del materiale durante la lavorazione. Per quanto riguarda lo studio di fattibilità della lavorazione, ci sono dei parametri molto importanti che devono essere tenuti sotto controllo: forze di taglio, rugosità superficiale e temperature di taglio; inoltre non bisogna trascurare il fattore di ricalcamento del truciolo, l'angolo di registro, l'integrità superficiale e l'analisi del truciolo. Sono state condotte delle investigazioni sperimentali per comprendere le caratteristiche della superlega Nimonic263 quando viene lavorata con inserti in carburo di tungsteno. Le proprietà, come elevate resistenza meccanica, durezza e resistenza chimica all'ossidazione, sono la causa principale della difficoltà della lavorazione. Nonostante queste siano le proprietà richieste, costringono a portare dei grandi cambiamenti nell'organizzazione della lavorazione a causa dell'alta temperatura e stress generati durante la tornitura.

I due problemi principali sono:

- Vita breve dell'utensile a causa dell'indurimento prodotto durante la lavorazione;
- Danni metallurgici nel pezzo a causa dell'elevata forza di taglio che produce un ulteriore indurimento durante la lavorazione, scarsa finitura superficiale e distorsioni.

3.1.1 Forze di taglio

Nonostante la forza in gioco durante la lavorazione non sia stata acquisita in questo elaborato, ci si rifà a delle nozioni generali sempre valide nel campo applicativo.

In generale la forza di taglio presenta un andamento decrescente all'aumentare della velocità, mentre si riscontra un aumento di questa alle maggiori profondità di passata. A velocità di taglio maggiori, infatti, la temperatura generata è maggiore a causa del build-up di temperatura, risulta quindi che il materiale è più tenero e più facilmente rimovibile, per cui la forza di taglio diminuisce all'aumentare della velocità.

3.1.2 Spessore del truciolo

Dal punto di vista della qualità della lavorazione, l'interazione tra l'inserto ed il materiale nella formazione del truciolo ha molto interesse in termini scientifici.

I trucioli vengono prodotti attraverso un sistema di scorrimento visibile nella Figura 3.1.

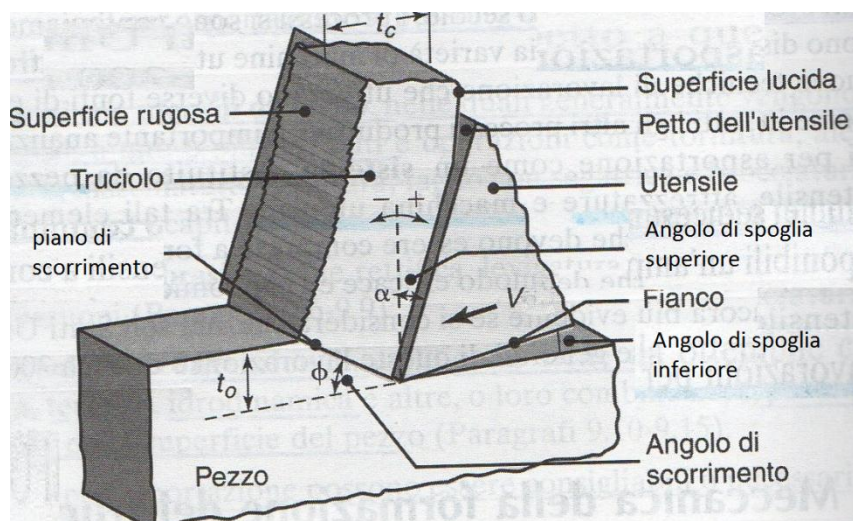


Figura 3.1 Rappresentazione schematica della formazione del truciolo mediante taglio ortogonale.

Come riportato sopra si ricorda che lo scorrimento avviene lungo il piano di scorrimento, che forma un angolo θ , detto angolo di scorrimento, con la superficie del pezzo. Al di sotto del piano di scorrimento il pezzo rimane indeformato, mentre sopra al piano il truciolo è già formato e si muove verso il petto dell'utensile facendo attrito con quest'ultimo. È possibile calcolare lo spessore del truciolo conoscendo la profondità di passata t_o , l'angolo di spoglia superiore α e l'angolo di scorrimento θ . Il rapporto tra t_o e t_c (spessore del truciolo) è noto come rapporto di taglio r e può essere calcolato come:

$$r = \frac{t_0}{t_c} = \frac{\sin\theta}{\cos(\theta - \alpha)} \quad 3.1$$

3.1.3 Fattore di ricalcamento del truciolo

Il fattore di ricalcamento del truciolo è definito come il rapporto dello spessore del truciolo t_c e lo spessore del truciolo indeformato t_0 e rappresenta una misura quantitativa del grado di deformazione plastica. t_c e t_0 sono direttamente proporzionali alla profondità di passata t_0 : l'aumento dello spessore del truciolo, dovuto all'aumento di profondità di passata, è minore rispetto all'aumento che avviene nel materiale indeformato, quindi rapporto di compressione del truciolo diminuisce all'aumentare della profondità di passata. L'influenza della profondità di passata nel rapporto di compressione, può essere attribuita alla variazione della forza specifica di frizione lungo la superficie a causa delle variazioni di temperatura all'interfaccia. Perciò il calcolo dell'angolo di scorrimento è complesso, poiché entrano in gioco anche fattori di attrito e frizione dei due materiali a contatto durante il taglio, materiale dell'inserto e quello del pezzo.

3.1.4 Angolo di scorrimento

Il meccanismo fondamentale per la formazione del truciolo, riguarda una deformazione per scorrimento localizzato del materiale lavorato, quando viene a contatto con l'inserto. Nella Figura 2.2 (figura non specifica della trattazione) è evidenziato l'angolo di scorrimento, definito dal piano di scorrimento con la direzione di avanzamento. Il piano di scorrimento è la zona in cui avviene la maggior deformazione plastica del materiale da asportare, che per scorrimento di 'piani' successivi genera il truciolo. L'angolo di scorrimento caratterizza il processo di formazione del truciolo ed il suo valore è legato a diverse variabili: angolo di spoglia frontale dell'utensile, materiale

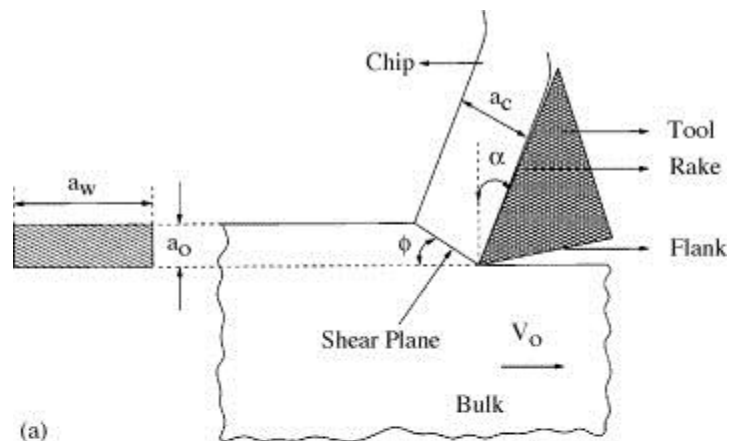


Figura 3.2 Visualizzazione dell'angolo di scorrimento: a) teoria schematizzata; b) micrografia durante lavorazione.

da lavorare, parametri di lavoro, ecc.

L'influenza dell'angolo di spoglia è molto significativa per quanto riguarda l'angolo di scorrimento e quindi lo spessore del truciolo (Figura 3.3): un angolo di spoglia negativo produce un angolo di scorrimento piccolo, il piano di scorrimento del truciolo risulta più lungo, di conseguenza, lo spessore del truciolo prodotto e la forza necessaria per rimuoverlo saranno maggiori.

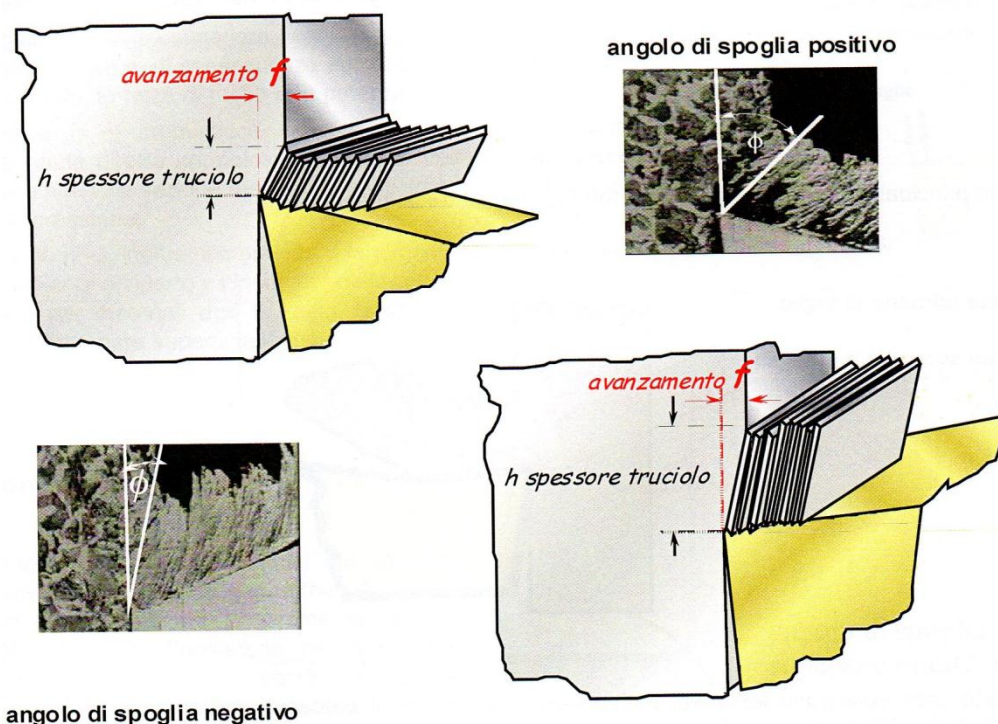


Figura 3.3 Effetto dell'angolo di spoglia sull'angolo di scorrimento e sullo spessore del truciolo.

L'aumento dello sforzo necessario per rimuovere il truciolo sarebbe in questo caso troppo oneroso, quindi è necessario utilizzare sempre degli angoli di spoglia frontale nulli o positivi.

La determinazione dell'angolo di scorrimento rimane comunque molto complessa, a causa della dipendenza dei fenomeni di frizione che avvengono durante la deformazione tra materiale ed inserto.

Una volta determinato l'angolo di scorrimento, tutti gli altri parametri possono essere predetti. L'angolo di scorrimento è responsabile delle forze di taglio ed è calcolato a partire dall'equazione precedente (3.1), tenendo presente che lo spessore del truciolo può essere determinato sperimentalmente e dalla conoscenza di t_0 e α , risulta :

$$\tan \theta = r \times \frac{\cos \alpha}{(1 - r \sin \alpha)} \quad (3.2)$$

r = rapporto di taglio = spessore del truciolo non tagliato sullo spessore del truciolo tagliato;
 α = angolo di spoglia frontale.

L'angolo di scorrimento è inversamente proporzionale al fattore di ricalcamento: l'angolo di scorrimento aumenta all'aumentare della velocità di taglio e dell'avanzamento. La velocità di taglio è il parametro che maggiormente influenza l'angolo di scorrimento.

3.1.5 Analisi per diffrazione di raggi x del truciolo

Qualora fosse eseguita un'analisi a diffrazione di raggi x sulla superficie si verificherebbe che non si notano cambiamenti di fase, ciò significa che la temperatura ottenuta durante la lavorazione non è sufficiente per generare una possibile trasformazione di fase.

3.1.6 Microstruttura e orientazione dei grani nel truciolo

I parametri di taglio influenzano molto significativamente la deformazione plastica del materiale, ed il grado di deformazione può essere valutato dall'orientazione dei grani. Il cambiamento di forma dei grani è dovuto alla grande deformazione che si ha davanti all'inserto. Quando i grani sono maggiormente allungati lungo la direzione del gradiente di sforzo, iniziano ad essere anche più sottili. Di conseguenza, i grani assumono una forma allungata quando sono nella prima zona di scorrimento. L'angolo di orientazione ed allungamento dei grani continua ad aumentare con lo sforzo. Il cambiamento di orientazione dei bordi di grano a causa della deformazione plastica è chiaramente visibile in Figura 3.4.

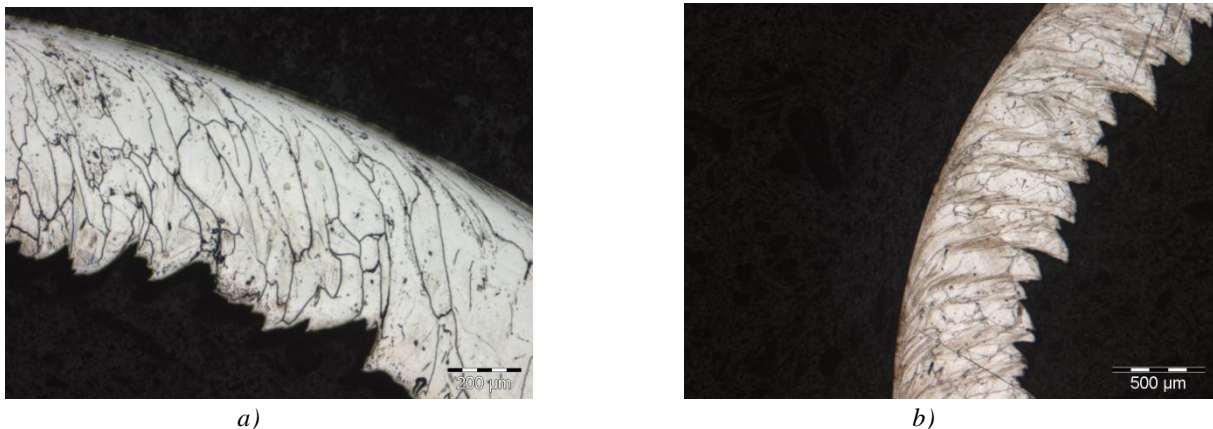


Figura 3.4 Microstruttura deformata dei grani dei trucioli attaccati con gliceregia per 90 secondi :a)micrografia eseguita a 50x; b) 25x.

I diversi cambiamenti sono chiaramente influenzati dai parametri di taglio, dei quali la velocità di taglio ha il maggior importanza. Ad elevate velocità la maggior parte del calore è portata via dal truciolo e la dissipazione del calore all'interno del pezzo è minore. Inoltre, la bassa conduttività termica ed il basso calore specifico del materiale, producono un minor trasferimento di calore durante il taglio, questo provoca un aumento della temperatura

all'interfaccia tra pezzo e inserto. Questo aumento locale di temperatura riduce le condizioni tribologiche all'interfaccia truciolo e inserto ed aumenta il fluire plastico del truciolo rimosso. Con l'aumentare della velocità l'angolo di orientazione dei grani diminuisce.

3.2 MICRODUREZZE

La prova di micro-durezza costituisce uno strumento attraverso il quale, è possibile testare la forza opposta alla penetrazione di una singola fase del materiale o come in questo caso di un singolo grano. Il vantaggio è rappresentato dal fatto che grazie a questa tecnica è possibile testare con precisione micrometrica il materiale nei diversi punti.

Per effettuare la prova è necessario anzitutto la preparazione del campione.

3.2.1 Preparazione del campione

Il truciolo che deve essere testato, viene inserito all'interno della macchina insieme alla resina, in modo tale che la sezione trasversale sia in evidenza sul campione. La macchina utilizzata per l'esperienza è una PRESI, MECAPRESS II ed è stata utilizzata una resina fenolica rossa di alta qualità. Il provino viene ottenuto per presso-formatura in un tempo di 15 minuti ad una temperatura di 180°. Una volta raffreddatosi è possibile eseguire la lucidatura del provino mediante varie carte abrasive via via di granulometria inferiore: 120, 220, 800 FEPA ed in sequenza i panni da 6, 3, 1 micron (Figura 3.5).



Figura 3.5 *Provino con truciolo trasversale inglobato in resina fenolica rossa per presso-formatura.*

Il microdurimetro è dotato di due sistemi di lenti ottiche che permettono ingrandimenti di 100x e 400x necessari per l'inquadratura dell'indentatore nel punto desiderato. L'individuazione del centro del grano è possibile solo dopo che il campione lucidato ha subito l'attacco chimico, che, grazie alla rimozione dello strato superficiale, rende visibile la microstruttura del materiale. Il reagente utilizzato per l'attacco è il Kalling's reagent (2g di CuCl_2 , 40ml di HCl , 80ml di etanolo), alternativamente è stata usata anche la gliceroglia (30ml di glicerina, 30ml di HCl , 10 ml di HNO_3), una soluzione che permette un attacco più aggressivo.

3.2.2 Prove di microdurezza

A causa dell'incrudimento (provocato dalla deformazione per scorrimento), il truciolo solitamente diventa più duro e resistente, quindi meno duttile, rispetto al materiale del pezzo. Sperimentalmente, infatti, si è osservato un aumento medio di più di 100 punti di durezza Vickers, testando il materiale del pezzo e quello del truciolo prodotto, come visibile in Tabella 3.1.

Tabella 3.1 Valori delle microdurezze rilevate in campioni di Nimonic 263 allo stato invecchiato.

| valori di microdurezze rilevate in campioni di nimonic 263 allo stato invecchiato | | |
|---|---------------|--|
| | materiale | truciolo |
| valori microdurezza | 360, 366, 380 | 360, 464, 490, 536, 536, 542, 554, 572 |
| media | 369 | 507 |
| differenza | | 138 |

L'aumento di durezza e resistenza del truciolo dipende comunque dall'entità della deformazione. Le micro-durezze del truciolo sono state misurate a differenti condizioni di lavorazione. Ciò che ci si aspetta è che presenti un valore maggiore di micro-durezza lo strato superficiale del truciolo, per poi diminuire rapidamente. Questo è dovuto dal fatto che la regione a confine con la superficie è soggetta al massimo lavoro di pressione e di deformazione. Lo spessore dello strato indurito dipende molto dal tipo di interazione meccanica e termica.

La zona a contatto con l'inserto è quella che subisce la maggior deformazione plastica e quindi quella che presenta la maggior valore di micro-durezza.

È noto inoltre che il diverso stato di usura dell'inserto influisce sull'efficacia del taglio, avendo un riscontro diretto anche con la finitura superficiale del pezzo lavorato. Inoltre, lo stesso truciolo prodotto è visivamente diverso a seconda dell'usura del tagliente, come si vede in Figura 3.6.

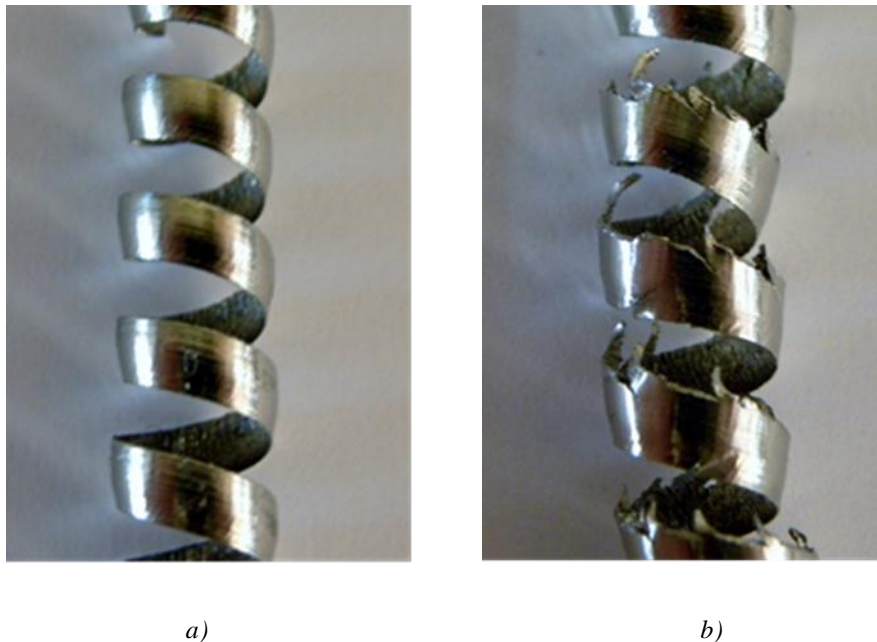


Figura 3.6 Trucioli prodotti con inserto in condizioni di usura differenti: a) inserto nuovo; b) inserto usurato.

Il truciolo prodotto con un inserto usurato presenta degli frastagliature, che sono in realtà degli strappi che si ottengono mediante processi di adesione e distacco del materiale durante la lavorazione, causati da un inserto con tagliente principale e secondario usurati. Infatti i trucioli che vengono formati con un tagliente nuovo non presentano questi strappi poiché la rimozione avviene in modo continuo. Come ulteriore conferma, quindi, si sono cercati dei riscontri attraverso le micro-durezze.

Le prove sono state eseguite in punti diversi del campione, avendo cura di distanziarsi sufficientemente dalle impronte precedenti e senza andare ad impattare con i bordi del grano, poiché i dati che si sarebbero ottenuti sarebbero stati di scarsa rilevanza.

Per la prova di micro-durezza si utilizza la prova Vickers, la quale prevede l'utilizzo di un indentatore piramidale a base quadrata, con angolo al vertice di 136° .

Il peso utilizzato è stato di 100g, mantenuto per un tempo totale di 20 secondi: nei primi 10 secondi si ha il graduale rilascio del peso sul materiale, nei restanti 10 secondi il peso viene lasciato staticamente sul pezzo. Al termine dei 20 secondi della prova, il peso viene rimosso ed attraverso il microscopio da 400 ingrandimenti, grazie ad una scala micrometrata, è possibile eseguire la lettura della lunghezza delle diagonali dell'impronta quadrata lasciata dall'indentatore. Calcolando la media dei valori delle diagonali e tenendo presente il carico applicato, è possibile leggere il valore di durezza nelle tavole di conversione.

Le prove sono state eseguite nei trucioli prodotti in diverse condizioni di usura del tagliente. Con il termine *inserto nuovo* viene definito il truciolo prodotto quando il tagliente è nuovo, mentre con *inserto vecchio* quando il tagliente presenta un labbro di usura di circa 3 decimi.

Per confronto, inoltre, sono stati valutati i trucioli prodotti come sopra elencato provenienti da due diversi tipo di inserto. In particolare si tratta degli inserti : CNMM 190624 AC3000 N-HP

e SNMM190616 SR 2015, (le geometrie dell'inserto vengono riportate in appendice a fine trattazione); per le specifiche degli inserti consultare l'elaborato prodotto dal collega Federico Bertuol "Studio del processo di tornitura di un componente per turbina in nimonic 263: usura degli inserti, effetti microstrutturali e tensioni residue indotte alla superficie".

Il materiale durante la lavorazione si presenta allo stato invecchiato.

Si sono ottenuti i seguenti risultati riportati in Tabella 3.2:

Tabella 3.2 Valori di micro-durezze riscontrate nei trucioli prodotti con diversi utensili, in zone diverse del truciolo e con stati di usura variabili dell'inserto.

| inserto | parametri di taglio | | | stato del tagliente | zona | media delle diagonali | valore di durezza in HV |
|-------------------------|---------------------|-----------|-------------|---------------------|--------|-----------------------|-------------------------|
| | v (m/s) | a (mm) | f (mm/giro) | | | | |
| CNMM 190624 AC3000 N-HP | 24,5 | variabile | 0,6 | nuovo | bordo | 22,7 | 360 |
| | 24,5 | variabile | 0,6 | nuovo | cresta | 18,6 | 536 |
| | 24,5 | variabile | 0,6 | vecchio | bordo | 18,3 | 554 |
| | 24,5 | variabile | 0,6 | vecchio | cresta | 19,95 | 464 |
| SNMM190616 SR 2017 | 27 | variabile | 0,7 | nuovo | bordo | 18,05 | 542 |
| | 27 | variabile | 0,7 | nuovo | cresta | 19,45 | 490 |
| | 27 | variabile | 0,7 | vecchio | bordo | 18 | 572 |
| | 27 | variabile | 0,7 | vecchio | cresta | 18,6 | 536 |

Con *bordo* del truciolo si indica la zona a contatto con il petto dell'utensile, liscia a causa dell'attrito con quest'ultimo; con il termine *cresta* invece ci si riferisce alla zona del truciolo che non è a contatto con nessun oggetto solido e presenta quindi le creste derivanti dalla successione dello scorrimento dei piani.

Entrambe le tipologie di inserto sono state una conferma di quanto ci si aspettava. Infatti, dalla tabella, si vede che le impronte lasciate dell'indentatore nella parte di truciolo adiacente alle creste dei piani di scorrimento, hanno una maggiore superficie, ciò significa che l'indentatore è penetrato con maggiore profondità nel materiale, sintomo di minor durezza di questa zona, rispetto alla parte di truciolo a contatto con l'inserto.

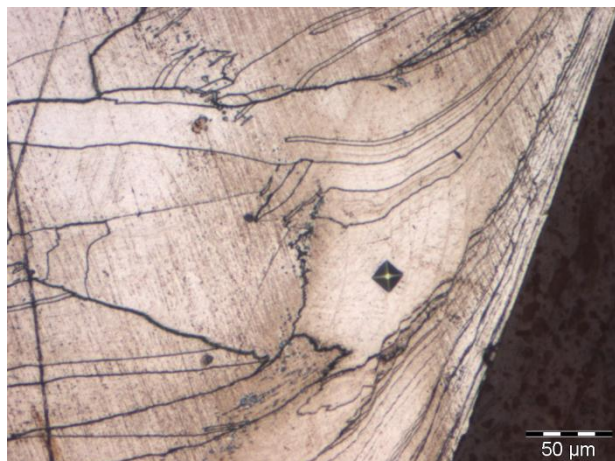


Figura3.7 *Impronta lasciata dell'indentatore durante la prova Vickers eseguita ponendo un carico di 100g per 20sec. Ingrandimento 200x.*

Verificato che la deformazione plastica necessaria per la formazione del truciolo non avviene uniformemente e causa dei diversi gradienti di durezza, in futuro sarebbe interessante verificare come influiscono i diversi fattori di taglio.

Ciò che ci si aspetta è che il fattore che maggiormente influenza la variazione di micro-durezza sia la velocità rispetto all'avanzamento per una profondità di passata costante. Il massimo valore di micro-durezza verrà raggiunto all'aumentare dell'avanzamento a causa dell'influenza sia dello spessore del truciolo, che della lunghezza di contatto tra inserto e truciolo.

Capitolo 4

Rugosità superficiale

La rugosità superficiale è uno dei parametri più importanti per quanto riguarda le caratteristiche funzionali, infatti rappresenta l'interfaccia a contatto con altri elementi. Molto più di un semplice fatto estetico, è una caratteristica specifica richiesta dall'ingegneria del particolare. Ne viene quindi spiegato il significato, i mezzi attraverso i quali è possibile rivelarla ed infine le misure effettuate sull'anello con i relativi commenti.

4.1 RUGOSITA'

Per quanto riguarda le caratteristiche funzionali, la rugosità superficiale è uno dei più importanti parametri usato per valutare l'integrità superficiale dei componenti meccanici, poiché controlla direttamente le funzioni superficiali come frizione, usura, lubrificazione e tenuta delle superfici accoppiate (in presenza di gas o fluidi). Influenza significativamente anche lo stress a fatica, la resistenza a corrosione e la resistenza al creep, che sono requisiti fondamentali nel caso di componenti per turbine.

Per valutare la rugosità di una superficie occorrono, dato il suo carattere prevalentemente irregolare e non periodico, numerosi rilievi, in piani diversi, delle deviazioni dei punti della superficie reale dai corrispondenti punti della superficie tecnica. In pratica, però, la misura viene effettuata solo su alcuni profili rilevati per mezzo di piani opportunamente disposti rispetto alla superficie. Generalmente i piani di rilievo vengono scelti con giacitura normale a quella dei solchi prevalenti (Figura 4.1).

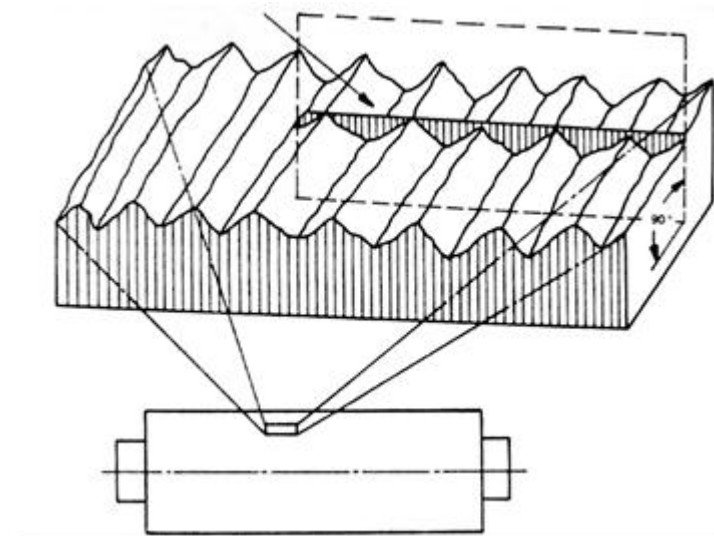


Figura 4.1 Rappresentazione schematica del piano perpendicolare ai solchi principali per l'acquisizione della rugosità superficiale.

Ogni superficie è caratterizzata da un profilo macroscopico esteso (profilo tecnico) e da una struttura microscopica costituita da irregolarità superficiali (deviazioni dal profilo tecnico), nota come *rugosità superficiale*. Essa costituisce un fattore importante per il comportamento dei contatti, lubrificati e non, soggetti a carichi elevati, poiché influenza l'usura, l'attrito ed i danneggiamenti superficiali. Nella Figura 4.2 viene rappresentato il profilo teorico e quello reale, indicando con le linee tratteggiate il picco e la valle che presentano la maggior distanza dal profilo tecnico, rispettivamente R_p e R_v , i cui contributi sommati forniscono il dato di massima rugosità R_z .

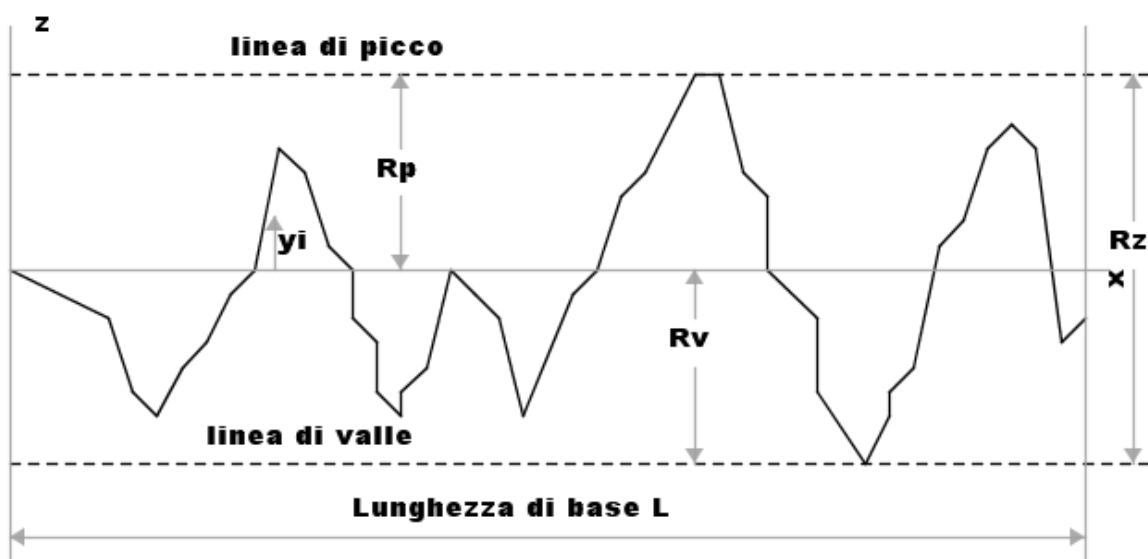


Figura 4.2 Rappresentazione schematica del profilo ideale e reale per una lunghezza di base L .

4.2 MISURA DELLA RUGOSITA'

Per definire la rugosità si procede al rilievo del profilo per una certa lunghezza L , chiamata lunghezza base o di campionatura. Tale lunghezza è scelta in modo tale da non essere influenzata da irregolarità di tipo macro-geometrico ed è dell'ordine di qualche millimetro. La lunghezza di valutazione viene suddivisa poi in 5 lunghezze più piccole (lunghezze di base), per evitare che valori anomali locali si ripercuotano su tutto il profilo.

In corrispondenza delle lunghezze di misura e del profilo così rilevato, si può definire una linea parallela al profilo teorico, già definito come profilo tecnico, posizionata rispetto al profilo reale in modo tale che la somma dei picchi rispetto ad essa sia uguale a quella delle valli (in Figura 4.3 le due aree sono segnate con linee inclinate con diverse angolazioni): tale linea sarà definita *linea media* o di compenso.

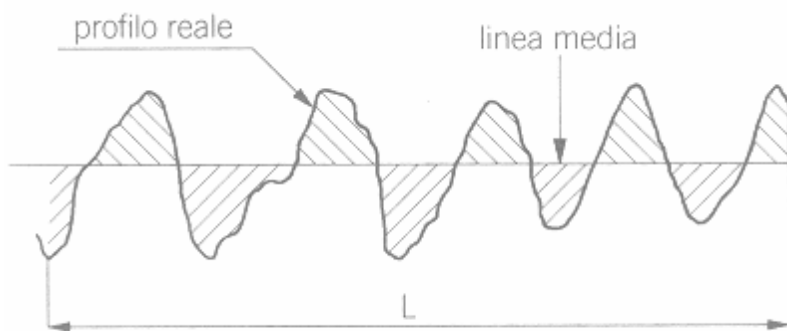


Figura 4.3 Profilo reale della superficie e linea media.

La linea media, che corrisponde alla linea centrale, è più rigorosamente definita come la linea avente la forma del profilo geometrico rispetto alla quale risulta minima la somma dei quadrati delle distanze dei punti del profilo reale (riferimento Figura 4.4).

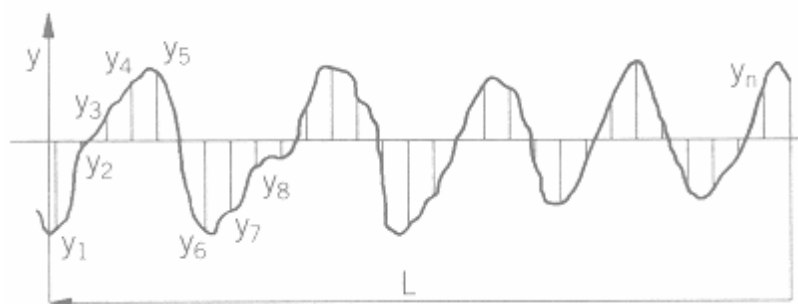


Figura 4.4 Identificazione della linea media mediante il minimo della somma dei quadrati delle distanze dei punti (y_i) del profilo reale.

Il parametro più semplice caratterizzante una superficie reale è la rugosità media, o grado di rugosità, espressa in micrometri ($1 \times 10^{-6} \text{m}$) e definita come l'ampiezza del valor medio aritmetico dei valori assoluti delle variazioni y_i del profilo reale rispetto alla linea media:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (4.1)$$

4.3 RUGOSIMETRO

I sistemi di rilevamento attuali della misurazione della rugosità, sono basati normalmente sull'utilizzazione di strumenti elettronici detti *rugosimetri*.

Lo strumento utilizzato per effettuare la misurazione della rugosità superficiale è un Perthometer M1, che utilizza un metodo di misurazione per contatto. L'esplorazione della superficie in esame avviene per mezzo di

un'astina in metallo alla cui estremità è montato un micro-tastatore in diamante di forma conica, il cui vertice è raccordato con raggio pari a 2.5 micron. La puntina esploratrice viene guidata da un elemento di carburo di tungsteno, chiamato pattino, che poggia e scorre sulla superficie in esame, in modo da fornire un efficiente riferimento per la misura della rugosità.



Figura 4.5 Rugosimetro Perthometer M1

4.4 DETERMINAZIONE DELLA RUGOSITA'

Nella pratica ci sono molto fattori che influenzano la rugosità superficiale, come variabili dell'inserto, del pezzo e delle condizioni di taglio. Le variabili dell'inserto includono il materiale dell'inserto, il raggio punta, l'angolo di attacco, le geometrie di taglio e le vibrazioni. Le variabili del pezzo includono il materiale, la durezza e altre proprietà meccaniche. Le condizioni di taglio riguardano la velocità, l'avanzamento e la profondità di passata e l'uso o assenza di fluidi lubro-refrigerati.

Geometricamente la finitura superficiale è determinata da due parametri principali: avanzamento al giro f e raggio di punta dell'inserto r . In realtà anche altri fattori condizionano il risultato della finitura superficiale, in particolare: stabilità del sistema macchina utensile-pezzo-utensile, vibrazioni ed usura del tagliente. In particolare il tagliente

di riporto è il parametro che influenza negativamente il taglio: causato da una temperatura troppo bassa nella zona di taglio, cambia la geometria del tagliente iniziale; inoltre il materiale del pezzo di riporto nel tagliente non è stabile e staccandosi produce una superficie irregolare. (la formazione del tagliente di riporto, le cause e le soluzioni adottate affinché non sia presente vengono presentate nel capitolo successivo).



Figura 4.6 Formazione del tagliente di riporto nel petto dell'inserto.

Il valore approssimato (teorico) della rugosità massima R_t (calcolata in mm) può essere calcolato con la formula:

$$R_t = \frac{f^2}{8 \times r} \times 1000 \quad (4.2)$$

nella quale si vede come i vari parametri influiscano in modo diverso sulla rugosità. Aumentando l'avanzamento aumenta il grado di rugosità, mentre all'aumentare del raggio questo diminuisce. Questo è intuibile dalla Figura 4.7 nella quale viene rappresentato in modo schematico l'effetto delle diverse passate durante la lavorazione e l'ottenimento dei tipici solchi che essa lascia.

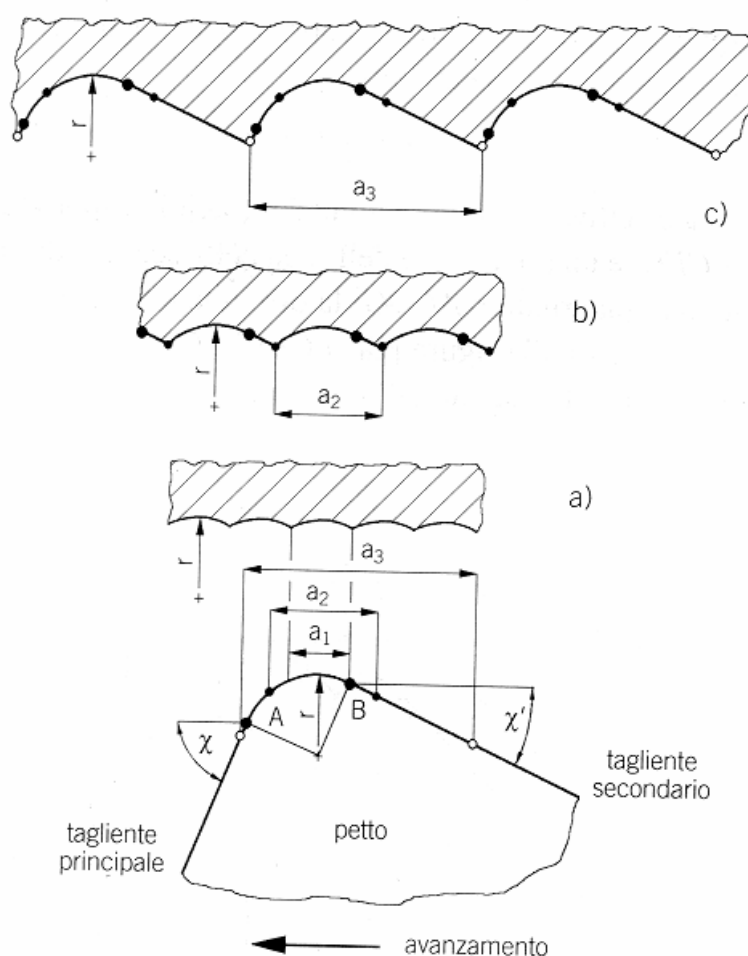


Figura 4.7 Rappresentazione schematica dell'effetto dei diversi parametri sulla rugosità superficiale: a) e b) lavora solamente il raggio dell'inserto; c) la rugosità è determinata dal raggio dell'inserto e dal tagliente secondario.

Nella Figura 4.7 è molto chiaro l'effetto dei parametri influenti : raggio di raccordo tra i taglienti r , angolo di attacco χ , χ' e avanzamento. In particolare, quando la profondità di passata è bassa, il raggio è piccolo (condizione (a)) e la parte di utensile interessata al taglio è limitata solo all'arco di raccordo tra i taglienti, producendo un solco formato dall'intersezione di due archi di cerchio di raggio r .

Quando invece la profondità è maggiore, durante il taglio viene interessato anche parte del tagliente oltre all'arco di raccordo (condizione (b) e (c)), producendo una forma composta da archi di cerchio e da segmenti rettilinei, di cui l'inclinazione e la lunghezza dipendono dall'angolo di attacco.

4.5 RUGOSITA' RISCONTRATA

Dalle analisi effettuate mediante il rugosimetro Perthometer M1 si procede al rilevamento della rugosità superficiale utilizzando una lunghezza di analisi di 5.600mm (conforme con la

normativa ISO), che viene poi suddivisa in 5 parti ciascuna di 0.800mm per i motivi sopra elencati. Come si vede molto bene in Figura 3. la macchina effettua la scansione della superficie e produce un report istantaneo cartaceo, nel quale vengono riportati i dati sopra citati, il coefficiente di rugosità media R_a ed il valore di rugosità massima R_{max} , quest'ultima definita come la distanza fra la cresta predominante ed il solco più profondo. Nella rappresentazione grafica del report l'asse Y (ruotato nella figura accanto) viene riportato con scala di ingrandimento; pertanto l'osservazione del grafico può dare l'impressione che esistano dei picchi impossibili. In realtà il profilo reale è molto più piatto di quello mostrato nel grafico. La scelta dell'ingrandimento è correlata alla natura della superficie e di conseguenza al tipo di lavorazione.

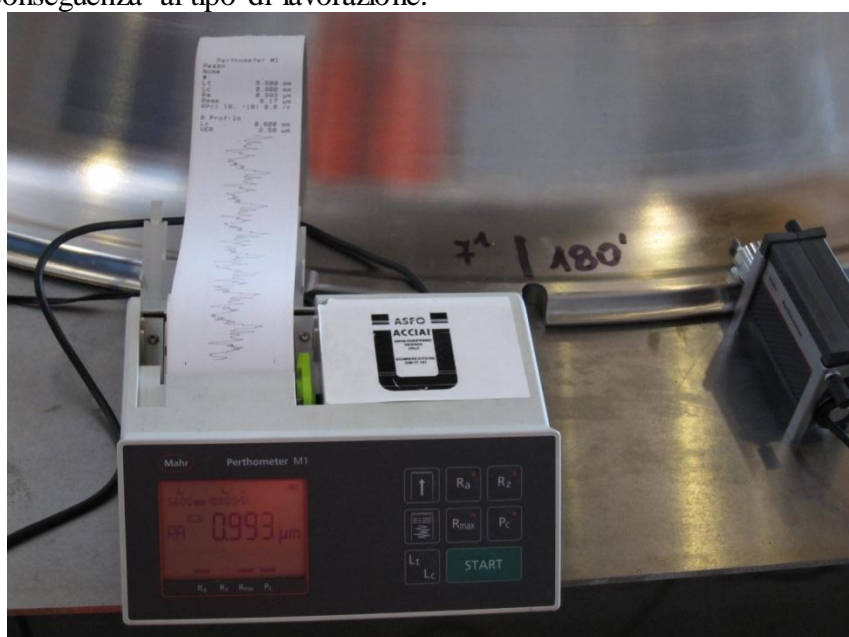


Figure 4.8 *Acquisizione della rugosità superficiale attraverso il rugosimetro.*

Dalle operazioni di tornitura svolte nell'ultima fase del ciclo di produzione, si è riscontrata una rugosità pari a 0.997, 0.993 micron, ottenuta mediante un inserto rotondo RCMT 1204MO 1105 quindi con raggio di punta (che coincide con il raggio dell'inserto) di 1.2cm ad una profondità di passata pari a 0.5mm, ed un avanzamento impostato a 0.5mm/giro. L'angolo d'attacco ottenuto è quindi di 24°, infatti utilizzando un inserto rotondo l'angolo di attacco è definito dal raggio dell'inserto stesso e dalla profondità di passata; all'aumentare della profondità si ha una progressiva diminuzione dell'angolo di attacco. Le prestazioni migliori si ottengono quando l'angolo di registrazione K_r rimane al di sotto di 60°. Ciò significa

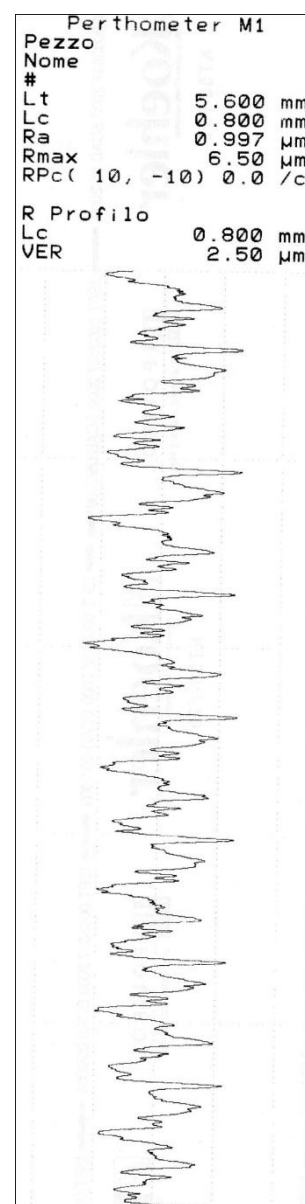


Figure 4.9 *Rugosità riscontrata*

che la profondità di taglio non deve essere superiore al 25% del diametro dell'inserto.

Durante l'ultima passata è stata necessaria la sostituzione del tagliente, e ciò avrebbe potuto inficiare il valore della rugosità. È stato allora adottata la strategia di programmare l'uscita dell'inserto vecchio ed il rientro dell'inserto nuovo attraverso un taglio conico. In questo modo l'interruzione del taglio provoca degli effetti minimi per quanto riguarda la rugosità superficiale. È stata infatti eseguita l'analisi della rugosità comprendendo nella lunghezza di analisi anche lo scalino dovuto al cambio utensile. Si è riscontrata una rugosità pari a 1.319 micron, quindi all'interno delle richieste (3.2 micron).

La rugosità richiesta dal cliente per la produzione dell'anello è di 3.2 micron, quindi essendo rispettate le tolleranze il pezzo è idoneo per queste caratteristiche. Essendo il valore rilevato inferiore rispetto a quello richiesto dalla specifica, si potrebbe pensare di cambiare qualche parametro in modo tale da aumentare la produttività della lavorazione. Ma in linea di massima non si pensa a modificare questi parametri poiché un aumento dell'avanzamento causerebbe un aumento dello sforzo sul materiale, che rischierebbe di compromettere le specifiche richieste nel controllo dimensionale.

Capitolo 5

Usura inserti

Le lavorazioni meccaniche al tornio prevedono l'asportazione di materiale, il quale viene rimosso mediante deformazione plastica per mezzo di uno stelo rigido indeformabile, che raschia via dalla superficie trucioli. In particolare è l'inserto ad essere in contatto con il pezzo ed è questo che permette la formazione del truciolo. Vi sono centinaia di tipi diversi di inserti ognuno caratterizzato da diverso materiale, geometrie, angoli e rompi truciolo, adatti per un tipo di lavorazione specifica e per i quali sono consigliati i parametri di taglio ideali per un tipo di lavorazione, mentre ciò che non viene indicato è il tempo di contatto. Questo viene stabilito in base al grado di usura raggiunta dall'inserto, che può presentarsi in diverse forme ed essere causata da altrettanti fattori.

Di seguito vengono presentate le seguenti usure: labbro di usura e tagliente di riporto. Il labbro di usura completa la trattazione della rugosità superficiale essendo l'usura che maggiormente ne influenza il grado; il labbro di usura, usura sempre presente nel fianco dell'utensile durante la lavorazione, serve come incipit per il paragrafo successivo nel quale viene presentata l'equazione di Taylor.

Per completare il discorso degli utensili utilizzati e le usure riscontrate durante la lavorazione si veda l'elaborato prodotto dal collega Federico Bertuol "Studio del processo di tornitura di un componente per turbina in Nimonic 263: usura degli inserti, effetti microstrutturali e tensioni residue indotte alla superficie".

5.1 Usura sul fianco

L'usura sul fianco prende il nome di labbro di usura, ed è generalmente causata da:

- sfregamento dell'utensile sulla superficie lavorata, con conseguente usura adesiva e o abrasiva in funzione dei materiali coinvolti;
- innalzamento della temperatura, che comporta effetti negativi sulle proprietà del materiale dell'utensile.

Un'eccessiva usura sul raggio di punta comporta una cattiva finitura superficiale (Figura 5.1). Per rimediare a questo tipo di usura si consiglia di ridurre la velocità di taglio e scegliere una qualità di metallo duro più resistente.

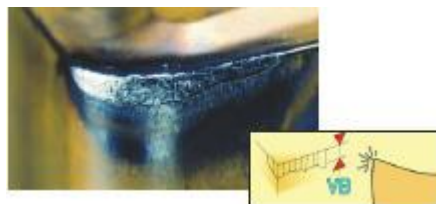


Figura 5.1 *Labbro di usura*

5.2 Tagliente di riporto

Il tagliente di riporto è un fenomeno chimico-fisico riscontrabile nella lavorazione di molti materiali, consiste nell'accumulo di particelle di materiale del pezzo, che si saldano sul petto del tagliente. La causa di questa anomalia sono da imputare principalmente alla temperatura ed alla pressione a cui è sottoposto il materiale, nella zona di contatto fra truciolo e petto dell'utensile. I principali fenomeni negativi di cui è responsabile sono: inaccettabile finitura superficiale, difficoltà ad ottenere la misura richiesta del pezzo e rapida usura o scheggiatura del tagliente. Il processo di formazione del tagliente di riporto è caratterizzato da una continua alternanza di fenomeni di nascita, crescita e poi di rottura di particelle sul tagliente, come visibile in Figura 5.2 dove le particelle di materiale sono rappresentate in rosso.



Figura 5.2 *Formazione del tagliente di riporto: nascita, crescita e rottura.*

Tale fenomeno altera la formazione del truciolo ed i fattori che influenzano maggiormente questo tipo di usura sono: materiale da lavorare, temperatura e quindi velocità di taglio, pressione (angolo di spoglia frontale e micro-geometria del tagliente), avanzamento, refrigerante, qualità di metallo duro, ecc..

Stabilita la relazione che intercorre tra il labbro di usura e la finitura superficiale, è emerso che il valore della rugosità (R_a) tende a migliorare con l'aumentare della velocità, fino ad un determinato valore che poi rimane costante. Un aumento della velocità di taglio provoca un aumento della temperatura nella zona di taglio, che sfavorisce la formazione del tagliente di riporto e che si traduce quindi in una miglior finitura superficiale. Aumentando ulteriormente la velocità, però, il valore della rugosità si stabilizza e si assiste invece ad un sensibile aumento del labbro di usura, per le questioni che vengono spiegate di seguito.

Il tagliente di riporto è sempre presente durante la lavorazione, infatti delle volte si cerca sfruttare questo fenomeno purché lo strato riportato sia di spessore minimo, saldato molto bene con il tagliente e di notevole durezza, in modo tale che esso rappresenti una protezione per l'inserto senza causarne variazioni dimensionali sensibili.)



Figura 5.3 Tagliente di riporto.

5.3 ESPERIENZA

L'usura che è stata maggiormente tenuta sotto controllo è stata quella sul fianco definita anche labbro di usura, presente ogniqualvolta si effettua una lavorazione meccanica, presenta un incremento dell'usura proporzionale alla velocità di taglio. L'andamento tipico del labbro di usura, in funzione del tempo di contatto con il truciolo, è rappresentato in Figura 5.4. Si nota come la dipendenza si può suddividere in tre zone: la prima costituisce l'usura iniziale, poi si procede con un moderato incremento dell'usura e nella terza parte si ha un rapido aumento dell'usura.

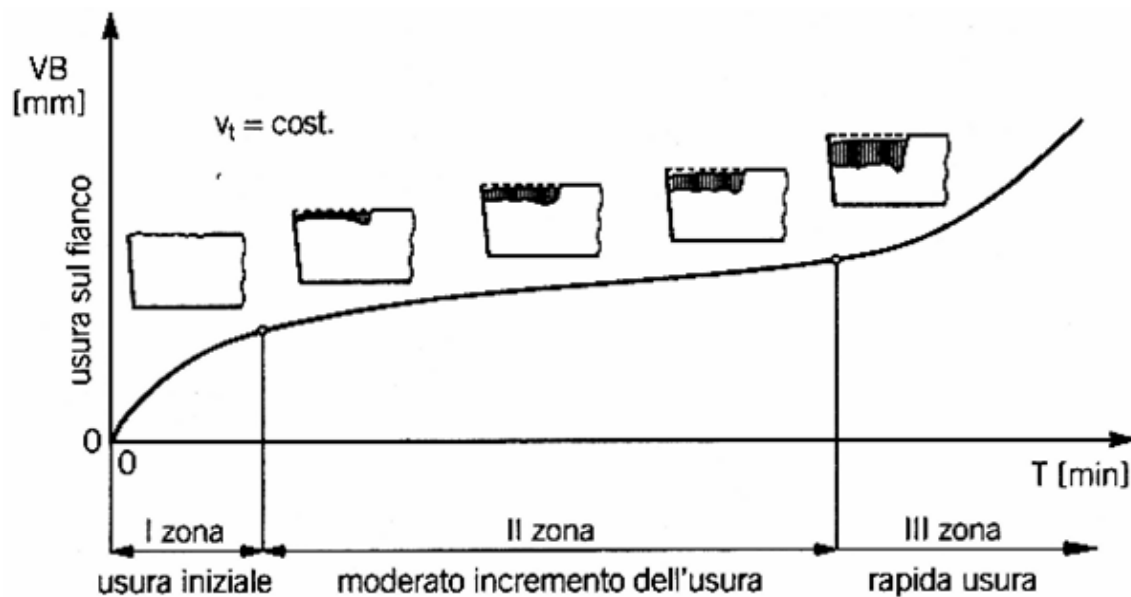


Figura 5.4 Andamento tipico del labbro di usura in funzione del tempo di contatto con il truciolo

La velocità di taglio è il parametro che influenza maggiormente l'usura e quindi la durata, essendo correlato alla temperatura nella zona di taglio: all'aumentare della velocità aumenta la temperatura, che provoca una diminuzione della resistenza meccanica del tagliente, il quale riduce il tempo utile di contatto con il materiale. Nella Figura 5.5 viene presentata l'ampiezza del labbro di usura contro il tempo di contatto per diverse velocità di taglio: all'aumentare della velocità le curve si spostano verso l'alto e la durata del tagliente diminuisce.

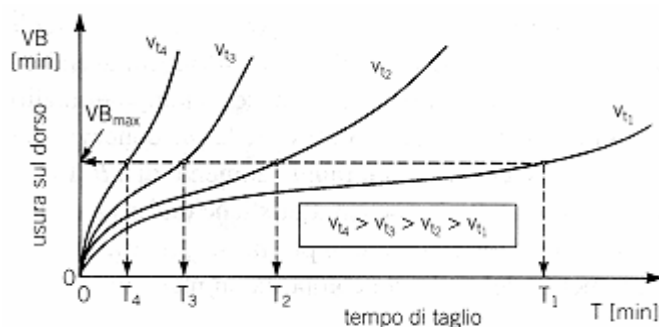


Figura 5.5 Ampiezza del labbro di usura al variare del tempo per diverse velocità di taglio.

Rappresentando graficamente la curva che si forma ponendo sulle ascisse e sulle ordinate la velocità ed il tempo si ottiene un andamento iperbolico (Figura 5.6 a)). Per ottenere la stessa relazione ma con un andamento rettilineo è necessario porre i parametri in scala logaritmica (Figura 5.6 b)).

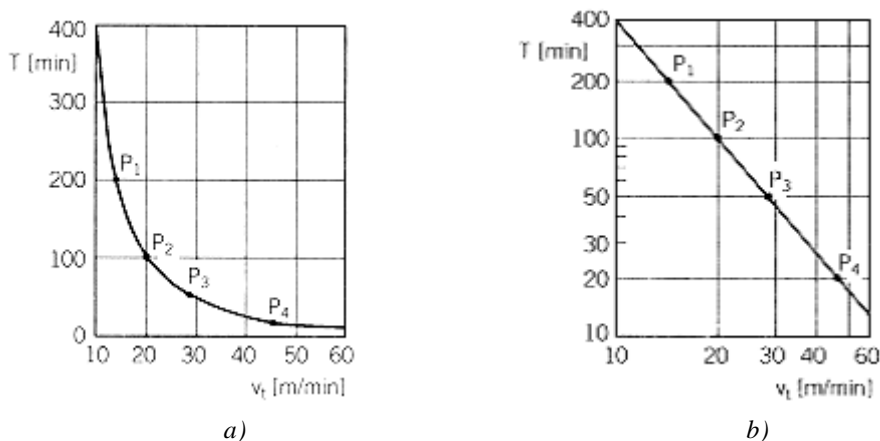


Figura 5.6 Andamento del tempo (calcolato in minuti) rispetto alla velocità (m/min): a) andamento iperbolico su scala normale; b) andamento rettilineo su scala logaritmica.

Nel capitolo seguente vengono utilizzate queste nozioni di letteratura per cogliere la dipendenza che intercorre tra la velocità di taglio e la durata dell'utensile durante la lavorazione del Nimonic 263.

Capitolo 6

Produttività – equazione di Taylor

Per quanto riguarda l'ottimizzazione dei processi di lavorazione risulta di fondamentale importanza saper analizzare dal punto di vista economico e conoscere le relazioni che permettono di valutare l'andamento dei costi al variare dei parametri, per essere così in grado di applicare la miglior strategia di economicità o di produttività alla lavorazione a seconda delle esigenze.

In generale la scelta dei parametri di taglio è strettamente legata ai seguenti aspetti: durata del tagliente, materiale dell'inserto, materiale del pezzo, condizioni di taglio, geometria dell'inserto, stabilità della lavorazione, vibrazioni e sovrametallo da asportare. Quello che tuttavia vincola maggiormente i parametri di taglio, in particolare nelle operazioni di finitura, è la rugosità superficiale desiderata a fine lavorazione, che come è noto risulta ad essi legata e può anche essere stimata tramite modelli analitici accurati, come visto in precedenza.

La teoria dell'ottimizzazione delle lavorazioni per asportazione di truciolo ha avuto un rapido sviluppo nella letteratura scientifica fin dagli anni 80, in cui sono state poste le basi per una formalizzazione del problema e sono state determinate le principali espressioni analitiche che legano i parametri economici ai parametri di lavorazione e i vincoli tecnologici esistenti.

È possibile quindi adottare uno dei diversi criteri al variare dei parametri fondamentali (profondità di passata, velocità di avanzamento, velocità di taglio) in base alle esigenze e alle condizioni di lavoro: criterio di minimo costo o il criterio di massima produttività.

6.1 CRITERIO DI MINIMO COSTO

I costi totali di tornitura dipendono dal costo unitario del posto di lavoro, dal costo dell'utensile, dai tempi passivi, dai tempi di cambio utensile, dal tempo effettivo di lavorazione e dalla durata dell'utensile secondo la seguente relazione:

$$C_t = C_p \times \left(t_p + t_l + \frac{t_{cu}}{Nt} \right) + \left(\frac{Cut}{Nt} \right) \quad (6.1)$$

La simbologia utilizzata è spiegata a fine capitolo.

L'andamento dei tempi passivi è indipendente rispetto alla velocità di taglio.

Il tempo di lavorazione è una monotona decrescente all'aumentare della velocità, al contrario del tempo per il cambio dell'utensile.

Il tempo di lavorazione diventa :

$$tl = \frac{L \times \pi \times D \times T^\alpha}{a \times 1000 \times C} \quad (6.2)$$

avendo sostituito l'espressione del numero dei giri del mandrino e la relazione di Taylor, dove il numero di pezzi che si può lavorare con un tagliente è:

$$Nt = \frac{T}{tl} \quad (6.3)$$

sostituendo le equazioni. nell'espressione del costo totale. si ottiene il costo totale della lavorazione. Il minimo di questa espressione, che rappresenta il minimo costo di lavorazione, si ottiene analiticamente eguagliando a zero la derivata del costo rispetto alla durata dell'inserito:

$$\frac{dCt}{dT} = 0 \quad (6.4)$$

questo risultato porta a determinare un valore T_e definito durata economica del tagliente , per il quale si ottiene un valore minimo del costo unitario di lavorazione. L'espressione di T ricavata risulta:

$$T_e = \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \times \left(tcu + \frac{Cut}{Cp}\right) \quad (6.5)$$

poiché il coefficiente di durata α , in prima approssimazione, può essere assunto costante, si conclude che la durata economica risulta una quantità invariante rispetto ad avanzamento e profondità di passata, in quanto, come è noto, tale coefficiente è in funzione dei parametri di taglio. Si può a questo punto ricavare la cosiddetta velocità economica inserendo nella relazione di Taylor l'espressione della durata economica.

$$V_e = \left(\frac{C}{T_e^\alpha}\right) \quad (6.6)$$

Analizzando il grafico in Figura 5.1 si vede che per una velocità di taglio pari a V_e si verifica la condizione di minimo costo, in quanto se si lavora a velocità inferiori questo porta in parte ad una diminuzione del costo degli utensili (si usura meno) ed in parte ad un aumento del costo della lavorazione, in quanto occorrerà un tempo maggiore per effettuarla; analogamente lavorando a velocità superiori avremo un aumento dei costi degli utensili contrapposto ad una diminuzione del costo relativo ai tempi di lavorazione. Si conclude quindi che il costo minimo totale unitario è il risultato di un compromesso fra le due voci di costo variabili.

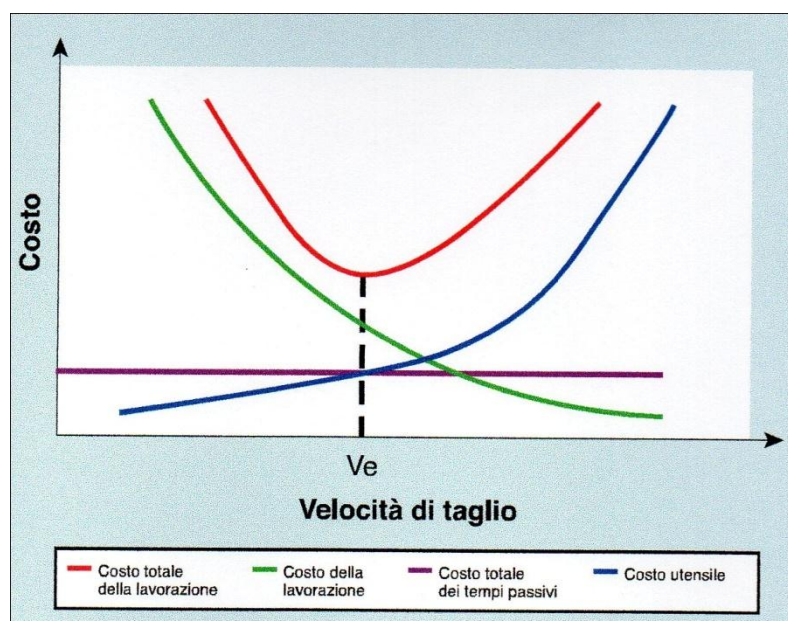


Figura 6.1 Andamento dei costi al variare della velocità di taglio.

6.2 DURATA DEL TAGLIANTE – RELAZIONE DI TAYLOR

La durata del tagliente è espressa mediante la relazione sperimentale di Taylor :

$$v \times T^\alpha = C \quad (6.7)$$

dove α : coefficiente di durata dell'utensile; C : costante di velocità che consente un minuto di durata dell'utensile.

Le curve di durata del tagliente sono diagrammi di dati sperimentali ottenuti da prove di lavorazione. Si noti che la durata del tagliente diminuisce rapidamente all'aumentare della velocità di taglio e che le condizioni del materiale del pezzo hanno una forte influenza sulla durata.

Le curve di durata in genere vengono tracciate su diagrammi in scala logaritmica dai quali si può facilmente determinare l'esponente n . È importante sottolineare che sebbene le curve di durata solitamente possano essere considerate lineari per un certo intervallo della velocità di taglio, in genere non si mantengono lineari per intervalli più estesi di velocità.

A causa della grande influenza della temperatura sulle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali, è logico supporre che l'usura sia fortemente dipendente dalla temperatura. Infatti, alcuni studi sperimentali hanno dimostrato che esiste una forte correlazione tra l'ampiezza del labbro di usura e la temperatura generata durante la lavorazione. Anche se la velocità di taglio è la variabile di processo più significativa per la durata del tagliente, anche la profondità di passata e l'avanzamento sono importanti. Pertanto l'equazione che tiene conto di tutti i parametri è scritta nel modo seguente:

$$V \times T^n \times d^x \times f^y = C \quad (6.8)$$

Noto per alcuni materiali la sostanziale differenza dei coefficiente si ottiene che i due parametri inseriti contribuiscono in maniera poco rilevante durante l'operazione di tornitura, è quindi giustificata la semplificazione adottata in precedenza.

6.3 CRITERIO DI MASSIMA PRODUTTIVITA'

Il criterio della massima produttività mira a raggiungere il maggior volume produttivo, ciò è possibile nel momento in cui il tempo di lavorazione risulta minimo. Come nel caso dei costi totali si può quindi descrivere il tempo totale di lavorazione come somma di tre contributi: tempi passivi, tempi effettivi di lavorazione dell'utensile e tempi di sostituzione o cambio dell'inserito usurato. Si arriva a stabilire che il tempo totale di lavorazione è espresso da:

$$tT = tp + tl + \frac{tcu}{Nt} \quad (6.9)$$

anche in questo caso possiamo individuare i contributi che concorrono a determinare il tempo totale analogamente a quanto già fatto per i costi. L'andamento dei vari termini è molto simile al caso del costo totale di lavorazione, per cui sono valide tutte le considerazioni fatte nel caso precedente. Ne consegue che anche l'andamento del tempo totale di lavorazione presenta un minimo che si verifica quando:

$$\frac{dtT}{dT} = 0 \quad (6.10)$$

Il tempo di massima produttività si verifica per un minimo tempo di lavorazione. Tale minimo si trova in corrispondenza di un valore di durata dell'utensile T_p definita come durata produttiva, la cui espressione risulta:

$$T_p = \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \times tcu \quad (6.11)$$

come si vede da questa espressione la durata produttiva dell'utensile dipende dal tempo di cambio dell'inserto e dal tipo di inserto in termini di coefficiente di durata. Nel caso in cui la durata del cambio inserto risulti elevata, dall'espressione sopra riportata si nota che si ottiene anche un elevato valore della durata produttiva. Questo discende dal fatto che per mantenere basso il tempo totale della lavorazione occorre cambiare meno volte l'inserto. In questo senso sarà necessario sfruttare maggiormente il tagliente, facendo lavorare con velocità di taglio minori.

Come nel caso del costo minimo, si può risalire alla velocità di massima produttività:

$$V_p = \left(\frac{C}{T_p^\alpha}\right) \quad (6.12)$$

l'andamento risultante dei tempi in funzione della velocità di taglio è riportato in Figura 6.2:

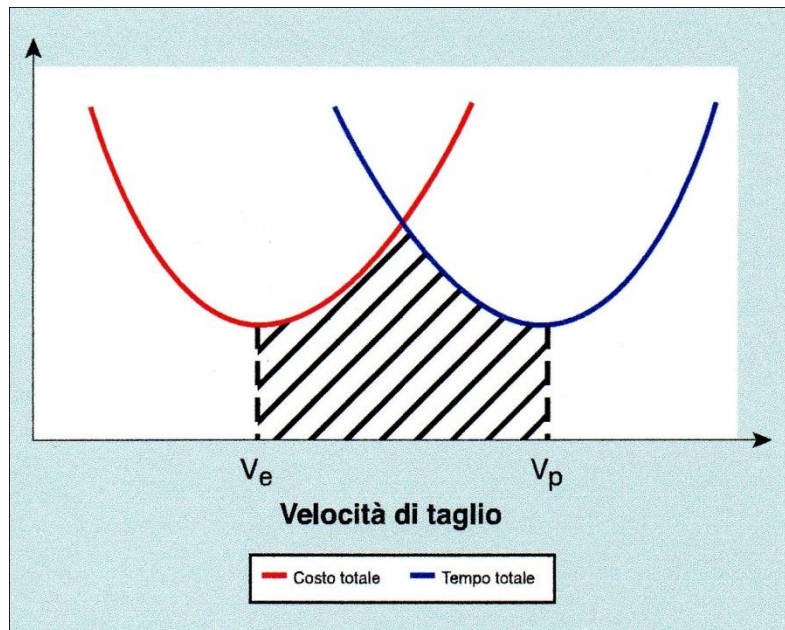


Figura 6.2 Andamento del costo totale e del tempo totale di lavorazione al variare della velocità di taglio

Dal confronto delle relazioni della velocità produttiva, e delle espressioni della durata economica e durata produttiva, è possibile concludere che la velocità produttiva, corrispondente al massimo ritmo di produzione, è sempre distinto e in particolare maggiore della velocità economica, corrispondente alla massima economicità, ed il campo di velocità compreso tra le due rappresenta l'intervallo sul quale operare, compromesso fra le due esigenze.

Tabella riassuntiva della simbologia utilizzata:

Tabella 6.1 Simboli impiegati nella trattazione analitica della stima dei costi di lavorazione.

| Lista dei simboli | |
|-------------------|--|
| C_T | Costo totale della lavorazione espresso in € |
| C_p | Costo unitario del posto di lavoro espresso in €/min. (Costo postazione). Questo costo comprende, oltre al costo unitario della macchina operatrice, tutti i costi relativi al posto di lavoro: ammortamenti, forza motrice, materiali di consumo, attrezzature, retribuzioni dell'operatore, manutenzione, quota parte delle spese generali del centro di costo, ecc. |
| t_p | tempi passivi in min. per lo scarico di un elemento finito e il montaggio sulla macchina di un altro elemento greggio, per appostamenti dell'utensile e ritorni rapidi, per soste diverse. Questi tempi non tengono conto del tempo di cambio inserto usurato, ma fanno riferimento alla sostituzione dell'inserto con uno di tipo diverso |
| t_e | tempo effettivo (tempo attivo) di lavorazione dell'inserto espressa in min. escluse le extra corse e i movimenti in rapido (truciolo - truciolo) |
| t_{tot} | tempi attivi totali relativi alla lavorazione di un pezzo in min. |
| t_{ar} | tempo di arresto della macchina in min. per il cambio di un inserto usurato con un altro nuovo dello stesso tipo |
| t_s | tempi di sostituzione inserto diviso il numero di pezzi che posso lavorare con quell'inserto espressa in min./pezzo |
| t_{set-up} | tempo di set-up macchina per un lotto espressa in min. |
| C_{in} | costo dell'inserto espresso in € |
| T | durata dell'inserto o del tagliente attivo dell'utensile espressa in min. |
| t_c | durata dell'inserto che viene fatto lavorare a velocità consigliata espressa in min. |
| T_e | durata economica espressa in min. |
| t_t | tempo totale espresso in min. |
| N_t | Numero di pezzi che si possono lavorare corrispondenti ad una determinata durata "T" |
| V_t | Velocità specifica di taglio espressa in m/min. (costante di Taylor = velocità tale per cui il tagliente attivo dell'inserto ha una durata T=1 min.) |
| α | Coefficiente di durata, funzione della coppia materiale dell'inserto - materiale del pezzo da lavorare. In questo testo si fa riferimento al valore di α fornito da Taylor, che per lavorazioni con utensili in acciaio rapido su acciaio vale: $\alpha=0.122$ |
| L | lunghezza del pezzo da lavorare (Corsa) espressa in min. |
| D | diametro della superficie lavorata espresso in mm |
| a | velocità di avanzamento espresso in mm/giro |
| n | numero di giri del pezzo in lavorazione espresso in giri/min. |
| v | Velocità di taglio espressa in m/min. |
| V_e | Velocità di taglio economica espressa in m/min. |
| V_p | Velocità di taglio di massima produzione espressa in m/min. |
| P_u | profitto "utile" espresso in €/min. |
| R_v | Ricavi in € |

6.4 ESPERIENZA

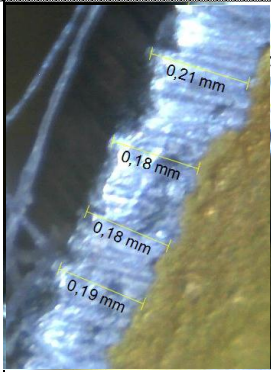
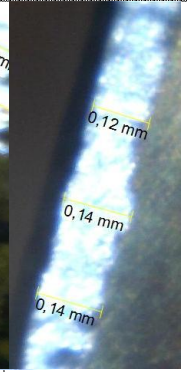
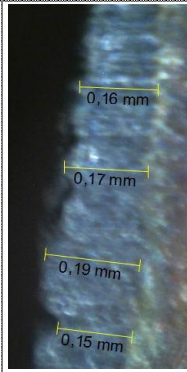
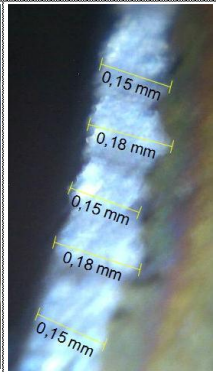
Si è ricercata in primo luogo alla durata del tagliente, essendo note le quantità dei diversi costi fissi riguardanti la macchina, utensili, tempi attivi e tempi di attrezzaggio. Sfortunatamente l'organizzazione precedente all'acquisizione dei dati non è stata sufficientemente studiata, di conseguenza i dati acquisiti, qui di seguito riportati, fanno parte di un lavoro che dovrebbe esser stato molto più esauriente attraverso diverse prove e verifiche. Si riporta quindi il lavoro svolto a titolo di incipit per un lavoro futuro.

Non essendo in grado di determinare la velocità necessaria per produrre un usura di 2 decimi in un minuto di contatto dell'inserto, si è proceduto per tentativi, prendendo come riferimento l'usura utile sul fianco pari a 0.2mm. Si è ritenuto infatti che questo valore di usura fosse

ideale per ottenere una discreta produttività unita ad una ottimale finitura superficiale, senza che il materiale si incrudisse eccessivamente.

Ottenuta per tentativi l'usura desiderata, si è cercato il valore della costante e quindi di α da inserire all'interno della formula di Taylor, in modo tale da essere in grado di effettuare delle previsioni in termini di usura del tagliente ed ottenere velocità e tempi più adeguati per la lavorazione.

Tabella 6.1 *Acquisizione dei dati per riprodurre la curva di Taylor per il materiale Nimonic 263.*

| OPERAZIONE(torn=1 sfacc=2 conica=3) | | | | |
|-------------------------------------|--|---|--|--|
| Riferimento Operazione | 2" | 2" | 2" | 2" |
| Note | change prova | change prova | change prova | change prova |
| Geometria | CNMM | CNMM | CNMM | CNMM |
| Dimensioni | 190624 | 190624 | 190624 | 190624 |
| Qualità | AC 3000 | AC 3000 | AC 3000 | AC 3000 |
| Geometria Rompitruciolo | N-HP | N-HP | N-HP | N-HP |
| vc (m/min) | 28 | 24,5 | 24,5 | 22,75 |
| fn (mm/giro) | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| ap (mm) | | | | |
| tc (min) | 4 | 6 | 8 | 9,5(FINITA LA PASSATA) |
| Usura (decimi) | 2 | 1,3 | 1,7 | 1,7 |
| Foto |  |  |  |  |

Dalle prove eseguite, riassunte nella Tabella 6.1, è emerso che α assume un valore prossimo a 0.2. Infatti prendendo come riferimento i dati presenti della prima colonna: velocità 28 m/min, avanzamento 0.6 mm/giro e profondità di passata approssimato di 1 mm per un tempo di contatto di 4 min si ottiene l'usura di circa 2 decimi.

Cambiando ora il parametro velocità all'interno della formula di Taylor, ed ipotizzando α uguale a 0.2 otteniamo il tempo necessario affinché sia prodotta la stessa usura: adottando una velocità di 24.5 m/min per ottenere un usura pari a due decimi bisogna attendere un tempo di contatto pari a 7 minuti e 50 secondi. Durante questa fase non è stato possibile mantenere in tale tempo di contatto ma è stato necessario terminare la passata a 6 minuti. Come ci si aspetta comunque l'usura risulta minore ai due decimi di riferimento. Nella terza colonna viene presentata un'altra passata effettuata alla stessa velocità nella quale è stato possibile mantenere il contatto per un tempo maggiore; dopo 8 minuti la lavorazione è stata interrotta ed è stata rilevata sull'inserito una usura di circa 0.17mm.

Una quarta ed ultima prova è stata condotta diminuendo ulteriormente la velocità fino a 22.75 m/giro, dalla quale ci si aspetta un tempo di contatto utile di 11 minuti e 15 secondi. In questo caso la lavorazione è finita dopo un tempo di contatto di 9 minuti e 30 secondi, ottenendo un'usura di 0.17 mm.

Da questi risultati, inserendo i valori noti dall'azienda all'interno della formula (), si ottiene il valore della velocità di taglio economica per questa lavorazione: ipotizzato alfa uguale a 0.2, il costo del tagliente pari a 2.5 euro, 1.3 euro di costo macchina al minuto ed un tempo medio di cambio dell'utensile pari a 3 minuti, il valore di velocità economica risulta essere di poco più di 20 m/min, con un tempo di contatto di circa 20 minuti.

Come sopra esposto la velocità di taglio risulta essere molto bassa poiché il tempo impiegato per cambiare l'utensile risulta essere rilevante se confrontato con il tempo attivo di lavorazione, quindi è necessario adottare una velocità inferiore per ottenere un tempo di contatto utile maggiore, per cambiare meno volte l'inserto.

La veridicità di questo risultato è da verificare, ma può rappresentare il punto di partenza per la produzione dei prossimi pezzi, nei quali si possono effettuare diverse prove per poi essere in grado di raggiungere il giusto compromesso tra produttività ed economicità che l'azienda ritiene necessario per un maggior profitto.

Un'altra complicazione è rappresentata dal fatto che la forza di taglio e di conseguenza l'usura del tagliente non presenta un andamento monotono con la velocità. In letteratura si trova infatti che alcuni studi condotti sulla lega Inconel 718, hanno rivelato che all'aumentare della velocità si ha un massimo nella forza di taglio che poi diminuisce. Questo è dovuto al fatto che le fasi presenti all'interno della lega, principalmente la gamma primo, presenta una maggiore coerenza quando viene raggiunta una certa temperatura, che facilita lo scorrimento dei piani e quindi la rimozione del materiale. Al di sotto di una certa temperatura quindi all'aumentare della velocità si ha un progressivo aumento dello sforzo necessario per la rimozione del truciolo. Sopra a questa temperatura si assiste invece ad un calo dello sforzo all'aumentare della velocità: le fasi coerenti con la matrice facilitano lo scorrimento dei piani che si traduce in una diminuzione di energia da applicare, vengono quindi ad essere inferiori le usure sul tagliente.

Non è stato possibile però in questo elaborato risalire alla temperatura alla quale avviene il cambiamento sopra descritto. Ciò rappresenta un'ulteriore complicazione che bisogna tenere in considerazione nella prossima trattazione.

CONCLUSIONI

Dall'analisi eseguita durante le lavorazioni al tornio della super lega al Nichel, la Nimonic 263, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Per quanto riguarda le micro-durezze eseguite nei trucioli prodotti nelle operazioni di tornitura si è riscontrato il variare del valore al variare della posizione in cui esse vengono effettuate, in particolare, come era prevedibile, il materiale a ridosso con l'inserto con l'inserto presenta una maggior deformazione plastica che si riscontra con un valore più elevato di micro-durezza. Non è stato trovato, invece, alcun riscontro per quanto riguarda la differenza di valori micro-durezza al variare del diverso stato di usura del tagliente. Questo può essere dovuto al fatto che i valori sebbene presumibilmente diversi abbiano una differenza minima che non è stato possibile cogliere attraverso le prove eseguite come prima spiegato. Si suggerisce quindi di effettuare la prova prendendo dei trucioli ancora più rappresentativi ed eseguire la prova in modo ancor più rigoroso, prestando attenzione soprattutto alla scelta della resina per l'inglobamento del truciolo.

Inoltre sarebbe interessante andare a verificare la dipendenza dei valori di micro-durezza con i parametri di taglio; Ciò che ci si aspetta è che il fattore che maggiormente influenza il gradiente di variazione di micro-durezza sia la velocità rispetto all'avanzamento per una profondità di passata costante. Il massimo valore di micro-durezza verrà raggiunto all'aumentare dell'avanzamento a causa dell'influenza sia dello spessore del truciolo che della lunghezza di contatto tra inserto e truciolo.

- Per quanto riguarda la rugosità superficiale riscontrata non si intende variare alcun parametro di taglio per non rischiare di compromettere la stabilità dimensionale a causa di un eccessivo sforzo. La soluzione adottata per il cambio dell'utensile durante l'ultima passata, che prevede l'uscita programmata dell'inserto usurato e l'entrata di quello nuovo attraverso un taglio conico, verrà ripresa anche nelle lavorazioni successive poiché garantisce la finitura superficiale richiesta.
- Infine per quanto riguarda le prove eseguite seguendo la teoria ipotizzata da Taylor è necessario eseguire altre prove di verifica a partire dai risultati ottenuti. Il valore di α ipotizzato potrebbe essere diverso da 0.2, ma può rappresentare il punto di partenza per le prove successive. Inoltre è necessario tenere presente dell'andamento non lineare dello sforzo di taglio con la velocità, causato dall'elevata temperatura che oltre un certo dato favorisce lo scorrimento dei piani per la maggiore coerenza delle fasi presenti all'interno della matrice.

Bibliografia

- A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. dudzinski, D. Larrouquere (2006). Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with Coated carbide tools.
- Carsten Siemers, B. Zahar, D. Ksiezzyk, P. Rokicki, Z. Spatz, L. Fusiva, J. Rosler, K. Saksl (2011). Chip formation and machinability of Nickel-base superalloys.
- C. Ezilarasan, V.S. Senthil Kumar, A. Velayudham, K. Palanikumar (2011). Modelling and analysis of surface roughness on machining of Nimonic C-263 alloy by PVD coated insert.
- D.G. Thakur, B. Ramanmoothy, L. Vijayaraghavan (2009). Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning.
- Dilabag Singh, P. Venkateswara Rao (2006). A surface roughness prediction model for hard turning process
- E.O. Ezugwu (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys.
- I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie (1998). Machinability of Nickel-base super alloys: a general review.
- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid. Tecnologia meccanica.
- Y.S. Liao, H.M. Lin, J.H. Wang (2007). Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools.

Siti web

http://eprints.adm.unipi.it/575/1/UT_2009_003_INT@038-043.pdf (ultimo accesso 28/05/12)

<http://www.sandvik.coromant.com/it-it/pages/default.aspx> (ultimo accesso 27/08/12)

Ringraziamenti

Si vuole ringraziare innanzitutto l'azienda presso la quale ho svolto l'attività di tirocinio, Asfo spa, ed in particolare: Davide Busato che è stato sempre disponibile per ogni evenienza ed in modo semplice e preciso ha sempre risposto ad ogni domanda e ha fornito sempre dei consigli utili; Simon, che nonostante i mille quesiti e dubbi ha sempre risposto in modo cordiale anche alle banalità; i ragazzi del laboratorio metallografico e tutti gli operatori a bordo macchina, poiché ognuno mi ha fornito un insegnamento.

Ritengo sia stata una esperienza molto utile per il mio bagaglio formativo, uno sguardo al mondo del lavoro reale che non si impara leggendo i libri.

È necessario quindi, ringraziare tutti quelli che mi hanno accompagnato fino al raggiungimento di questo primo traguardo, che mi hanno sostenuto in ambito economico: mamma e papà; che mi hanno sostenuto in ambito morale: mamma e papà; e tutti i parenti che hanno sempre creduto in me: mio fratello, gli zii, i cugini e i nonni, che mi chiamano ingegnere già dal primo anno che mi sono iscritto.

Un grazie a tutti gli amici della compagnia che non mi hanno mai fatto mancare momenti di spensierata felicità, ai nuovi amici universitari con i quali ho condiviso tre anni di sofferenza e di festa.

Grazie Nicoletta!

Alex Persico