

doc: mgr inż. Adam BUŁAT
Instytut Obróbki Skrawaniem w Krakowie

OKREŚLENIE WSKAŹNIKÓW SKRAWALNOŚCI METODĄ WIERCENIA ZE STAŁĄ SIŁĄ POSUWOWĄ

1. Wstęp

J. Kaczmarek podaje następującą definicję skrawalności materiałów: "Ogólnie i jakościowo skrawalnością nazywamy podatność materiału w danych warunkach obróbki na zmiany objętości, kształtu i wymiarów przez zeskrawanie określonej warstwy tego materiału". I dalej: "W praktyce skrawalność charakteryzujemy, określając zależności fizyko-technologiczne, zwane krótko użytkowymi wskaźnikami skrawalności, jak:

- 1/ trwałość ostrza skrawającego lub - odpowiadająca mu w tych samych warunkach skrawania - okresowa szybkość skrawania,
- 2/ opór skrawania /najczęściej składowa obwodowa/,
- 3/ gładkość powierzchni obrabianej,
- 4/ rodzaj powstających wiórów."

Wskaźnikiem najistotniejszym w aspekcie praktycznym jest trwałość ostrza skrawającego względnie intensywność jego zużycia, zależna bezpośrednio od procesów trybologicznych zachodzących w obszarze złożonych warunków występujących w czasie skrawania. Obszar ten określają równoległe własności fizyko-chemiczne materiału obrabianego, własności fizyko-chemiczne materiału ostrza, własności fizyko-chemiczne ośrodka /płyn obróbkowy/ oraz prędkość, przy której zachodzą procesy tarcia /prędkość skrawania i związana z nią prędkość spływu wióra/, wartości nacisków powierzchniowych i temperatura występująca w strefie skrawania. Powszechnie utożsamia się skrawalność z trwałością ostrza skrawającego. Pogląd ten znajduje praktyczne uzasadnienie - technologów bowiem interesuje przede wszystkim wpływ materiału obrabianego na trwałość ostrza skrawającego.

Jak wyżej wspomniano, trwałość ostrza skrawającego zależy od obszaru złożonych warunków procesu tarcia. Przebiegi procesów tarcia są znane i przebadane przez fizyków, ale w zupełnie innym zakresie obszaru zmiennych niż te, jakie towarzyszą procesowi skrawania. Chodzi tu przede wszystkim o wartości nacisków powierzchniowych /rzędu 1000 MPa/ oraz wartości tem-

peratur /rzędu 800 do 1500 K/. Obszary te znacznie odbiegają od obszarów występujących przy powszechnie stosowanych w technice warunkach współpracy elementów maszyn takich jak łożyska, przewodnice itp., przy których wartości nacisków powierzchniowych nie przekraczają 30 do 50 MPa, a temperatury wartości 800 K.

Brak badań podstawowych procesów tarcia w obszarze odpowiadającym procesowi skrawania tłumaczyć należy zbyt dużymi trudnościami modelowania tego procesu oraz bardzo wysokimi kosztami takiego przedsięwzięcia.

Dlatego też badaniami obejmowano i obejmuje się nadal całość procesu tarcia, przeprowadzając bezpośrednio badania zużycia ostrza w trakcie skrawania. Taki sposób przeprowadzania badań nie pozwala wprawdzie na ustalenie wpływu poszczególnych czynników zmiennych na elementy procesu zużycia ostrza, ale w wystarczającym dla praktyki zakresie pozwala ustalić wpływ kompleksu czynników na ten proces.

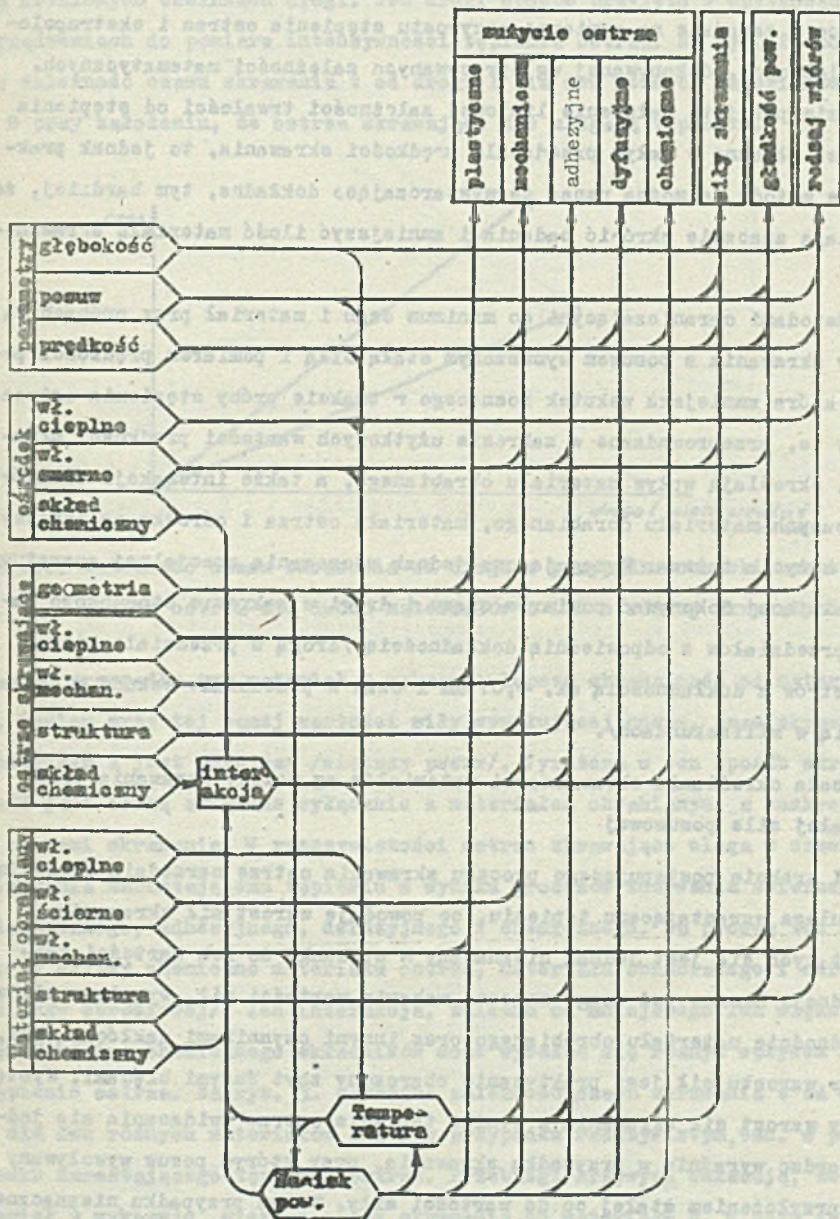
Na rys.1 podano najistotniejsze powiązania akcyjne najważniejszych czynników ze wspomnianymi powyżej wskaźnikami skrawalności.

Analiza podanego schematu wyraźnie wskazuje, że żaden z przytoczonych wskaźników skrawalności nie jest zależny tylko od materiału obrabianego. Ponieważ zarówno ostrze skrawające, ośrodek i parametry skrawania wywierają różny wpływ, wskaźnik skrawalności ze względu na zużycie ostrza może przyjmować różne wartości zależnie od poziomu zmiennych, przyjętych jako stałe.

Najistotniejszym ze względów praktycznych wskaźnikiem jest, jak już wyżej wspomniano - trwałość ostrza, a raczej jego zużycie. Wartość tego wskaźnika wyznaczyć można na podstawie prób klasycznych - wyznaczania zużycia ostrza w funkcji czasu skrawania - albo na podstawie prób zastępczych, skróconych, obciążonych jednak pewnym błędem wynikającym z przyjętej metody pomiaru.

Spśród skróconych metod wyznaczania wskaźnika skrawalności materiału należy wymienić metody oparte na próbie skrawania przy wartościach stopienia ostrza niższych niż praktycznie przyjmowane i następnie liniowej ekstrapolacji trwałości proporcjonalnie do wartości stopienia ostrza.

Do metod tych należy próba skrawania, określająca zależność $h_p = f(t/$



Rys.1. Schemat najistotniejszych oddziaływań w czasie procesu skrawania

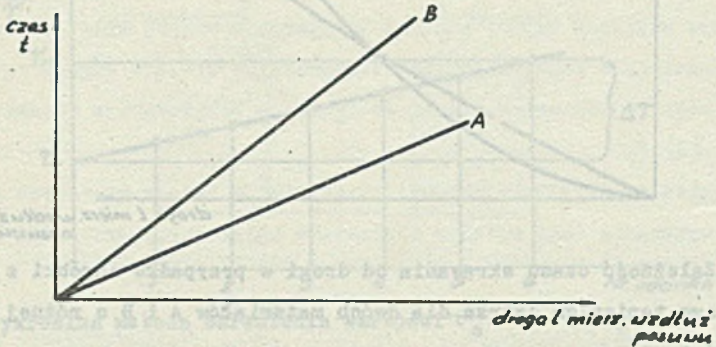
przy wartościach $h_p \approx 0,2$ mm i $t \approx 10$ min. Należą tu również metody skrawania ze zmienną prędkością skrawania, np. wałka stożkowego lub stopniowego bazujące w zasadzie na pomiarze przyrostu stępienia ostrza i ekstrapolacji zależności, dokonywanej wg opracowanych zależności matematycznych. Wprawdzie przyjęte założenie liniowej zależności trwałości od stępienia nie jest słuszne w całym przedziale prędkości skrawania, to jednak praktycznie metody te można uznać za wystarczająco dokładne, tym bardziej, że pozwalają znacznie skrócić badania i zmniejszyć ilość materiału skrawanego.

Metodami ograniczającymi do minimum czas i materiał przy próbach są metody skrawania z posuwem wymuszonym stałą siłą i pomiarem prędkości posuwu, która mniejsza wskutek rosnącego r trakcie próby stępienia ostrza. Metody te, przeprowadzone w zakresie użytkowych wartości prędkości skrawania, określają wpływ materiału obrabianego, a także interakcji składów chemicznych materiału obrabianego, materiału ostrza i ośrodka na intensywność zużycia ostrza. Wymagają one jednak stosowania specjalnej aparatury, pozwalającej dokonywać pomiarów czasu i drogi w zakresie stosunkowo małych przedziałów z odpowiednią dokładnością /drogą w przedziale kilku milimetrów z dokładnością ok. 0,01 mm i czas w przedziale sekund z dokładnością w milisekundach/.

2. Zasada określania skrawalności materiałów wg metody skrawania przy stałej sile posuwowej.

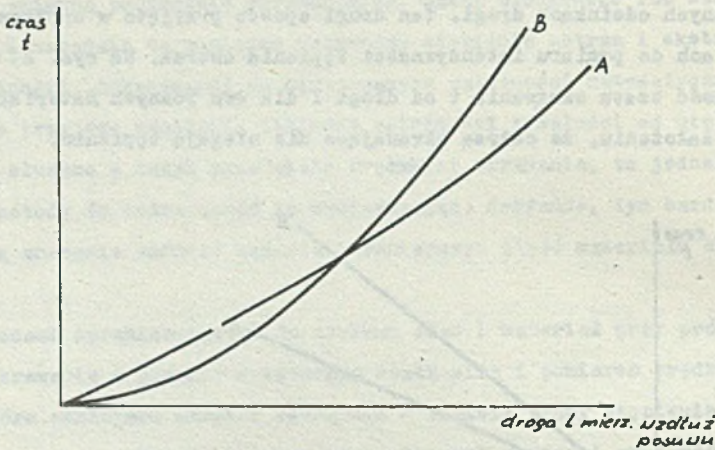
W trakcie postępującego procesu skrawania ostrze narzędzia skrawającego ulega wstępującemu tępieniu, co powoduje wzrost sił skrawania. Wzrost tych sił jest jednak nieznaczny w stosunku do ich wartości teoretycznej. Biorąc pod uwagę znaczne wahania wartości sił, wywołane niejednorodnością materiału obrabianego oraz innymi czynnikami zakłócającymi, pomiar wzrostu sił jest praktycznie obciążony zbyt dużymi błędami. Występujący wzrost sił skrawania w wyniku tępienia ostrza uwiadamia się jednak bardzo wyraźnie w przypadku skrawania, przy którym posuw wywołany jest przyłożeniem stałej od do wartości siły. W tym przypadku nieznaczne nawet stępienie ostrza, praktycznie niemierzalne, wywołuje wyraźne zmniejszenie prędkości posuwu. To właśnie zjawisko zostało wykorzystane do pomiaru intensywności tępienia ostrza. Pomiaru prędkości posuwu można doko-

nywać albo przez pomiar drogi w ustalonym czasie, albo przez pomiar czasu na ustalonych odcinkach drogi. Ten drugi sposób przyjęto w użytkowanych urządzeniach do pomiaru intensywności tępienia ostrza. Na rys. 2. pokazano zależność czasu skrawania t od drogi l dla dwóch różnych materiałów A i B przy założeniu, że ostrza skrawające nie ulegają tępieniu.



Rys.2. Zależność czasu skrawania od drogi w przypadku obróbki bez tępienia ostrza dla dwóch materiałów A i B o różnej skrawalności.

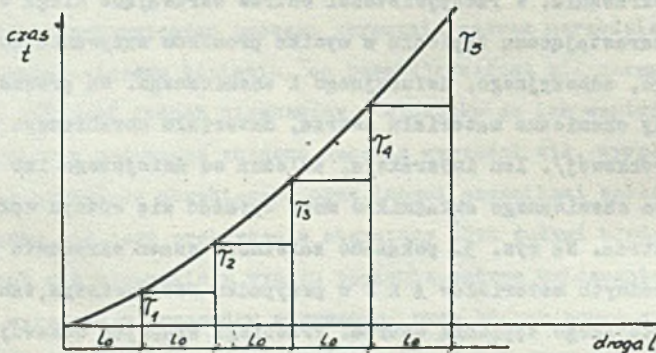
W przypadku tym materiał A wykazuje lepszą skrawalność od materiału B, bowiem przy tej samej wartości siły wywołującej posuw, czas skrawania materiału A jest mniejszy /większy posuw/. Wyrażona w ten sposób skrawalność jest cechą związaną wyłącznie z materiałem obrabianym, a konkretnie z oporami skrawania. W rzeczywistości ostrze skrawające ulega w czasie skrawania narastającemu tępieniu w wyniku procesów zużycia ściernego, plastycznego, adhezyjnego, dyfuzyjnego i chemicznego. Na proces ten mają wpływ składy chemiczne materiału ostrza, materiału obrabianego i środka /cieczy obróbkowej/. Ich interakcja, zależna od mniejszego lub większego powinowactwa chemicznego składników może wyrażać się różnym wpływem na tępienie ostrza. Na rys. 3. pokazano zależność czasu skrawania t od drogi l dla dwóch różnych materiałów A i B w przypadku rzeczywistym, tzn. w przypadku narastającego tępienia ostrza. Przebiegi krzywych wskazują, że materiał A wykazuje większe opory skrawania od materiału B, o czym świadczą większy kąt nachylenia stycznej do krzywej w punkcie $l = 0$. W miarę wzrostu drogi skrawania materiał B powoduje szybszy wzrost tępienia ostrza od materiału A - krzywa dla materiału B przebiega bardziej stromo.



Rys.3. Zależność czasu skrawania od drogi w przypadku obróbki z postępującym tępieniem ostrza dla dwóch materiałów A i B o różnej skrawalności

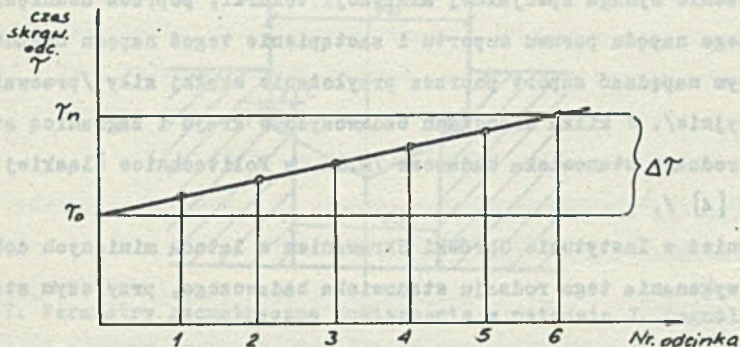
Ten właśnie wzrost stępienia, wyrażony większymi przyrostami czasu jest wskaźnikiem intensywności tępienia ostrza.

Podstawową zatem metodyki określania wskaźnika skrawalności materiału ze względu na jego wpływ na tępienie ostrza jest pomiar wartości przyrostu czasu skrawania dla równych odcinków drogi l_0 , co ilustruje wykres na rys.4.



Rys.4. Istota pomiarów przy określaniu wskaźników skrawalności metodą J. Dagnella: pomiary przyrostu czasu skrawania τ_i dla równych odcinków drogi l_0 .

Powyższą metodykę rozpracował praktycznie J. Dagnell, pracownik naukowy IVF w Göteborgu [23]. W czasie skrawania narzędziem o ustalonej geometrii i materiale ostrza dokonuje się pomiarów czasu skrawania poszczególnych odcinków drogi l_0 . Czasy te nanosi się na wykres zależności czasu τ od numeru odcinka drogi /rys.5/.



Rys.5. Wykreślna metoda określenia wartości τ_0 .

Następnie z wykresu odczytuje się przyrost czasu $\Delta\tau$ jako różnicę $\Delta\tau = \tau_n - \tau_0$, - jest wartością czasu wyznaczoną przez przecięcie się krzywej z osią rzędnych, a τ_n - wartością czasu skrawania ostatniego n - tego odcinka drogi. Jako miarę skrawalności przyjęto wielkość L [ms/mm] wyrażoną zależnością:

$$L = \frac{\Delta\tau}{n \cdot l_0 \cdot \sigma} \quad [\text{ms/mm}] \quad /2.1./$$

oraz
$$\tau_{01} = \frac{\tau_0}{l_0} \quad [\text{ms/mm}], \quad /2.2./$$

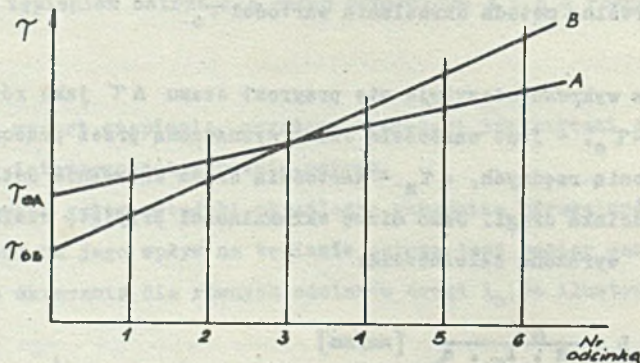
- gdzie: n - oznacza ilość odcinków,
 l_0 - długość odcinka w /mm/,
 σ - wartość stała, liczbowo równa długości l_0 ,
 τ_0 - wartość odczytana z wykresu na rys.2.4.

Na rys.6. pokazano przebiegi zależności L dla dwu materiałów skrawanych A i B. Dla materiału A uzyskano większą wartość τ_{01} niż dla materiału B, co świadczy, że materiał A wykazuje wyższe opory skrawania od materiału B. Natomiast wartość L - proporcjonalna do pochylenia krzywej-

- jest dla materiału A niższa niż dla materiału B, co należy odczytać: materiał A oddziałowuje mniej intensywnie na tępienie ostrza od materiału B. Według powyższej metody można dokonywać pomiarów wskaźnika skrawalności przy toższeniu wążka z materiału badanego, albo przy powiercaniu otworu w próbie materiału.

Toższenie wymaga specjalnej adaptacji tokarki, poprzez usunięcie mechanicznego napędu posuwu suportu i zastąpienie tegoż napędu układem, pozwalającym napędzać suport poprzez przyłożenie stałej siły /przeważnie grawitacyjnie/. W kilku ośrodkach badawczych w kraju i zagranicą stosowano tego rodzaju stanowiska badawcze /m.in. w Politechnice Śląskiej w Gliwicach [4] /.

Również w Instytucie Obróbki Skrawaniem w latach minionych dokonywano prób wykonania tego rodzaju stanowiska badawczego, przy czym stałą si-



Rys.6. Zależność osasu skrawania τ od odcinka l_0 od kolejnego numeru odcinka dla dwóch materiałów A i B o różnej skrawalności.

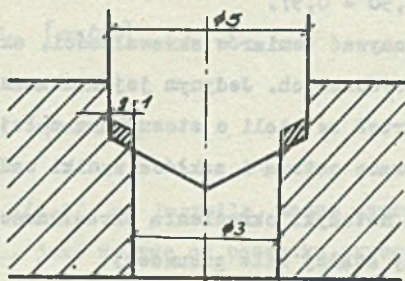
łę wywierano poprzez siłownik hydrauliczny sterowany sygnałami z dynamometru, mierzącego siłę osiową na narzędziu skrawającym.

Wykorzystanie tokarek, jako stanowisk do pomiaru skrawalności ze stałą siłą posuwową napotkało jednak na szereg trudności spośród, których najpoważniejszą jest występowanie zbyt dużych sił przesuwu w stosunku do nieznacznego wzrostu siły osiowej skrawania, wywołanego tępieniem ostrza.

Wykorzystanie omawianej metody na wiertarce eliminuje powyższe trudności i pozwala przy stosunkowo prostym rozwiązaniu technicznym zaadopto-

wał niemal każdą wiertarkę stołową na stanowisko do pomiaru skrawalności.

Celem uzyskania procesu skrawania możliwie najbardziej zbliżonego do toczenia, przyjęto powiercanie otworu o średnicy 5 mm. Proces powiercania /rys.7/ upodabnia się do wytaczania dwoma ostrzami przy głębokości skrawania $g = 1$ mm.



Rys.7. Parametry geometryczne powiercania w metodzie J. Dagnella.

Do przeprowadzenia próby używa się specjalnych wiertek płaskich. Prosta konstrukcja wiertła i łaty proces ostrzenia zapewniają utrzymanie praktycznie jednakowej geometrii ostrza, co ma niewątpliwy wpływ na powtarzalność wyników pomiarów.

Poprzez wywiercony wstępnie otwór $\phi 3$ doprowadzane jest do strefy skrawania powietrze pod ciśnieniem 0,1 MPa, co zapewnia stałe warunki chłodzenia i usuwania wiórów. Stałą siłą osiową, wymuszającą posuw, wywiera się grawitacyjnie za pomocą obciążników działających bezpośrednio na wrzeciono wiertarki względnie za pośrednictwem mechanicznego przełożenia. Najpoważniejszym problemem jest dokładny pomiar czasu /dokładność 1 ms/ i pomiar odcinków drogi l_0 /dokładność 0,01 mm/. Zadania te realizują układy elektroniczne. Przeważnie długość odcinków pomiarowych przyjmuje się w granicach 1 do 2 mm. Czas skrawania jednego odcinka zawiera się zależnie od materiału obrabianego i numeru odcinka w granicach od kilkuset do kilkutyśięcy ms. Obliczone wartości wskaźników L dla różnych materiałów wynoszą od kilku do kilkuset ms/mm.

Metoda jest bardzo oszczędna i wykazuje nawet niewielkie różnice skrawalności, jakie mogą występować, np. wzdłuż przekroju badanego materiału. Przeważnie pomiarów dokonuje się na 10 do 20 odcinkach pomiarowych.

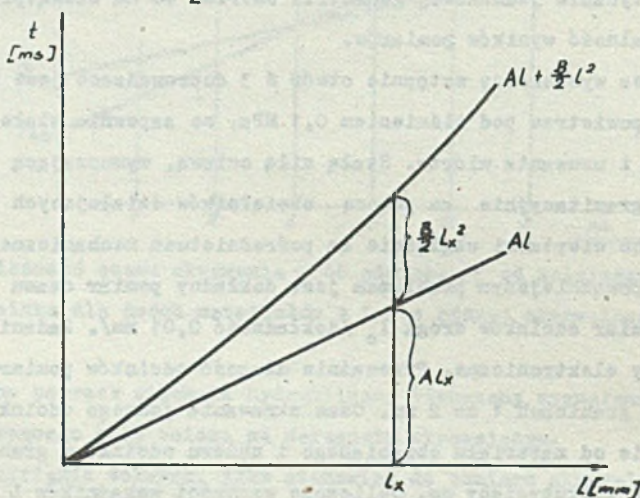
Niewielka średnica otworu $\varnothing 5 \text{ mm}$ i jego osławkowita długość 20 mm ograniczają zużycie materiału przy próbach do bardzo niewielkiej ilości. Również czas pomiaru jest bardzo krótki. Według dotychczasowych badań, przeprowadzonych w IVF i w IOS, współczynnik korelacji wyników badań według omawianej metody w stosunku do wyników, uzyskanych klasyczną metodą tożnienia osiąga wartość $0,90 - 0,97$.

Metoda pozwala dokonywać pomiarów skrawalności, skrawności narzędzi oraz własności cieczy obróbkowych. Jedynym jej mankamentem jest - jak na razie - użytkowanie wiertek ze stali o stosunkowo małej sztywności, co powoduje nierównomierną pracę ostrza i zakłóca wyniki badań.

3. Zmodyfikowana wersja metodyki określenia skrawalności materiałów wg metody skrawania przy stałej sile posuwowej

Czas skrawania t [ms] w funkcji drogi skrawania l [mm] w zakresie zużycia ustalonego /rys.8./ można z wystarczającą dokładnością aproksymować wielomianem kwadratowym w postaci:

$$t = A \cdot l + \frac{B}{2} l^2 \quad [\text{ms}] \quad /3.1./$$



Rys.8. Zależność czasu skrawania od drogi jako wielomian kwadratowy.

Pierwszy człon wielomianu $A \cdot l$ określa zależność $t = f(1)$ jako liniowy przyrost czasu w funkcji drogi, a wartość współczynnika kierunkowego A jest uzależniona od wartości oporów skrawania materiału obrabianego.

Drugi człon wielomianu $\frac{B}{2} l^2$ określa przyrost czasu skrawania w funkcji drogi, wynikający z postępującego wzrostu siły posuwowej P_x , wskutek narastającego tępienia ostrza.

Wyznaczając pierwszą i drugą pochodną funkcji /3.1/ otrzymujemy:

$$\frac{dt}{dl} = A + Bl \quad [\text{ms/mm}] \quad /3.2./$$

$$\frac{d^2t}{dl^2} = B \quad [\text{ms/mm}^2] \quad /3.3./$$

Z zależności /2.1/ wg Dagnella można wyprowadzić wzór na czas skrawania t [ms], jaki upływa od początku skrawania do końca n -tego odcinka pomiarowego:

$$t = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i \quad /3.4./$$

a po odpowiednio przeprowadzonych przekształceniach otrzymujemy:

$$t = \left(\frac{\tau_0}{l_0} + \frac{L}{2} o \right) l + \frac{L}{2} \frac{o}{l_0} \cdot l^2, \quad /3.5./$$

gdzie: $l = l_0 \cdot n$

Porównując zależność /3.1/ z zależnością /3.5/ i uwzględniając /2.2/ możemy napisać:

$$A = \tau_{01} + \frac{L}{2} o \quad [\text{ms/mm}] \quad /3.6./$$

$$B = L \frac{o}{l_0} \quad [\text{ms/mm}^2] \quad /3.7./$$

Z /3.6./ wynika, że $\tau_{01} = A - \frac{L}{2} o$, czyli, że wartość wskaźnika τ_{01} zależy od wartości wskaźnika L .

Według Dagnella bezwymiarowa wartość o jest liczbowo równa wartości l_0 , zatem wg /3.7/ liczbowa wartość wskaźnika B jest równa liczbowej wartości wskaźnika L . Różnice występują tylko w wymiarach: B [ms/mm²] zaś L [ms/mm]. Zależność /3.1/ umożliwia obliczanie wskaźników skrawalności A i B - wskaźników równoważnych wskaźnikom τ_{01} i L - na pod-

stawie tylko dwu pomiarów czasu skrawania t_1 i t_2 , odpowiadających drogze l_1 i l_2 /rys.9/. Rozwiązanie zależności /3.1/ jako układu dwu równań z dwoma niewiadomymi A i B dla $t = t_1$ i t_2 oraz $l = l_1$ i l_2 daje wzory:

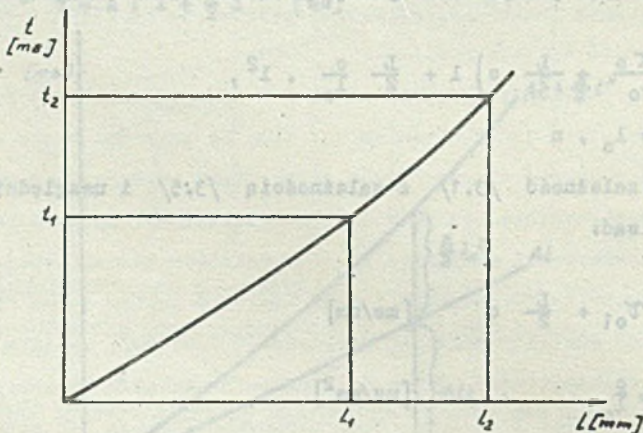
$$B = \frac{2}{l_2 - l_1} \left(\frac{t_2}{l_2} - \frac{t_1}{l_1} \right) \quad [\text{ms/mm}^2] \quad /3.9./$$

$$A = \frac{t_1}{l_1} - \frac{B}{2} l_1 \quad \text{lub} \quad \frac{t_2}{l_2} - \frac{B}{2} l_2 \quad [\text{ms/mm}] \quad /3.10/$$

a przyjmując $l_2 = 2l_1$:

$$B = \frac{t_2 - 2t_1}{l_1^2} \quad [\text{ms/mm}^2] \quad /3.11/$$

$$A = \frac{4t_1 - t_2}{2l_1} \quad [\text{ms/mm}] \quad /3.12/$$



Rys.9. Istota pomiarów przy określaniu wskaźników skrawalności metodą IOS: pomiaru czasu skrawania t_1 i t_2 po przebyciu drogi l_1 i l_2

Opracowana w Instytucie Obróbki Skrawaniem metoda wyznaczenia wskaźnika skrawalności A ze względu na opory skrawania i wskaźnika skrawalności B ze względu na intensywność zużycia ostrza, według metody skrawania przy stałej sile posuwowej P_x , umożliwia dokonywania pomiarów bez

posiadania stanowiska badawczego, wyposażonego w elektroniczne układy pomiaru czasu i drogi.

Z racji bowiem wprowadzenia tylko dwu pomiarów czasu skrawania znacznie dłuższych odcinków drogi skrawania, do pomiarów czasu wystarczą proste układy, a nawet zwykłe czasomierze. Dla całkowitej drogi skrawania $l = 20$ mm wg Dagnella:

$$l_0 = 1 - 2 \text{ mm}$$

$$\tau_n = 500 - 2000 \text{ ms}$$

ilość pomiarów 20

a według metodyki IOS:

$$l_1 = 10 \text{ mm}$$

$$l_2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_1 \approx 5000 \text{ ms}$$

$$t_2 \approx 20\,000 \text{ ms}$$

ilość pomiarów 2.

Porównując cechy metodyki wg Dagnella z cechami metodyki wg IOS można stwierdzić, że:

- metodyka wg Dagnella umożliwia śledzenie rozkładu czasów skrawania τ_n poszczególnych odcinków pomiarowych l_0 wzdłuż drogi skrawania, a stąd wnosić o jednorodności "skrawalnościowej" materiału względnie jej braku, kosztem jednak stosowania drogich układów elektronicznego pomiaru drogi;
- metodyka wg IOS umożliwia określenie średniej wartości wskaźników skrawalności dla zeskrwanej objętości materiału, przy pomiarach drogi z dokładnością rzędu 0,1 mm i czasu z dokładnością rzędu 100 ms; nie wymaga wykreślenia zależności $t = f(l)$.

Określenie wskaźników skrawalności wg obu metodyk wymaga około dziesięciokrotnego powtarzania pomiarów i obliczania wartości średniej.

Ogólnie można zalecić stosowanie metodyki wg Dagnella w laboratoriach placówek naukowych, natomiast metodyka wg IOS może znaleźć zastosowanie w przemyśle.

4. Literatura

1. J. Kaczmarek.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej. WNT, Warszawa 1970.
2. J. Dagnell.: Machinability Test by a Drilling Method. CIRP Ann. Nr 4, 1967.

3. J. Dagnell : Machinability Ranking by Constant Feed Force Method.
CIRP Ann. Nr 3, 1969.
4. I.Szyrajew, J.Dąbrowski : Metoda badania skrawalności stali automa-
towych przy pomocy prób skrawania ze stałą siłą posuwową. Z.N.P.,
Mechanika z. 31, Gliwice 1968.

Adam BUŁAT

METHOD OF EVALUATION OF MACHINABILITY INDEX AT
DRILLING WITH A CONSTANT FEED FORCE

Summary

General considerations are presented on the influence of the factors effective during the machining process on the tool life. Methods of evaluation of machinability index of materials machined or a cutting ability of tools are discussed. They may be evaluated using the J. Dagnell method /of IOS as well - the Institute of Metalcutting/ by measuring the travel and time during the re-drilling with the constant feed force.