

# La lavorabilità dei materiali metallici

Confronto tra i metodi proposti per la misura della lavorabilità. Alcuni risultati sperimentali.

Il problema della lavorabilità dei materiali metallici presenta delle gravi difficoltà allorchè si desiderano ottenere soluzioni rigorose.

I diversi sistemi adottati dall'industria, pur essendo utili per stabilire la maggiore o minore difficoltà con cui può essere lavorato un materiale, non tengono conto in genere che di un fattore od al massimo di due, non essendo possibile evidentemente classificare i materiali metallici in base ad una proprietà che è così variabile poichè funzione di un numero elevatissimo di parametri.

Uno studio rigoroso sull'argomento dovrà perciò cercare innanzi tutto di identificare questi parametri, possibilmente isolarli, considerandone l'influenza, separata dapprima ed infine complessiva, sulla lavorabilità del materiale.

Procedendo per ordine cerchiamo di dare una definizione della lavorabilità attraverso l'elencazione dei fattori da cui essa dipende non senza prima avere ricordato la distinzione di Ernst tra la lavorabilità vera e propria, che risulta dal grado di « difficoltà » con cui si può lavorare un metallo con asportazione di truciolo, e la attitudine a dare superfici finite (a parità di condizioni di taglio) che risulterebbe collegata con l'inverso della resilienza.

I principali fattori che influenzano la lavorabilità sono:

## a) Stato Metallurgico del pezzo:

1) *Struttura cristallina.* Molti studi si sono fatti per collegare la struttura cristallina degli acciai (Woldman) e delle ghise (Field e Stansbury) con la durata dell'utensile. La grossezza della grana è normalmente indice di buona lavorabilità salvo che per i materiali molto teneri e duttili in cui è la grana fine che porta ad una lavorabilità migliore.

La presenza di una seconda fase insolubile o quasi nella principale modifica le caratteristiche di lavorabilità. Se questa seconda fase è rappresentata da inclusioni più dure del metallo (ossidi duri di Alluminio, silicati nell'acciaio o silicio libero nell'alluminio) riduce la durata dell'utensile, al contrario influisce la presenza di particelle più tenere alla temperatura di taglio, costituenti elementi di lubrificazione (piombo nell'acciaio, grafite nelle ghise o bismuto) che riducano il coefficiente di attrito truciolo-utensile, oppure elementi che diminuiscano la resistenza allo scorrimento del materiale come i solfuri (di Mn).

Le percentuali di questi elementi aggiunti sono variabili tra 0,08 e 0,33 %.

2) *Durezza.* È collegata entro certi limiti con la lavorabilità (vedasi fig. 1). Sono da tenere presenti alcune anomalie a questa regola infatti ad esempio si è verificato che acciai austenitici al manganese con durezza inferiore ai 200 Brinell, presentano una lavorabilità minima, mentre acciai normali anche di durezza superiore siano facilmente

lavorabili. In spiegazione di questo fatto si è rilevato che la lavorabilità è più collegata con la durezza dei singoli granuli, durezza alla temperatura di taglio, durezza del truciolo che, per effetto della pressione esercitata su di esso, può essere fino a tre volte maggiore di quella originaria a freddo del materiale.

Sono state anche proposte relazioni empiriche tra la durezza e la forza di taglio

$$X = C_p (1000 S)^r \text{ (Kronenberg)}$$

dove: X = forza di taglio

$C_p$  = costante dipendente dal materiale ottenuta in funzione della durezza con le formule

$$C_p = 4,26 \sqrt[2.5]{H(85 - a)} \text{ per gli acciai}$$

$$C_p = 1,07 \sqrt[1.5]{H} \sqrt[1.5]{85 - a} \text{ per le ghise.}$$

S = Sezione del truciolo

r = esponente dipendente dal materiale

a = angolo di spoglia frontale dell'utensile

H = durezza del materiale.

3) *Altre proprietà meccaniche.* Resistenza a trazione (carico di rottura) (vedasi fig. 1) resistenza allo scorrimento, allungamento.

Nessuno di questi fattori indica in modo preciso la lavorabilità poichè la temperatura modifica i valori di questi parametri i quali sono peraltro ottenuti da prove statiche eseguite in condizioni ben diverse da quelle che si verificano durante il taglio.

4) *Lavorazioni precedenti del materiale (a freddo ed a caldo) ed incrudimento.* La lavorazione a freddo (es. trafilatura) porta ad una migliore lavorabilità. I risultati del Research Committee on Cutting Fluids sono:

— Negli acciai con % di carbonio fino a 0,30 le laminazioni o trafilature a freddo danno maggiore lavorabilità che se fatte a caldo;

— Negli acciai con 0,30-0,40 % di C la differenza non è apprezzabile;

— Negli acciai con  $C > 0,40$  % sono preferibili le laminazioni o trafilature a caldo per avere una maggiore durata dell'utensile. In questo caso è raccomandato il trattamento di ricottura.

5) *Composizione chimica.* Anche queste relazioni tra la composizione chimica e la lavorabilità sono piuttosto incerte.

## b) Condizioni di taglio.

Velocità di taglio, profondità di passata, avanzamento. Condizioni di lubrificazione e refrigerazione (controllo del coefficiente di attrito tra utensile e truciolo).

c) Tipo di utensile impiegato nella prova (forma, angoli caratteristici di taglio, composizione e trattamenti subiti, durezza, finitura superficiale, stato di affilatura).

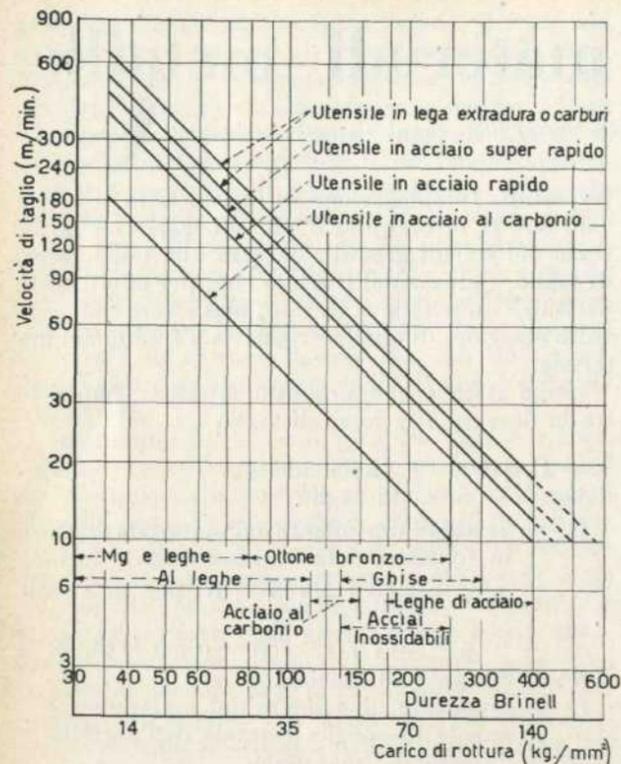


Fig. 1.

- d) Tipo di lavorazione (contatto continuo tra pezzo ed utensile o intermittente con urti) e di macchina utensile usata (Rigidità, Vibrazioni).
- e) Grado di finitura raggiunto. Questo elemento è collegato con la duttilità del materiale cioè con la sua possibilità di fare fluire plasticamente il truciolo senza la formazione del pretruciolo che peggiora la finitura. Naturalmente la finitura è anche dipendente dalle condizioni di taglio ed in particolare dalla pressione specifica di taglio che, se alta, può provocare vibrazioni dannose.

Quanto sopra mette in evidenza quanto numerosi siano i fattori da cui dipende la lavorabilità, tra i quali quelli ricordati sono soltanto i principali.

I fattori metallurgici che hanno interessato il Woldmann, il Bonte, Fleischmann, Janitzky e Wolfe, non saranno ripresi in considerazione che brevemente, dovendosi limitare questo studio a quei fattori determinanti la cui misura può essere assunta come indice di lavorabilità di un materiale.

Poichè i fattori di cui si parla al N. a) sono collegati al materiale mentre le condizioni di taglio possono essere fissate indipendentemente, sarà necessario per avere un indice di lavorabilità — connesso con il materiale — fissare delle condizioni di taglio opportune nonchè gli elementi di cui al c), d) ed osservare il comportamento dei diversi materiali misurando quei fattori che meglio rivelano la attitudine alla lavorabilità.

Poichè in questo problema a più variabili non è possibile una misura simultanea di più parametri è necessario scegliere, ed in questo è la difficoltà maggiore, quello che rappresenta meglio con le sue variazioni il fenomeno.

Negli studi fatti finora sull'argomento, e sono abbastanza numerosi, si sono messe in evidenza:

- 1) le forze di taglio, valutate con misure dinamometriche per la determinazione della potenza assorbita nel taglio;
- 2) la quantità di calore prodotta misurata con calorimetri e le temperature raggiunte dall'utensile misurate con coppie termoelettriche;
- 3) la velocità economica che assicura una prefissata durata dell'utensile misurata quest'ultima in « tempo » tra due affilature od in volume di truciolo asportato;
- 4) il grado di finitura superficiale.

Tra le prove proposte per ricavare l'indice di lavorabilità si ricordano:

- 1) Prove per la misura delle forze di taglio e potenza assorbita:
  - a) Nella lavorazione al tornio con strumenti dinamometrici (ad esempio la prova Schlesinger abbinata alla misura del fattore di abrasione che il materiale esercita sull'utensile);
  - b) Nella lavorazione al trapano con dinamometro per il rilievo della coppia di taglio e della resistenza all'avanzamento della punta.

2) Prove per la misura della quantità di calore sviluppata durante il taglio come trasformazione del lavoro di taglio. I metodi calorimetrici proposti da A. O. Schmidt possono applicarsi alle lavorazioni al trapano.

3) Prove per la misura della temperatura dell'utensile che viene eseguita con coppie termoelettriche durante la tornitura in condizioni di taglio definite (Boston e Gilbert). Sono stati proposti anche metodi ottici per questa prova (pirometri) basantisi sulla colorazione del truciolo nell'attimo del distacco.

4) Prove per la misura della durata dell'utensile. Sono in genere basate sul rilievo del tempo tra due affilature o sul logorio esercitato dal materiale sull'utensile in un dato tempo, od ancora sul volume o peso di truciolo asportato tra due affilature.

5) Prove di lavorazione con misura del grado di finitura superficiale eseguita con analizzatori di superficie capaci di registrare in un grafico le asperità.

6) Altre prove proposte:

a) Prove di penetrazione sul trapano (Boston e Kessner). In essa una punta elicoidale standard fora con una velocità di taglio prefissata e costante e con un avanzamento provocato da un peso che grava sulla punta e che sarà perciò scelto in base alla resistenza che la punta incontra alla penetrazione. La profondità del foro eseguito dopo un dato tempo è connessa con la lavorabilità del materiale;

b) Prova di taglio con sega (A. S. Kenneford) in essa si misura il tempo richiesto per segare una barra di dimensioni prefissate;

c) Misure di durezza e passaggio all'indice di lavorabilità mediante formule empiriche non molto precise e talvolta non applicabili.

Prima di discutere i vari tipi di prova occorre

ricordare ancora come venga espresso nei manuali americani l'indice di lavorabilità I.

La prova eseguita è basata sulla durata dell'utensile e l'indice I è indicato come rapporto tra la velocità di taglio economica per una durata dell'utensile di 20 minuti (Velocità di Taylor) per il materiale in esame e quella corrispondente all'acciaio (laminato o trafilato a freddo) AISI B 1112 lavorato ad una velocità di taglio di 60 m/min, per il quale  $I = 100$ .

Risultano così I minore di 100 tutti i materiali meno lavorabili del AISI B 1112, ed I maggiore di 100 i più lavorabili. Da queste tabelle che variano dai minimi degli acciai inossidabili ( $I = 25$ ) alle leghe al Magnesio ( $I = 500-2000$ ), si ottengono le velocità di taglio economiche per i vari materiali, moltiplicando quella del materiale tipo AISI B 1112 per l'indice di lavorabilità  $\frac{I}{100}$  (1).

In altro modo è stato definito l'indice di lavorabilità da Schlesinger il quale ha assunto il prodotto della forza principale di taglio applicata all'utensile e misurabile con un utensile dinamometrico, per il fattore di usura rilevato attraverso una prova di abrasione esercitata dal pezzo rotante contro una sferetta di acciaio temperato premuta con carico definito. I due fattori del suddetto prodotto dovrebbero dare una informazione abbastanza precisa sulla lavorabilità del materiale, anche perchè assolutamente indipendenti tra di loro (il rame ad esempio ha una bassa resistenza al taglio, molto minore di un acciaio, ma ha un effetto di usura molto superiore all'acciaio). Attraverso una unificazione delle modalità di prova si arriva alla determinazione del coefficiente di usura.

Discussione delle prove proposte.

Si deve premettere che alla base di questa discussione stanno due considerazioni:

- 1) Le prove portano a risultati solo approssimati in quanto è possibile basarle su uno o due parametri;
- 2) Le prove devono per quanto possibile essere di facile esecuzione altrimenti non hanno utilità pratica.

Il punto 1) porta alla necessità di scegliere i parametri da misurare con estrema cura per individuare quelli che hanno una maggiore influenza e che rappresentano meglio la proprietà di lavorabilità del materiale in determinate condizioni di taglio.

Gli elementi che possono essere meglio misurati a questo scopo sono: Forze di taglio (o potenze assorbite), calore generato durante il taglio (o temperatura raggiunta dall'utensile), durata dell'utensile, finitura superficiale del pezzo lavorato.

(1) L'indice di lavorabilità può anche essere espresso sotto forma di potenza richiesta per lavorare un dato tipo di materiale in certe condizioni di taglio definite. Così ad esempio indicando con 1 la potenza richiesta per lavorare le leghe di magnesio (le più lavorabili) si avranno valori 1,8 per leghe di alluminio, 3,5 per ghise, 6,3 per acciai e così via. Anche la durata dell'utensile, le velocità di taglio economiche possono essere elementi di indicazione della lavorabilità.

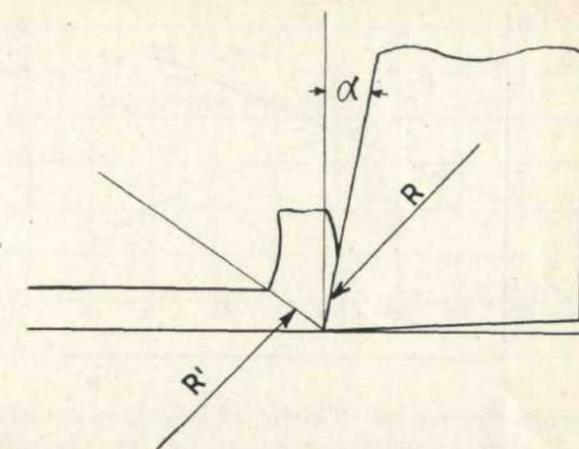


Fig. 2.

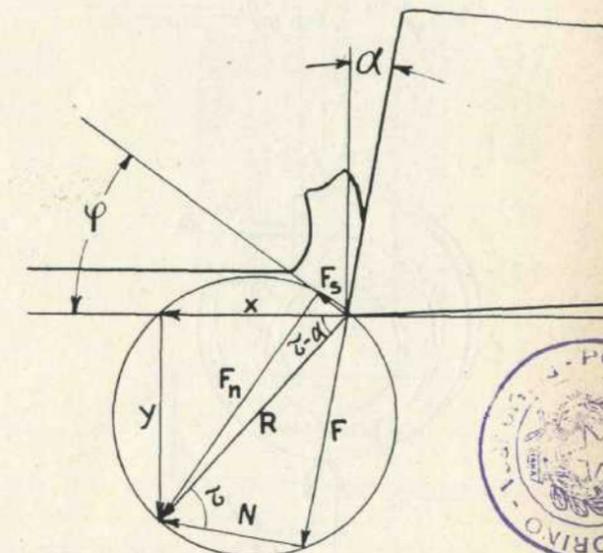
Misura della lavorabilità attraverso le forze di taglio.

Per comprendere come la misura delle forze di taglio (in particolare la forza principale di taglio) rappresentino e comprendano numerosi fattori di lavorabilità tra quelli elencati più sopra, possiamo rifarci alla teoria generale del taglio ortogonale (Merchant) che imposta in forma matematica il fenomeno del taglio e da questa trae una relazione che dimostri come le forze di taglio siano collegate con la lavorabilità.

Il punto di partenza è dato dalle condizioni di equilibrio del truciolo sotto l'azione di due forze:  $\bar{R}$  applicata dall'utensile al truciolo che si suppone abbia come punto di applicazione il centro dell'area di contatto tra utensile e truciolo, ed  $\bar{R}'$  che il pezzo applica al truciolo dal piano di scorrimento (fig. 2).

Si può trascurare la coppia che ha origine dalla mancanza di allineamento di R con R', poichè ha un valore molto piccolo.

Fig. 3.



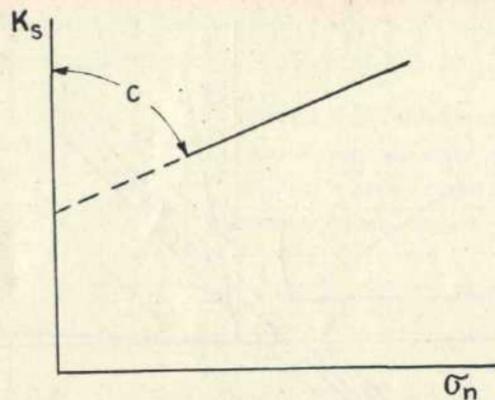


Fig. 4.

Consideriamo ora la risultante  $R$  che l'utensile applica al pezzo (fig. 3) e scomponiamola:

1) secondo le direzioni orizzontale di taglio  $X$  e normale  $Y$ . Gli estremi di queste due componenti stanno su una circonferenza di diametro  $R$ ,

2) nelle due direzioni  $F$  ed  $N$  cioè quella della faccia di taglio e quello normale. Poichè  $F$  ed  $N$  sono collegate dal valore del coefficiente di attrito  $f$  che si sviluppa tra le superfici a contatto del truciolo ed utensile, risulta:

$$\frac{F}{N} = \tan \tau = f$$

3) nelle direzioni del piano di scorrimento ed in quella normale ad esso  $F_s$  e  $F_n$ .

Da queste scomposizioni risulta

- 1)  $X = R \cos (\tau - \alpha)$
- 2)  $Y = R \sin (\tau - \alpha)$  (dove  $\alpha$  è l'angolo di
- 3)  $F_s = R \cos (\varphi + \tau - \alpha)$  spoglia frontale)
- 4)  $F_n = F_s \tan (\varphi + \tau - \alpha)$

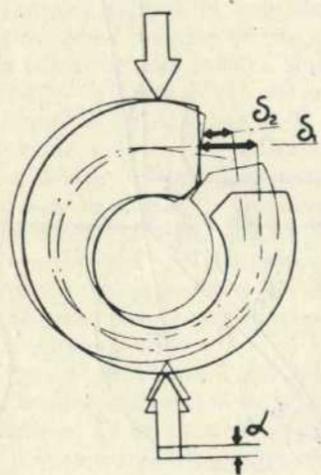
Introduciamo ora la tensione di scorrimento  $\sigma_s$ :

( $A_s$  = area del piano di scorrimento)

- 5)  $\sigma_s = \frac{F_s}{A_s}$   $\text{mento} = \frac{a p}{\sin \varphi}$ ,  $a$  = avanzamento,  $p$  = profondità di passata).

- 6)  $F_s = A_s \sigma_s = \frac{a p}{\sin \varphi} \sigma_s$

Fig. 5.



dalla 3) si ha:

- 7)  $R = \frac{F_s}{\cos (\varphi + \tau - \alpha)}$

dalla 1) e 7):

- 8)  $X = \frac{a p \sigma_s \cos (\tau - \alpha)}{\sin \varphi \cos (\varphi + \tau - \alpha)}$

Per rendere la espressione di  $X$  indipendente dalla tensione di scorrimento  $\sigma_s$  e solo funzione di  $\varphi$  e delle costanti del sistema, è necessario introdurre la resistenza del materiale.

Supponiamo che la resistenza del materiale allo scorrimento sia costante per un dato materiale lavorato, ( $K_s$  = costante); questa ipotesi si è dimostrata sufficientemente precisa per i materiali a struttura non cristallina, mentre per i materiali a struttura cristallina (ed è il caso che si incontra più frequentemente si è assunto la relazione

- 9)  $K_s = K_0 + \varepsilon \sigma_n$

dove  $\varepsilon$  e  $K_0$  sono costanti del materiale ed il  $\sigma_n$  è lo sforzo di compressione nel piano di scorrimento.

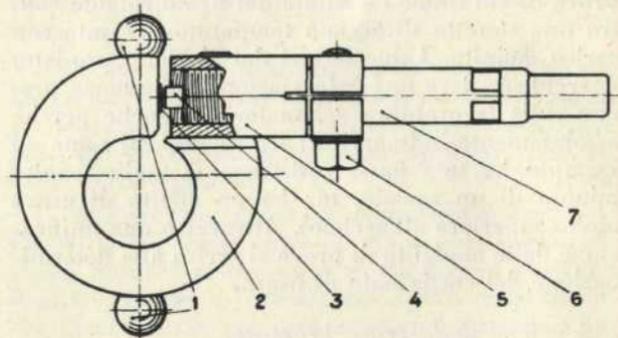


Fig. 6.

È evidente che durante il taglio la tensione di scorrimento uguaglia la resistenza del materiale allo scorrimento ( $\sigma_s = K$ ) sul piano di scorrimento stesso.

D'altra parte

- 10)  $\sigma_n = \frac{F_n}{A_s} = \frac{F_s}{A_s} \tan (\varphi + \tau - \alpha) = \sigma_s \tan (\varphi + \tau - \alpha)$

Sostituendo il valore di  $\sigma_n$  trovato sopra nella (9) si ha:

- 11)  $K_s = K_0 + \varepsilon K_s \tan (\varphi + \tau - \alpha)$  da cui:

$$K_s = \frac{K_0}{1 - \varepsilon \tan (\varphi + \tau - \alpha)}$$

perciò:

- 12)  $X = \frac{a p K_0 \cos (\tau - \alpha)}{[1 - \varepsilon \tan (\varphi + \tau - \alpha)] \sin \varphi \cos (\varphi + \tau - \alpha)}$

Risulta perciò che  $X$  (forza principale di taglio) è dipendente da:

- 1) Sezione del truciolo;
- 2) coefficiente di attrito fra truciolo ed utensile;
- 3)  $\varepsilon$ ,  $K_0$  (costanti del materiale);

4) resistenza allo scorrimento del materiale.

Poichè il materiale più lavorabile dà luogo ad una forza  $X$  minore, cerchiamo le condizioni che realizzano la  $X$  minima. Per trovare il valore dell'angolo  $\varphi$  che rende minima la  $X$  si ottiene derivando la (12) ed uguagliando la derivata a 0.

Si ha così:

- 13)  $2\varphi + \tau - \alpha = c$

Sostituendo il valore della (13) nella (12):

- 14)  $X = a p K_s [\cotg \varphi + \tan (C - \varphi)]$

- 15)  $X = a p K_0 \frac{[\cotg \varphi + \tan (C - \varphi)]}{1 - \varepsilon \tan (C - \varphi)}$

La (15) permette di trovare il valore di  $X$  in funzione dell'angolo di scorrimento, e delle tre costanti del materiale  $\varepsilon$ ,  $K$  e  $C$ .

Dalla (13) risulta che aumentando il coefficiente di attrito fra utensile e truciolo (cioè  $\tau$ ), deve diminuire  $\varphi$  e cioè anche diminuire il rapporto di taglio

$$r_t = p/h = \frac{\sin \varphi}{\cos (\varphi - \alpha)}$$

Questo perchè il valore di  $C$  rimane costante.

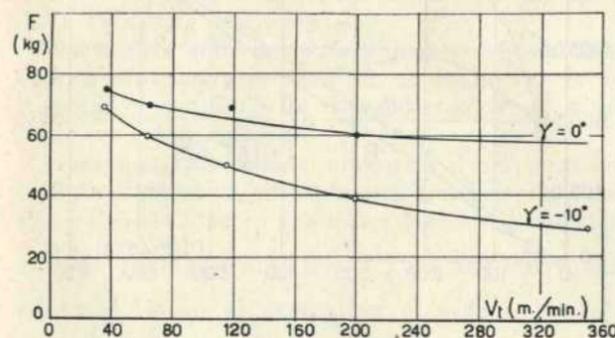


Fig. 7.

Dalla (15) risulta anche che diminuendo  $\varphi$  aumenta la forza  $X$ , dal che appare che il rapporto  $r_t$  è un utile indice del rendimento di taglio.

Le tre costanti del materiale  $E$ ,  $K_0$ ,  $C$  sono collegate tra loro dalla relazione (9) che può essere rappresentata in un diagramma (fig. 4) dove alle ascisse siano riportati i valori di  $\sigma_n$  ed alle ordinate i valori di  $K_s$ ,

Poichè  $C = \cotg^{-1} \varepsilon$  ed  $\varepsilon = \frac{K_s - K_0}{\sigma_n}$ ;  $C$  è rappresentato nella figura dall'angolo tra la linea  $r$  e la verticale.

Da tutte queste considerazioni risulta che le condizioni di taglio sono buone quando l'angolo  $\varphi$  è grande e la forza  $X$  ridotta.

Perchè ciò si verifichi occorre avere un coefficiente di attrito basso, un valore basso del  $K_s$  del materiale ed un elevato valore di  $C$ .

Da quanto precede risulta quindi evidente la relazione tra la forza  $X$  ed alcuni fattori del materiale connessi con la lavorabilità.

Naturalmente la misura della  $X$  non dà una indicazione esauriente sulla lavorabilità del mate-

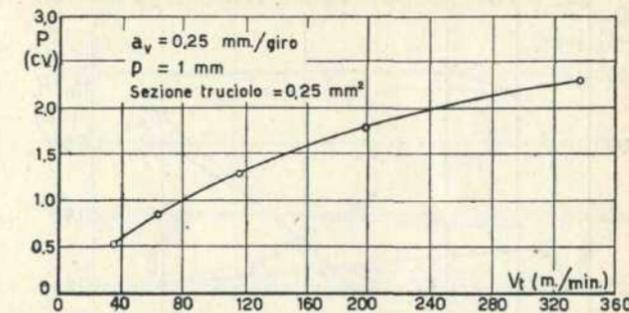


Fig. 8.

riale in quanto molti fattori da cui questa proprietà dipende non influiscono sensibilmente sulla  $X$ , e perciò sfuggono a questa misura.

La misura della forza  $X$  può essere fatta con dinamometri indiretti, cioè del tipo atto a trasformare lo sforzo in altra grandezza fisica di più facile e precisa valutazione. I dinamometri, che in generale constano di due parti, una atta a rilevare lo sforzo ed una a misurarli, devono avere caratteristiche particolari come una frequenza propria elevata rispetto alla armonica di maggiore frequenza del fenomeno in osservazione. La massa in moto dovrà perciò avere spostamenti ridottissimi, quindi una elevata rigidità della parte che rileva lo sforzo.

L'isteresi deve essere minima perchè modifica la curva che rappresenta il fenomeno impedendo o ritardando il ritorno allo zero. La viscosità poi rende

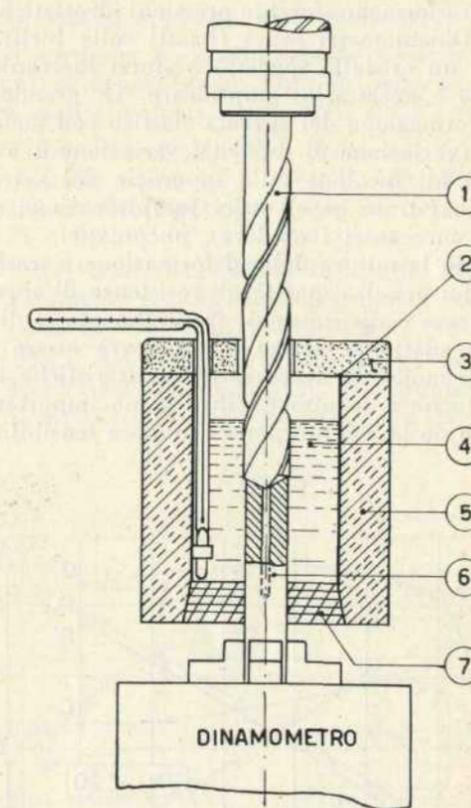


Fig. 9.

1. Punta elicoidale. - 2. Recipiente calorimetrico. - 3. Tappo superiore. - 4. Acqua. - 5. Rivestimento isolante. - 6. Provino. - 7. Tappo inferiore.

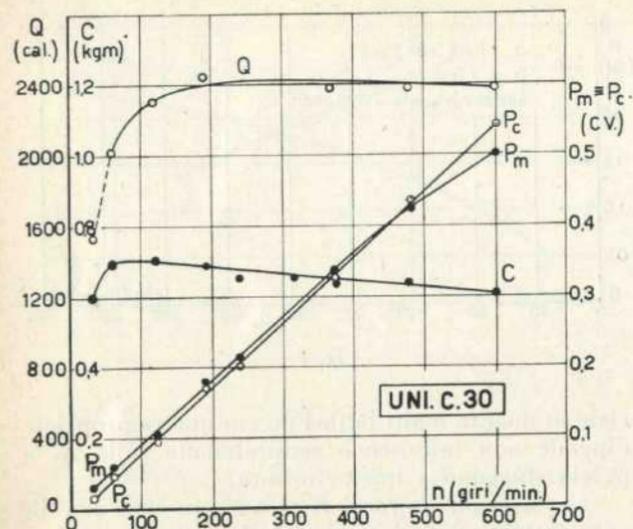


Fig. 10.

la misura dipendente dalla velocità con cui avviene il fenomeno.

L'industria usa dinamometri basati su concetti diversi e cioè:

1) Dinamometri elettrici (misurano delle variazioni di resistenza di un conduttore (grafite), di riluttanza di un circuito magnetico (magneto-striazione), fenomeni piezoelettrici (quarzo) o variazioni di resistenza di contatto);

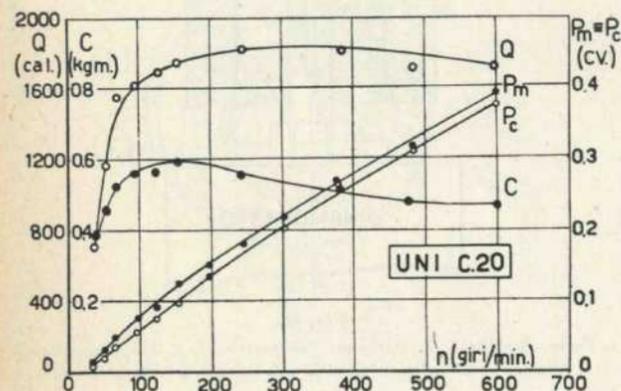
2) Dinamometri Meccanici (misurano deformazioni elastiche di un sistema, deformazioni plastiche o trasformano sforzi in pressioni idrostatiche);

3) Dinamometri ottici (basati sulla birifrangenza di un cristallo soggetto a sforzi meccanici).

Spesso è necessario amplificare la grandezza della deformazione del sistema elastico con metodi elettrici (variazione di capacità, variazione di resistenza di fili incollati sulla superficie del sistema deformato (strain gage) ottici (amplificazione con specchi), meccanici (con leve), pneumatici.

Con ciò la misura della deformazione è trasformata in misura di capacità, di resistenza di angoli, di lunghezze e di pressioni. Naturalmente il dinamometro adatto al nostro scopo dovrà essere costruito in modo da avere certe caratteristiche ben precise anche a scapito di altre meno importanti. (Ad esempio la rigidità porta a minore sensibilità).

Fig. 11.



Siccome le deformazioni di un sistema elastico rigido (come deve essere nel nostro caso) sotto l'azione di una forza sono dell'ordine dei micron per poterli misurare con precisione occorrono strumenti di elevatissima sensibilità. I calibri pneumatici possono, per esempio, assolvere bene questa funzione. È stato recentemente costruito un dinamometro pneumatico costituito da un sistema elastico soggetto allo sforzo (molla) e dove le deformazioni sono misurate con un amplificatore pneumatico. Il sistema elastico, costituito da una molla a C (fig. 5) cui è applicata la forza che provoca lo spostamento  $\alpha$ , si deforma in modo tale che la estremità dove si esegue la lettura si sposta di una quantità  $\delta_1 - \delta_2$  molto maggiore di  $\alpha$  (amplificazione). Per evitare l'isteresi le tensioni interne della molla devono essere molto inferiori al limite elastico del materiale. In figura 6 è visibile lo schema della molla dinamometrica e l'ugello attraverso cui fluisce l'aria del dispositivo pneumatico la cui variazione di luce determina una portata diversa del fluido: queste va-

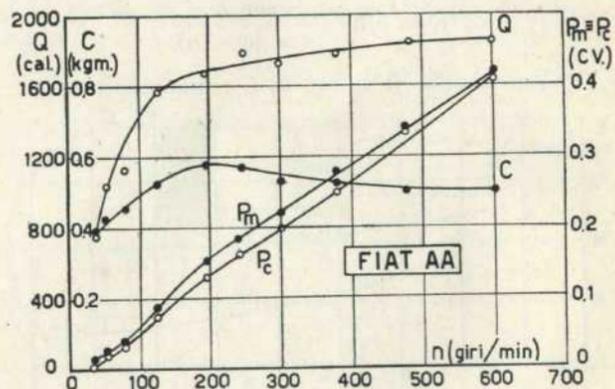


Fig. 12.

riazioni sono segnalate sulla colonna d'acqua della bottiglia <sup>(1)</sup>.

Per tenere conto di un altro fattore anche molto importante quale la velocità di taglio, si è pensato di indicare anziché la  $X$  il prodotto  $XV_t$  cioè la potenza assorbita. È noto che la  $X$  non rimane costante a parità di tutte le altre condizioni di taglio al variare di  $V_t$ , ma (come anche si è direttamente verificato), la forza  $X$  diminuisce con la  $V_t$  per cui la potenza non varia linearmente con la velocità di taglio.

Si riportano come esempio i diagrammi di fig. 7 e 8 ove sono rappresentate le forze e le potenze in funzione di  $V_t$ .

Misura della lavorabilità attraverso il rilievo della quantità di calore generata nel taglio.

Il sistema calorimetrico proposto da A. O. Schmidt presenta numerosi pregi e notevole interesse, ma una certa difficoltà di esecuzione.

<sup>(1)</sup> Da prove eseguite presso il nostro Istituto si è notato come la misura di  $X$  possa essere eseguita con lo strumento sopra descritto con una sensibilità di lettura dell'ordine dei 5 kg. È perciò necessario scegliere condizioni di taglio per cui  $X$  non risulti troppo inferiore ai 100 kg. onde ridurre l'errore a circa il 5 %.

Numerose prove di questo tipo eseguite presso l'Istituto di Tecnologie del Politecnico di Torino, hanno permesso di ottenere risultati comparativi interessanti anche se non di eccessiva precisione in valore assoluto.

Infatti la precisione della misura è ridotta per il tipo di calorimetro (fig. 9) che è stato costruito tenendo conto delle esigenze di impiego e cioè della possibilità di afferrare il provino in lavorazione dal basso ed introdurre la punta elicoidale dall'alto. Vi sono quindi perdite per conduzione attraverso la provetta e la punta elicoidale, nonché perdite dovute al fatto che il calorimetro deve presentare una apertura superiore per l'introduzione della punta. Dette perdite si calcolano al 10÷15 % circa, a seconda della temperatura raggiunta dall'acqua nel calorimetro.

L'interesse della prova sta perciò specialmente nel confronto tra la quantità di calore sviluppata in condizioni di lavoro analoghe nel forare materiali diversi. Stabilendo una relazione di dipendenza della lavorabilità dalla quantità di calore sviluppata si può arrivare ad un indice parziale di lavorabilità poiché la prova suddetta non tiene conto del fattore durata dell'utensile, che oltre ad essere dipendente dalla temperatura è anche dipendente dalla abrasività del materiale.

La misura della quantità di calore sviluppata si collega con la potenza assorbita nel taglio attraverso il primo principio della termodinamica (equivalenza tra calore e lavoro).

La quantità di calore sviluppata si può considerare come somma di due quantità di calore, una corrispondente al lavoro speso per vincere la resistenza allo scorrimento  $Q_s = \frac{L_s}{J}$ , ed una corrispondente al lavoro di attrito tra utensile e truciolo  $Q_a = \frac{L_a}{J}$ .

Poiché il lavoro totale di taglio è  $L_t = L_a + L_s$  risulta  $L_t = J(Q_a + Q_s)$ .

Questa relazione è vera con buona approssimazione ma non rigorosamente precisa in quanto non tutto il lavoro si trasforma in calore, ma una parte di esso rimane immagazzinata nel truciolo e nel pezzo sotto forma di tensioni interne (è stato calcolato che questa parte si aggira sul 12 % del lavoro totale) (Schmidt).

La misura della quantità di calore sviluppata durante il taglio eseguita con il calorimetro è basata sulla nota relazione  $Q = (m_a + m_c) c (t_2 - t_1)$  dove  $m_a$  = massa d'acqua calorimetrica

$m_c$  = equivalente in acqua del calorimetro

$c = 1$  (calore specifico acqua)

$t_1$  e  $t_2$  temperatura iniziale e finale (dopo eseguito il taglio) dell'acqua del calorimetro.

Per la nostra prova è stato adottato un provino cilindrico di diametro 12 mm. con preforo centrale di 5 mm. una altezza utile di taglio  $h = 30$  mm.; la punta elicoidale scelta ha diametro di 14,5 mm.; la massa d'acqua calorimetrica 50 cc.; l'equivalente in acqua del calorimetro 15 cc.; l'avanzamento 0,12

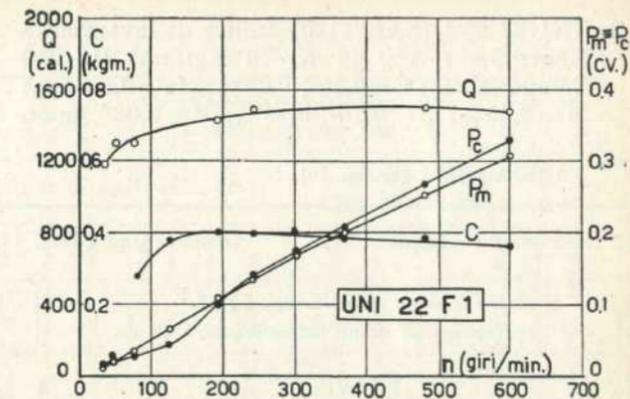


Fig. 13.

mm/giro; si è poi fatto variare il numero di giri per ogni tipo di materiale da un minimo di 30 ad un massimo di 600 giri/min. Il tempo di taglio è stato calcolato con la relazione  $t = \frac{h}{a_v n}$  dove  $h = 30$  mm.  $a_v = 0,12$  ed  $n$  variabile da prova a prova.

La quantità di calore sviluppata è  $\frac{Q}{t}$  cal/sec. ed

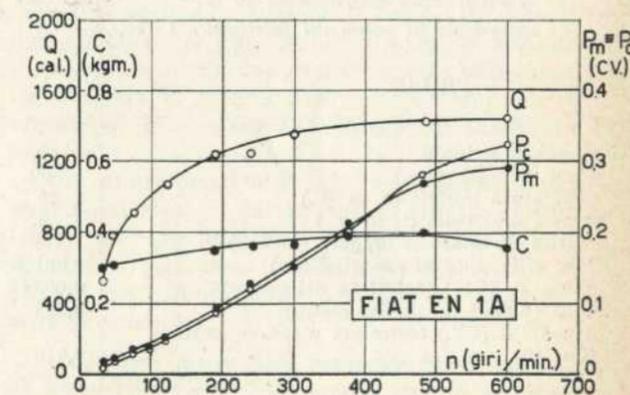
essendo  $1 \text{ Cal/sec} = 5,70 \text{ CV}$ :  $\frac{Q}{t} \cdot \frac{5,70}{1000} = P_c$  (Potenza trasformata in calore).

La potenza assorbita calcolata invece meccanicamente è  $P_m = \frac{Cn}{716}$  dove  $C$  si misura con un dinamometro applicato alla macchina.

Riportiamo ora alcune tabelle che indicano i risultati di alcune prove fatte su materiali diversi. Sono stati esaminati i seguenti 5 tipi di materiali:

- 1) UNI C 30 (SAE 1030) indice di lavorabilità secondo Kent 3,7 - A% 20  $K_r$  67  $\text{Kg/mm}^2$  Hd 197 Composizione: C=0,30%; Mn=0,80%; Si=0,35%.
- 2) UNI C.20 (SAE 1020) Indice di lavorabilità secondo Kent 4,2 - A% 20  $K_r$  60  $\text{Kg/mm}^2$  Hd 175 Composizione: C=0,20%; Mn=0,80%; Si=0,35%.
- 3) FIAT AA (SAE 1010) Indice di lavorabilità secondo Kent 5,00 - A% 25  $K_r$  68  $\text{Kg/mm}^2$  Hd 200 Composiz.: C=0,08÷0,10%; Mn=0,4÷0,5%.

Fig. 14.



4) UNI 22 F 1 (SAE 1120) Indice di lavorabilità  
Kent: 5,6 - A% 14  $K_r$  78 Kg/mm<sup>2</sup> Hd 230  
Composizione: C=0,18÷0,28%; Mn=0,6÷1%;  
Si=0,35%; S = 0,10÷0,15%; P = 0,08% max.

5) FIAT EN1A (SAE 1112) Indice di lavorabilità  
Kent 8,2 -  $K_r$  70 Kg/mm<sup>2</sup> Hd 205 Composizione:  
C = 0,07÷0,15%; Mn = 0,8÷1,2%;  
Si=0,10 max.; S = 0,20÷0,30%; P = 0,07% max.

TABELLA N. 1 (v. fig. 10)

Avanzamento mm/giro 0,12		Diametro punta mm. 14,5		Diametro provino mm. 12		Diametro preforo mm. 5			
massa d'acqua calorimetrica 50 cc. equivalente in acqua del calorimetro 15 cc.		Lunghezza di taglio mm. 30		Materiale del provino UNIC.30(SAE1030)					
PROVE		1	2	3	4	5	6	7	8
Numero di giri/min.		30	60	120	190	240	375	480	600
Tempo di taglio $t = \frac{h}{av n}$ (sec.)		500	250	125	79	60	40	31	25
Temperatura iniziale ( $t_1$ in °C.)		23,5	26	11,5	23	11,5	10,5	22,5	23
Temperatura finale ( $t_2$ in °C.)		47	57	47	60	54	47	59	60
Quantità di calore sviluppata (in calorie)		1530	2020	2300	2400	2760	2370	2370	2400
Calore sviluppato al sec. (Cal./sec.)		0,003	0,0082	0,0184	0,0304	0,046	0,059	0,0765	0,096
Potenza $P_c$ (CV.) (calcolata dal calore)		0,0175	0,0465	0,10	0,173	0,262	0,338	0,435	0,548
Coppia (Kgm.) (al dinamometro)		0,65	0,7	0,68	0,68	0,615	0,63	0,63	0,6
Potenza $P_m$ (CV.) (calcolata meccanicamente) (Cn/716)		0,027	0,0586	0,105	0,180	0,205	0,330	0,425	0,5

TABELLA N. 2 (v. fig. 11)

Avanzamento mm/giro 0,12		Diametro punta mm. 14,5		Diametro provino mm. 12		Diametro preforo mm. 5				
massa d'acqua calorimetrica 50 cc. equivalente in acqua del calorimetro 15 cc.		Lunghezza di taglio mm. 30		Materiale del provino UNIC.20(SAE1020)						
PROVE		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Numero di giri/min.		30	48	60	95	120	150	240	375	480
Tempo di taglio (sec.)		500	290	250	157	125	100	60	40	31
Temperatura iniziale ( $t_1$ in °C.)		26	26	26	26	26	26	26	26	26
Temperatura finale ( $t_2$ in °C.)		37	44	50	51	52	53	54	54	52
Quantità di calore sviluppata (in cal.)		715	1170	1560	1625	1690	1750	1820	1820	1690
Calore sviluppato al sec. (Cal./sec.)		0,00143	0,004	0,0062	0,0104	0,0135	0,0175	0,032	0,0455	0,0545
Potenza $P_c$ (CV.) (calcolata dal calore)		0,00815	0,0228	0,0353	0,0575	0,074	0,097	0,182	0,256	0,31
Coppia (Kgm.) (al dinamometro)		0,385	0,455	0,525	0,560	0,560	0,595	0,560	0,525	0,490
Potenza $P_m$ (CV.) (calcolata meccanicamente) (Cn/716)		0,016	0,0305	0,044	0,074	0,094	0,125	0,188	0,275	0,32

TABELLA N. 3. (v. fig. 12)

Avanzamento mm/giro 0,12		Diametro punta mm. 14,5		Diametro provino mm. 12		Diametro preforo mm. 5			
massa d'acqua calorimetrica 50 cc. equivalente in acqua del calorimetro 15 cc.		Lunghezza di taglio mm. 30		Materiale del provino FIAT AA (SAE 1010)					
PROVE		1	2	3	4	5	6	7	8
Numero di giri/min.		30	75	120	190	240	375	480	600
Tempo di taglio (sec.)		500	200	125	79	60	40	31	25
Temperatura iniziale ( $t_1$ in °C.)		26	26	26	26	28	28	28	28
Temperatura finale ( $t_2$ in °C.)		38	43	50	55	55	55	56	56
Quantità di calore sviluppata (in cal.)		780	1100	1560	1880	1755	1755	1820	1820
Calore sviluppato al sec. (Cal./sec.)		0,00156	0,0055	0,0125	0,0238	0,0293	0,044	0,059	0,073
Potenza $P_c$ (CV.) (calcolata dal calore)		0,0089	0,0314	0,071	0,136	0,167	0,25	0,338	0,415
Coppia (Kgm.) (al dinamometro)		0,385	0,455	0,525	0,577	0,56	0,525	0,49	0,49
Potenza $P_m$ (CV.) (calcolata meccanicamente) (Cn/716)		0,016	0,034	0,087	0,152	0,184	0,275	0,33	0,41

TABELLA N. 4 (v. fig. 13).

Avanzamento mm/giro 0,12		Diametro punta mm. 14,5		Diametro provino mm. 12		Diametro preforo mm. 5				
massa d'acqua calorimetrica 50 cc. equivalente in acqua del calorimetro 15 cc.		Lunghezza di taglio mm. 30		Materiale del provino UNI 22 F 1 (SAE 1120)						
PROVE		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Numero di giri/min.		30	48	75	190	240	300	375	480	600
Tempo di taglio (sec.)		500	290	200	79	60	50	40	31	25
Temperatura iniziale ( $t_1$ in °C.)		21	21	21	21	16	16	14	14	14
Temperatura finale ( $t_2$ in °C.)		39	41	41	43	39	39	37	37	37
Quantità di calore sviluppata (in cal.)		1170	1300	1300	1430	1495	1495	1495	1495	1495
Calore sviluppato al sec. (Cal./sec.)		0,0023	0,0045	0,0065	0,018	0,025	0,03	0,0374	0,048	0,06
Potenza $P_c$ (CV.) (calcolata dal calore)		0,0132	0,0256	0,037	0,103	0,143	0,172	0,213	0,274	0,34
Coppia (Kgm.) (al dinamometro)		0,314	0,28	0,28	0,42	0,403	0,403	0,385	0,385	0,367
Potenza $P_m$ (CV.) (calcolata meccanicamente) (Cn/716)		0,0132	0,0188	0,0294	0,112	0,135	0,169	0,20	0,258	0,31

TABELLA N. 5 (v. fig. 14).

Avanzamento mm/giro 0,12		Diametro punta mm. 14,5		Diametro provino mm. 12		Diametro preforo mm. 5				
massa d'acqua calorimetrica 50 cc. equivalente in acqua del calorimetro 15 cc.		Lunghezza di taglio mm. 30		Materiale del provino FIAT EN 1 A (SAE 1112)						
PROVE		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Numero di giri/min.		30	48	75	95	120	190	240	300	480
Tempo di taglio (sec.)		500	290	200	157	125	79	60	50	31
Temperatura iniziale ( $t_1$ in °C.)		12	12	12	12	12	12	12	12	12
Temperatura finale ( $t_2$ in °C.)		20	24	26	27	28,5	31	31	33	36
Quantità di calore sviluppata (in cal.)		520	780	910	975	1070	1235	1235	1360	1560
Calore sviluppato al sec. (Cal./sec.)		0,00104	0,0027	0,0045	0,0062	0,0085	0,0157	0,0206	0,0272	0,050
Potenza $P_c$ (CV.) (calcolata dal calore)		0,0059	0,0154	0,0255	0,0352	0,0485	0,085	0,117	0,155	0,284
Coppia (Kgm.) (al dinamometro)		0,298	0,314	0,298	0,28	0,28	0,350	0,368	0,368	0,4
Potenza $P_m$ (CV.) (calcolata meccanicamente) (Cn/716)		0,0125	0,021	0,031	0,037	0,047	0,093	0,124	0,155	0,27

I diagrammi riportati indicano l'andamento pressochè analogo delle linee rappresentanti le quantità di calore sviluppate  $Q$ , le coppie  $C$  e le potenze  $P_c$  e  $P_m$  al variare del tipo di materiale.

Questi diagrammi integrati eventualmente con altri, danno un quadro delle caratteristiche di lavorabilità del materiale: degli sforzi e potenze che richiedono per essere tagliati e del calore sviluppato durante il taglio (2).

Misura della lavorabilità del materiale dalla durata dell'utensile e dalla finitura delle superfici.

La misura della lavorabilità dalla durata dell'utensile è giustificata dalle relazioni di dipendenze che legano i fattori del materiale con la durata stessa. Si tratta di una misura di lunga e difficile esecuzione.

(2) Altra misura indice di lavorabilità è quella della temperatura raggiunta dall'utensile durante il taglio. Tra i metodi suggeriti quello della coppia termoelettrica ha dato buoni risultati anche per la relativa facilità di misura.

Vi sono due sistemi per eseguirlo:

1) fare lavorare l'utensile fino alla perdita della affilatura (questo punto può essere indicato con un utensile dinamometrico che rivela il momento in cui l'utensile perde il filo tagliente segnando l'aumento della forza di taglio).

Detta prova deve essere eseguita con condizioni di taglio unificate; anzichè il tempo di durata tra due affilature, si può anche misurare il volume od il peso di truciolo asportato tra due affilature. Inconveniente di queste prove è l'elevato tempo di esecuzione e la quantità notevole di materiale da tagliare.

Si è allora pensato di fare la prova con analoghe condizioni, ma a durata fissa (con un tempo di lavoro breve) e misurare poi con strumenti molto sensibili il consumo dell'utensile (profondità del cratere ecc). A maggiore consumo corrisponde minore lavorabilità.

2) Sono anche state proposte prove analogiche di abrasività (che si collegano con la durata del-

l'utensile) come quella di Schlesinger con la sferetta premuta contro il pezzo di rotazione, che dà attraverso il suo consumo il coefficiente di usura, però in condizioni di fatto ben diverse da quelle in cui l'utensile opera, anche perchè la sferetta strisciando contro il materiale lo incrudisce.

Poichè anche la finitura delle superfici può essere indice di lavorabilità del materiale (vedasi paragrafo e) all'inizio della trattazione) è possibile attraverso la misura di questa caratteristica — facilmente realizzabile con analizzatori superficiali entrati ormai nell'uso corrente — avere una indicazione di quella proprietà che Ernst chiama attitudine del materiale lavorato a dare superfici finite.

Concludendo la presente trattazione si richiama l'attenzione sulle difficoltà connesse con queste prove, difficoltà che sono state qui messe in luce e che portano a risultati parziali non sempre precisi ma di utilità come orientamento sulle condizioni di taglio da scegliere per ogni tipo di materiale.

Ciascuno dei sistemi descritti ha degli inconvenienti, ma l'accostamento di essi può dare una idea sulla strada da seguire, a seconda degli scopi da raggiungere, essendo ciascuno di essi adatto in casi particolari e non potendosi proporre una prova unificabile che con precisione e con semplicità di esecuzione sia applicabile a qualunque tipo di materiale.

Gian Federico Micheletti

## BIBLIOGRAFIA

- ERNST, H.: *Physics of Metal Cutting*, « Machining of Metals », American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1938.
- MERCHANT, M. E.: *Mechanics of the Metal Cutting Process*. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip, *J. Applied Phys.*, Vol. 16, 1945.
- KRONENBERG, M.: *Cutting Angle Relationships on Metal-cutting Tools*, « Mech. Eng. », Vol. 65, 1943.
- ZLATIN, N., and M. E. MERCHANT: *The Distribution of Hard-*

- ness in Chips and Machined Surfaces*, Trans. ASME, 1947; also *Iron Age*, Vol. 159 No. 21, 1947.
- MERCHANT, M. E.: *Mechanics of the Metal Cutting Process*. II. Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting, *J. Applied Phys.*, Vol. 16 - 1945.
- SCHALLBROCH, H., H. SCHAUMANN and R. WALLICHS: *Testing for Machinability by Measuring Cutting Temperature and Tool Wear*, « Vortraege der Hauptversammlung 1938 der Deutschen Gesellschaft fuer Metallkunde », VDI, Berlin, 1938.
- BOSTON, O. W.: « *Metal Processing* », John Wiley & Sons, Inc., New York, 1941.
- SORENSEN, J. and W. GATES: *Machinability of Steels*, *Prod. Eng.*, Vol. 10, January, 1939.
- JANITZKY, E. J.: *Machinability of Plain Carbon, Alloy and Austenitic (Non-magnetic) Steel and its Relation to Yield-stress Ratios When Tensile Strengths Are Similar*, Trans. ASME, Vol. 66, November, 1944.
- BOSTON, O. W.: *Metal Cutting Forces and Power Requirements for Machine Tools*, Automotive and-Aviation Inds., Vol. 86, May, 1942.
- FIELD, M. and E. E. STANSBURY: *Effect of Microstructure on the Machinability of cast Irons*, Parts I and II, Trans. ASME, Vol. 69, August, 1947.
- BOSTON O. W., W. H. OLDACRE, H. L. MOIR and E. M. SLAUGHTER: *Machinability Ratings of Metal and Cutting Fluid Recommendations*, « *Tool Engineer* », Vol. 11, No. 4, 1943.
- WOLFE K. J. B.: *Some Metallurgical Factors With Affect Machinability*, « *Metal Treatment* », Vol. 13, Winter, 1946-1947.
- A. O. SCHMIDT, W. W. GILBERT & O. W. BOSTON: *A Thermal Balance Method and Mechanical Investigation for Evaluating Machinability*, Trans. ASME, Vol. 67, N. 4, May, 1945, pagg. 225-232.
- A. O. SCHMIDT, O. W. BOSTON & W. W. GILBERT: *Measurements of Temperatures in Metal Cutting*, Trans. ASME, Vol. 68, 1946, pagg. 47-49.
- O. W. BOSTON: *Machinability of Metals*, Trans. American Society for Steel Treating, Vol. 13, 1928, pagg. 49-50.
- O. W. BOSTON: *Methods of Tests for Determining the Machinability of Metals in General, With Results*, Trans. American Society for Steel Treating, Vol. 16, 1929, pagg. 659-710.
- ERNST H.: *Physycs of Metal Cutting*, published by American Society for Metals, in « *Machining of Metals* », Cleveland, 1938, pagg. 1-34.

# NOTIZIARIO

## Esposizione dell'agricoltura

L'Esposizione dell'Agricoltura (Roma, 2 giugno - 31 ottobre 1953) costituisce una manifestazione tecnica e scientifica, avente i seguenti scopi:

a) dimostrare l'importanza che l'Agricoltura ha nella vita italiana sia come fonte di ricchezza, sia come fonte di lavoro;

b) portare a conoscenza del pubblico le più moderne e razionali pratiche agricole, con particolare riguardo alla meccanizzazione;

c) dimostrare come dallo sviluppo delle industrie agrarie dipenda in gran parte l'ulteriore progresso della nostra agricoltura;

d) promuovere contatti fra le categorie agricole dei diversi paesi, ai fini di sviluppare gli scambi commerciali, e Congressi di tecnici e di studiosi, per realizzare una più intima collaborazione internazionale.

L'Esposizione avrà luogo a Roma dal 2 giugno al 31 ottobre 1953 nella zona delle « Tre Fontane » (Esposizione Universale di Roma - E.U.R.).

L'Esposizione sarà articolata nelle seguenti sezioni principali: 1) Bonifiche, irrigazioni, trasformazione fondiaria, case rurali e credito agrario; 2) Produzioni agricole: Grano e cereali, riso, bietole, olivo, tabacco, vite, ecc; 3) Zootecnica, prodotti inerenti e animali di bassa corte, con reparti per singole specializzazioni; 4) Meccanica agraria; 5) Concimi ed antiparassitari con particolare riguardo ai nuovi prodotti; 6) Tessili (fibre e prodotti industriali); 7) Federconsorzi, organizzazioni agricole mutualistiche, ecc; 8) Artigianato agricolo; 9) Settore lattiero-caseario; 10) Settore enologico ed oleario; 11) Industria conserviera e alimentare in genere, del freddo ed essenze; 12) Caccia e pesca; 13) Orticoltura, frutticoltura, giardinaggio (vivai e fiori); 14) Economia montana, difesa del suolo in montagna e in collina, foreste e piante officinali; 15) Settore internazionale dedicato all'agricoltura nei vari paesi del mondo; 16) Stampe e pubblicazioni italiane e straniere; 17) Istruzione agraria; 18) Fattoria moderna.

Sono inoltre previste manifestazioni varie tra le quali: Cinema permanente e rassegna dei films agrari; Costume rurale e carro rurale in Italia e nel mondo; Festival del cinema a soggetti rurali; Mostra dell'arte ispirata all'agricoltura (pittura-scultura-bianco e nero); Congressi e convegni nazionali ed internazionali.

Direttore responsabile: **AUGUSTO CAVALLARI - MURAT**

Autorizzazione Tribunale di Torino n. 41 del 19 Giugno 1948

STAMPERIA ARTISTICA NAZIONALE - TORINO