

Politechnika Lubelska

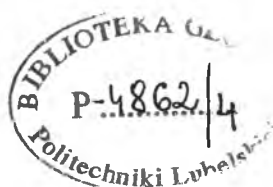
Kazimierz Zaleski

Marian Łozak

**Laboratorium obróbki wiórowej,
ściernej i erozyjnej**

Lublin 1998

OPINIODAWCA:
Prof.dr hab. inż. Eugeniusz Górski



Wydano za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

ISBN 83-87270-24-5

© Copyright by Politechnika Lubelska 1998

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI LUBELSKIEJ
ul. Bernardyńska 13, 20-950 Lublin

Nakład 300 egz., Ark. wyd. 5,48.

Druk i oprawa: Drukarnia Politechniki Lubelskiej
ul. Bernardyńska 13, 20-950 Lublin

Spis treści

Przedmowa.....	5
1. Badania odkształceń plastycznych w obszarze skrawania (oprac. K. Zaleski).....	7
2. Pomiar sił skrawania przy toczeniu (oprac. M. Łozak).....	13
3. Badania wpływu parametrów technologicznych na opory skrawania przy wierceniu (oprac. K. Zaleski).....	23
4. Badanie ciepła skrawania metodą kalorymetryczną (oprac. M. Łozak).....	31
✓ 5. Badanie temperatury skrawania metodą naturalnego termoelementu (oprac. K. Zaleski).....	39
6. Badania trwałości ostrza narzędzi punktowych (oprac. K. Zaleski).....	47
7. Obróbka materiałów trudno skrawalnych (oprac. K. Zaleski).....	59
8. Badanie zużycia ściernic (oprac. K. Zaleski).....	67
9. Pomiar sił występujących w procesie szlifowania taśmami ściernymi (oprac. K. Zaleski).....	75
10. Technologia drażenia elektroerozyjnego (oprac. K. Zaleski).....	83
Literatura.....	93

PRZEDMOWA

Skrypt przeznaczony jest dla studentów kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, specjalizujących się w technologii maszyn, jako pomoc dydaktyczna do ćwiczeń laboratoryjnych z obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej. Może być on przydatny również dla studentów innych specjalności, interesujących się wytwarzaniem elementów maszyn.

Zadania dla studentów odrabiających poszczególne ćwiczenia zostały tak opracowane, aby można było je wykonać na stanowiskach laboratoryjnych znajdujących się w Katedrze Obróbki Ubytkowej Politechniki Lubelskiej.

Opisy wykonania ćwiczeń poprzedzone zostały wiadomościami ogólnymi, które ułatwiają studentom przygotowanie się do zajęć (ćwiczenia laboratoryjne prowadzone są w tym samym semestrze co wykłady).

Ćwiczenie 1

BADANIA ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH W OBSZARZE SKRAWANIA

1.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodami wyznaczania współczynnika spęczenia wióra i kąta pochylenia umownej płaszczyzny ścinania oraz sposobami badań rozkładu mikrotwardości materiału w obszarze skrawania.

1.2. Wiadomości ogólne

Oddzielaniu warstwy skrawanej i przekształcaniu jej w wiór towarzyszą odkształcenia sprężyste i plastyczne skrawanego materiału, wzrost temperatury w obszarze skrawania, tarcie zewnętrzne i wewnętrzne, spęczanie i utwardzanie wióra, zmiany twardości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu, występowanie narostu na ostrzu narzędzia itp. Odkształcenia plastyczne w obszarze powstawania wióra wygodniej jest rozpatrywać w przypadku skrawania swobodnego, tzn. takiego skrawania, w którym udział bierze tylko główna krawędź skrawająca a szerokość warstwy skrawanej jest znacznie większa od jej grubości. Jeżeli skrawanie swobodne prowadzone jest przy kącie przystawienia $\kappa_r = 90^\circ$ i kącie pochylenia $\lambda_s = 0$, to skrawanie takie nazywane jest swobodnym prostokątnym (ortogonalnym).

1.2.1. Metody badań obszaru powstawania wióra

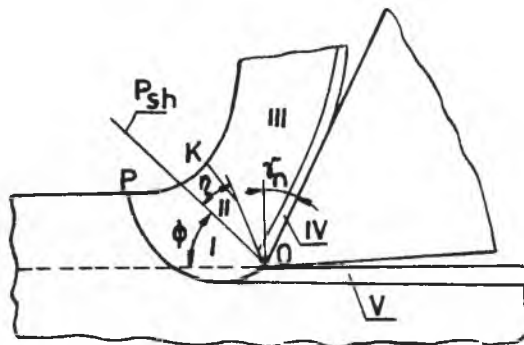
Do ważniejszych metod badań doświadczalnych zmian zachodzących w obszarze powstawania wióra należy zaliczyć:

1. Metodę obserwacji bezpośredniej, polegającą na obserwacji powierzchni bocznej swobodnie skrawanych próbek. Powierzchnie te poleruje się lub nanosi się na nie równomierną siatkę. W pierwszym przypadku odkształcenia uwiadaczniają się w postaci zmatowień, w drugim – poprzez zmianę kształtu kwadratów siatki.

2. Metodę filmowania powierzchni bocznej swobodnie skrawanej próbki (z naniesioną siatką).
3. Metodę metalograficzną, polegającą na obserwacji pod mikroskopem zglądu metalograficznego próbki „obszaru skrawania” (nasady wióra i przylegającego do niej materiału obrabianego) uzyskanej w wyniku gwałtownego przerwania procesu skrawania.
4. Metodę badania rozkładu mikrotwardości w „obszarze skrawania”.
5. Metodę elastooptyczną, opartą na badaniu w świetle spolaryzowanym naprężeń w skrawanym modelu. Ograniczeniem tej metody są różne właściwości materiałów stosowanych na modele elastooptyczne i materiałów najczęściej obrabianych skrawaniem.

1.2.2. Strefy w obszarze powstawania wióra

Obszar materiału obrabianego znajdujący się pod wpływem ostrza skrawającego można podzielić na strefy (rys. 1.1):



Rys.1.1. Strefy materiału obrabianego odkształconego plastycznie pod wpływem działania ostrza [21]

- strefa I obejmuje materiał ograniczony linią początkowych odkształceń plastycznych OP i umowną płaszczyzną ścinania P_{sh} ; w płaszczyźnie P_{sh} , pochylonej pod kątem ścinania ϕ , występują maksymalne naprężenia styczne,
- strefa II obejmuje materiał od płaszczyzny P_{sh} do, pochylonej pod kątem zgniotu η , linii granicznej odkształceń plastycznych OK.; jest to strefa najbardziej intensywnych odkształceń plastycznych,
- strefa III stanowi materiał wióra odkształcony w strefie pierwszej i drugiej,
- strefa IV obejmuje tę część wióra, która uległa dodatkowym odkształceniom plastycznym na skutek tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza,
- strefa V wyznacza odkształcony plastycznie materiał warstwy wierzchniej położony pod powierzchnią obrobioną.

1.2.3. Współczynnik spęczenia wióra

Występujące w obszarze skrawania odkształcenia plastyczne powodują, że wymiary wióra są różne od wymiarów warstwy skrawanej. Jednakże objętość wióra jest równa objętości warstwy skrawanej, z której ten wiór powstał, co można zapisać:

$$hbl = h_{Ch}b_{Ch}l_{Ch} \quad (1.1)$$

gdzie: h, b, l – odpowiednio grubość, szerokość i długość warstwy skrawanej,
 h_{Ch}, b_{Ch}, l_{Ch} – odpowiednio grubość, szerokość i długość wióra.

Po przekształceniu równania (1.1) otrzymuje się zależność na współczynnik spęczenia wióra Λ_h :

$$\frac{l}{l_{Ch}} = \frac{l_{Ch}b_{Ch}}{hb} = \frac{A_{Ch}}{A} = \Lambda_h \quad (1.2)$$

W powyższym wzorze A_{Ch} i A oznaczają odpowiednio pole przekroju wióra i warstwy skrawanej.

Z zależności (1.2) widać, że współczynnik spęczenia wióra może być wyznaczony jako stosunek długości warstwy skrawanej do długości wióra lub jako stosunek pola przekroju wióra do pola przekroju warstwy skrawanej. Można też współczynnik Λ_h obliczyć, mając masę wióra i masę warstwy skrawanej o tej samej długości, co wynika z następującego przekształcenia wzoru (1.2):

$$\Lambda_h = \frac{A_{Ch}l_{Ch}\rho}{Al_{Ch}\rho} = \frac{m_{Ch}}{m} \quad (1.3)$$

gdzie: ρ – masa właściwa obrabianego materiału,

m_{Ch} – masa wióra,

m – masa warstwy skrawanej o długości równej długości wióra.

Można udowodnić [21], że współczynnik spęczenia wióra Λ_h jest powiązany z kątem pochylenia umownej płaszczyzny ścinania Φ zależnością:

$$\text{ctg}\Phi = \frac{\Lambda_h}{\cos\gamma_n} - \text{tg}\gamma_n \quad (1.4)$$

gdzie: γ_n – kąt natarcia.

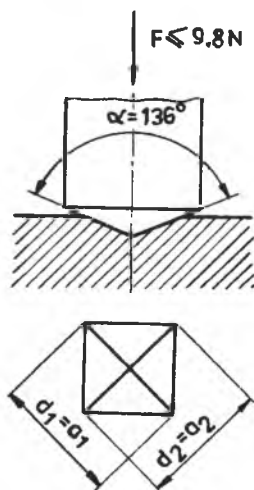
1.2.4. Mikrotwardość materiału w obszarze skrawania

Na podstawie rozkładu mikrotwardości wióra i warstwy wierzchniej można sądzić o wyężeniu materiału podczas skrawania. Aby przeprowadzić pomiary mikrotwardości w obszarze skrawania należy wykonać próbkę charakteryzującą się tym, iż wiór jest połączony z materiałem obrabianym. Do tego celu wykorzystuje się urządzenia umożliwiające gwałtowne przerwanie procesu skrawania. Następnie próbkę taką inkluduje się w żywicy i wykonuje zgląd metalograficzny. Zglądy te powinny być polerowane elektrolitycznie, gdyż polerowanie mechaniczne powoduje utworzenie warstwy wierzchniej zglądu, co wpływa na wyniki pomiarów mikrotwardości.

Mikrotwardość mierzy się różnymi sposobami, które różnią się głównie kształtem penetratora. Najczęściej stosowane są metody Vickersa (penetrator w kształcie ostrosłupa o podstawie kwadratowej) i Knoopa (penetrator w kształcie ostrosłupa o podstawie rombowej).

1.2.5. Pomiary mikrotwardości metodą Vickersa

Pomiar mikrotwardości metodą Vickersa polega na tym, że w badany materiał wciskany jest diamentowy penetrator w kształcie ostrosłupa o kącie wierzchołkowym 136° z określoną siłą $F \leq 9,8\text{N}$ (rys. 1.2). Czas działania obciążenia powinien wynosić 15 sekund. Po dokonaniu odcisku mierzy się wartość jego przekątnej.



Rys.1.2. Pomiar mikrotwardości sposobem Vickersa [7].

Wartość mikrotwardości HV oblicza się jako stosunek siły obciążającej penetrator do pola powierzchni bocznej odcisku (zakłada się, że kąty odcisku są równe kątom penetratora). Wzór na obliczanie mikrotwardości ma postać [7]:

$$HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (1.5)$$

gdzie: $F[N]$ – siła obciążająca penetrator,
 $d[mm]$ – przekątna odcisku.

1.3. Pytania kontrolne

W oparciu o wiadomości zawarte w punkcie 1.2 oraz literaturę [4, 7, 9, 11, 21] należy przygotować się do omówienia następujących zagadnień:

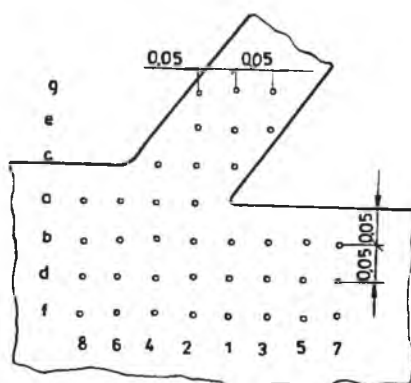
1. Skrawanie swobodne i nieswobodne.
2. Metody badań obszaru tworzenia się wióra.
3. Odkształcenia plastyczne w obszarze tworzenia się wióra.
4. Zjawisko narostu.
5. Definicja współczynnika spęczenia wióra.
6. Metody pomiaru współczynnika spęczenia wióra.
7. Wpływ warunków technologicznych obróbki na współczynnik spęczenia wióra.
8. Związki między współczynnikiem spęczenia wióra a kątem ścinania.
9. Przygotowanie próbek do badań mikrotwardości obszaru powstawania wióra.
10. Metody pomiaru mikrotwardości.

1.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Tokarka kłowa uniwersalna.
- b. Wałki z różnych materiałów.
- c. Noże tokarskie o różnej geometrii.
- d. Kątomierz KN3.
- e. Waga laboratoryjna.
- f. Próbki do pomiaru mikrotwardości obszaru skrawania.
- g. Mikrotwardościomierz PMT3.

1.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Przeprowadzić próby toczenia wybranych materiałów (głębokość skrawania a_p , posuw f oraz prędkość skrawania v_c podać prowadzący ćwiczenia), gromadząc wióry z poszczególnych prób.
2. Zmierzyć kąty przystawienia i natarcia noży użytych do badań.
3. Zważyć i zmierzyć długość zebranych wiórów (po 5 dla każdej próby).
4. Obliczyć masę warstwy skrawanej o długości równej długości poszczególnych wiórów.
5. Obliczyć współczynnik spęczenia wióra według wzoru (1.3).
6. Obliczyć kąt pochylenia umownej płaszczyzny ścinania według zależności (1.4).
7. Zmierzyć mikrotwardość materiału w obszarze powstawania wióra zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1.3 (kółeczkami zaznaczono miejsca, w których należy dokonać pomiarów).
8. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - wyniki pomiarów i obliczeń,
 - wykresy współczynnika spęczenia wióra Λ_h oraz kąta pochylenia umownej płaszczyzny ścinania Φ w funkcji posuwu f , prędkości skrawania v_c , kąta natarcia γ_o oraz kąta przystawienia κ_r ,
 - szkic przedstawiający rozkład mikrotwardości w obszarze powstawania wióra,
 - uwagi i wnioski.



Rys. 1.3. Schemat pomiarów mikrotwardości w obszarze powstawania wióra.

Ćwiczenie 2

POMIAR SIŁ SKRAWANIA PRZY TOCZENIU

2.1. Cel ćwiczenia

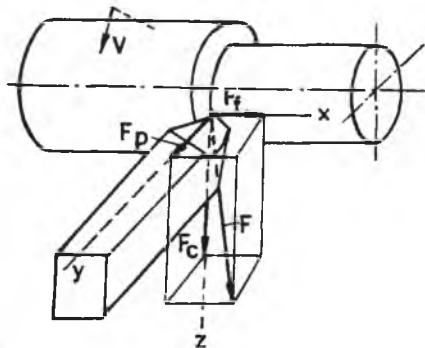
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą pomiaru sił skrawania podczas toczenia za pomocą siłomierza elektrooporowego.

2.2. Wiadomości ogólne

2.2.1. Podstawy teoretyczne

Aby zaistniał proces skrawania, konieczne jest wywarcie odpowiednio dużej siły do ostrza narzędzia dla pokonania oporów odkształceń sprężystych, plastycznych i oporów tarcia materiału skrawanego. Siłę taką nazywamy siłą skrawania. Wypadkowa siła skrawania F jest równa co do wartości i zgodna co do kierunku działania, lecz o zwrocie przeciwnym wypadkowemu oporowi materiału skrawanego.

Przy toczeniu wypadkową siłę skrawania F (opór skrawania) można rozłożyć na trzy siły składowe działające w kierunku trzech osi współrzędnych układu prostokątnego (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Rozkład wypadkowej siły skrawania przy toczeniu

Składowe siły noszą nazwy:

F_c – główna siła skrawania, działająca w kierunku zgodnym z wektorem prędkości ruchu głównego v_c ;

F_f – siła posuwowa, działająca w kierunku zgodnym z wektorem ruchu posuwowego;

F_p – siła odporowa, działająca w kierunku prostopadłym do powierzchni obrabianej.

Największą składową siłą skrawania przy toczeniu jest siła F_c . Przy przeciętnych warunkach skrawania pozostałe siły skrawania można określić w przybliżeniu z następujących zależności:

- przy toczeniu stali:

$$F_p = (0,4 - 0,6) F_c; \quad F_f = (0,2 - 0,4) F_c \quad (2.1)$$

- przy toczeniu żeliwa:

$$F_p = (0,3 - 0,6) F_c; \quad F_f = (0,1 - 0,4) F_c \quad (2.2)$$

Poniżej podane są wzory empiryczne do obliczania sił skrawania łącznie ze współczynnikami poprawkowymi:

- główna siła skrawania:

$$F_c = C_{Fc} a_p^{e_{Fc}} f^{u_{Fc}} K_{mc} K_{kc} K_{rc} K_{\gamma c} K_{cc} [N] \quad (2.3)$$

- siła posuwowa:

$$F_f = C_{Ff} a_p^{e_{Ff}} f^{u_{Ff}} K_{mf} K_{kf} K_{rf} K_{\gamma f} K_{cf} [N] \quad (2.4)$$

- siła odporowa:

$$F_p = C_{Fp} a_p^{e_{Fp}} f^{u_{Fp}} K_{mp} K_{kp} K_{rp} K_{\gamma p} K_{cp} [N] \quad (2.5)$$

gdzie:

C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} – współczynniki stałe zależne od rodzaju materiału obrabianego,

e_{Fc} , e_{Ff} , e_{Fp} – stałe wykładniki potęgowe, obrazujące wielkość wpływu głębokości skrawania,

u_{Fc} , u_{Ff} , u_{Fp} – stałe wykładniki potęgowe, obrazujące wielkość wpływu posuwu,

K_{mc} , K_{mf} , K_{mp} – współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ wytrzymałości lub twardości materiału obrabianego,

K_{kc} , K_{kf} , K_{kp} – współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ wartości kąta przystawienia,

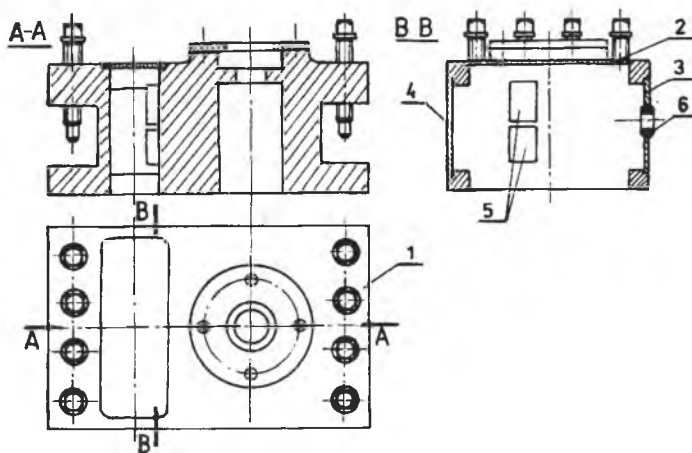
K_{rc} , K_{rf} , K_{rp} – współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ wartości zaokrąglenia wierzchołka noża,

$K_{\gamma c}$, $K_{\gamma f}$, $K_{\gamma p}$ – współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ wartości kąta natarcia,

K_{cc} , K_{cf} , K_{cp} – współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ cieczy chłodząco – smarujących.

2.2.2. Konstrukcja siłomierza elektrooporowego

Na rys. 2.2 przedstawiono siłomierz tokarski elektrooporowy do pomiaru składowych sił skrawania F_c i F_p . Siłomierz ten składa się z imaka 1, który przystosowany jest do zamocowania na tokarce zamiast imaka narzędziowego. Można mocować na nim dwa noże tokarskie. Imak został wykonany z jednolitej płyty ze stali 40H o wymiarach 160 x 115 x 70 mm, w której wykonano wybranie w celu zainstalowania układu nadajnikowego złożonego z czterech beleczek o przekroju prostokątnym.



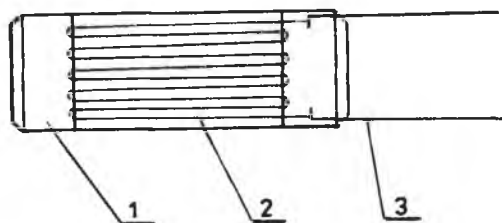
Rys. 2.2. Siłomierz tokarski elektrooporowy.

Na powierzchniach czołowych i bocznych tych nadajników naklejono tensometry. W celu zabezpieczenia tensometrów przed uszkodzeniem mechanicznym i zawilgoceniem, wybrania imaka zamknięto płytkami 2, 3 i 4. Połączenia tensometrów zarówno dla pomiaru siły F_c jak i F_p w odpowiednie układy półmostkowe z jednym czynnym tensometrem oporowym i jednym biernym tensometrem kompensującym wymagają odizolowanej tablicy (łącznika 5), którą wykonano w postaci tekstolitowej płytki, przyklejonej do ścianki bocznej siłomierza. Dzięki temu końcówki lutownicze do połączenia tensometrów z przewodami elektrycznymi, które są przytwierdzone do tablicy, nie mają możliwości zwarcia. Wyprowadzenie zaś przewodów elektrycznych usztywniono za pomocą specjalnej podkładki gumowej 6. Dwa otwory wykonane w podstawie siłomierza umożliwiają zamocowanie go na saniach narzędziowych tokarki. Małą bezwładność układu nadajnikowego zapewniają zarówno czujniki tensometryczne, których częstotliwość odkształcenia dochodzi nawet do kilkudziesięciu kHz, jak też sztywne połączenie siłomierza z saniami narzędziowymi. Taka forma siłomierza jest wolna od luzów, poślizgów, odkształceń stykowych i innych czynników stanowiących przyczynę opóźnień w przekazywaniu obciążeń.

2.2.3. Zasada działania siłomierza elektrooporowego

Siłomierze elektrooporowe należą do grupy elektrycznych przyrządów pomiarowych, pozwalających z dużą dokładnością mierzyć wartości sił skrawania.

Podstawową zaletą siłomierzy tego typu jest mała bezwładność oraz niewielkie wymiary tensometrów elektrooporowych, stosowanych jako elementy pomiarowe. Działanie tensometru elektrooporowego oparte jest na zjawisku zmienności oporu elektrycznego przewodnika na skutek zmian pola przekroju i długości drutu oporowego. Na rys. 2.3 przedstawiono schematycznie tensometr elektrooporowy składający się z podkładki papierowej lub celuloidowej 1, do której przyklejony jest drut oporowy 2 o końcach przylutowanych do grubszych przewodów miedzianych 3 doprowadzających prąd. W celu zmniejszenia wymiarów tensometrów, przewód ułożony jest w kształcie litery U.



Rys. 2.3. Schemat tensometru oporowego.

Aby zabezpieczyć cienkie (średnica około 0,025 mm) druty oporowe tensometru przed przypadkowym oderwaniem od papieru, końcówki tensometru są czasami przyklejone do podkładki oraz wzmocnione paskiem papieru naklejonym na wierzchu. Podobne wzmocnienie znajduje się na przeciwnym końcu tensometru. W ten sposób wykonany tensometr naklejony jest starannie na elementy odkształcalne siłomierza.

Ponieważ tensometr jest ściśle związany z powierzchnią miernika, druty oporowe podlegają tym samym odkształceniom co i materiał, do którego przyklejono tensometr. Drut oporowy ulega zarówno rozciąganiu jak i ściskaniu, zwiększając lub zmniejszając swój opór. Uzyskane w ten sposób zmiany oporu tensometru są niewielkie, mogą być jednak łatwo pomierzone przy pomocy odpowiednich układów mostkowych.

Tensometry wykonane są najczęściej z materiałów o dużej oporności elektrycznej (konstantan lub stopy chromu z niklem). Bardzo ważną charakterystyką tensometrów jest współczynnik czułości k , określony stosunkiem względnej zmiany oporu drutu $\Delta R/R$ do wydłużenia względnego $\Delta l/l$, to jest:

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

Im większa jest bezwzględna wartość k , tym większa jest czułość tensometru i dokładność pomiaru.

2.3. Pytania kontrolne

1. Opór skrawania, siły skrawania i ich składowe przy toczeniu.
2. Wpływ różnych czynników na wartość składowych sił skrawania.
3. Obliczanie sił skrawania.
4. Potrzeba i cel określania sił występujących podczas toczenia.
5. Oddziaływanie składowych sił skrawania na układ OPN.
6. Metody pomiaru sił skrawania.

2.4. Wyposażenie stanowiska

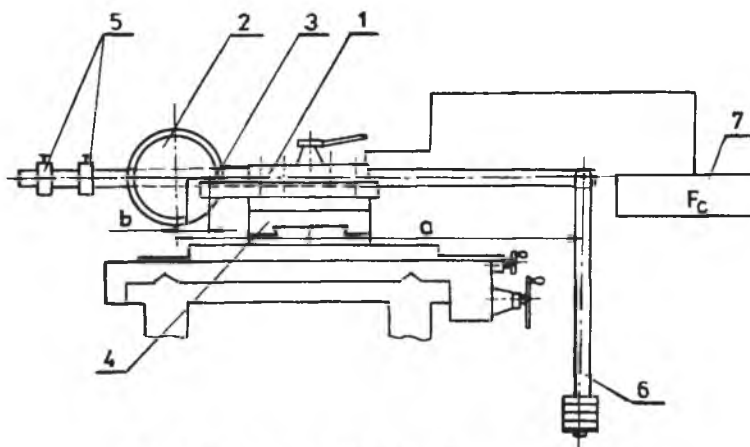
- a) tokarka
- b) siłomierz tokarski elektrooporowy do pomiaru składowych sił skrawania F_c i F_p .
- c) materiał obrabiany,
- d) nóż tokarski,
- e) siłomierz kabłąkowy,
- f) przyrząd dźwigniowy,
- g) płytka oporowa,
- h) mostek tensometryczny,
- i) rejestrator,
- j) taśma światłoczuła.

2.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

2.5.1. Cechowanie siłomierza elektrooporowego dla siły F_c

Cechowanie siłomierza elektrooporowego przeprowadza się bezpośrednio na tokarce przy pomocy przyrządu dźwigniowego, płytki oporowej i mostka tensometrycznego. Cechowany siłomierz obciążamy znanymi wartościami siły działającej w kierunku zgodnym z działaniem siły F_c . Zestaw urządzeń pomia-

rowych przeznaczonych do cechowania siłomierza elektrooporowego dla siły F_c przedstawiono na rys. 2.4.



Rys.2.4. Schemat układu pomiarowego siły F_c .

Przeprowadzenie cechowania:

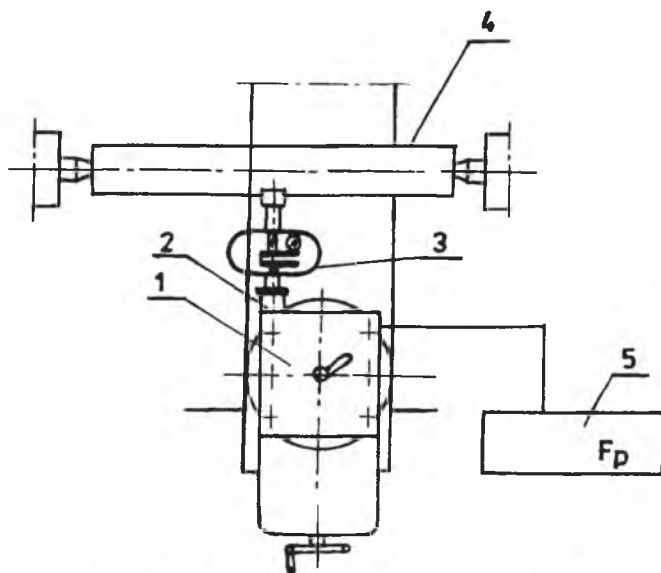
- Nalożenie siłomierza elektrooporowego 1 na sanie narzędziowe 4 tokarki.
- Zamocowanie płytki oporowej 3 w siłomierzu elektrooporowym. Siła wywierana na płytkę oporową poprzez przyrząd dźwigniowy powinna działać w stałym punkcie. W tym celu w otwór wykonany w płytce oporowej włożono kołek o zakończeniu kulistym, który ułatwi prawidłowe, wzajemne ustawienie przyrządu dźwigniowego i płytki oporowej. Płytkę mocujemy zawsze zgodnie z zaznaczoną kreską.
- Umieszczenie korpusu przyrządu dźwigniowego 2 w kłach tokarki i wyważenie układu przeciwcieżarem 5.
- Przygotowanie i podłączenie mostka tensometrycznego.
- Wzorcowanie i zerowanie mostka tensometrycznego oraz ustalenie odpowiedniego zakresu wzmocnienia.
- Dosunięcie płytki oporowej do zderzaka przyrządu dźwigniowego.
- Obciążyć szalkę 6 kolejno ciężarkami, notując wskazania miernika mostka tensometrycznego 7. Po dokonaniu odczytu z miernika, kolejno odciażać szalkę, notując ponownie wskazania miernika mostka tensometrycznego. Otrzymane wyniki wpisać do protokołu badań.

Uwaga! Pomiarów dokonujemy w granicach 0 – 3500 N (co 500 N). W związku z przełożeniem przyrządu dźwigniowego, które wynosi 25 : 1 obciążnikowi 20 N odpowiada siła 500 N.

Przełożenie przyrządu dźwigniowego jest stosunkiem wielkości „a”, będącej odległością punktu zawieszania szalki 6 z ciężarkami od osi korpusu i wielkości „b” będącej odległością punktu przyłożenia siły równoważącej od tej samej osi korpusu przyrządu. Cechowanie należy powtórzyć przynajmniej trzykrotnie.

2.5.2. Cechowanie siłomierza elektrooporowego dla siły F_p

Cechowanie siłomierza elektrooporowego przeprowadza się bezpośrednio na tokarce przy pomocy siłomierza kabłąkowego, wałka, płytki oporowej i mostka tensometrycznego. Zestaw urządzeń pomiarowych przeznaczonych do cechowania siłomierza elektrooporowego dla siły F_p przedstawiono na rys. 2.5.



Rys.2.5. Schemat układu pomiarowego siły F_p .

Przeprowadzenie cechowania:

Po przeprowadzeniu cechowania siły F_c przystępujemy do cechowania siły F_p .

W tym celu należy:

- Zdjąć przyrząd dźwigniowy, a w jego miejsce zamocować wałek 4 w kłach tokarki.
- Ustawić płytkę oporową 2 prostopadle do osi wałka. Ponadto płytkę nie może wystawać z siłomierza elektrooporowego 1 więcej niż 10 mm ze względu na długość siłomierza kabłąkowego. Dokonać obrotu siłomierza elektrooporowego o kąt 90° , a następnie sanie narzędziowe skrócić za pomocą obrotnicy o kąt 90° .
- Przygotować siłomierz kabłąkowy do pomiaru siły.
- Włożyć siłomierz kabłąkowy pomiędzy wałek i płytkę oporową, opierając końcówkę pryzmatyczną o wałek a końcówkę płaską o płytkę oporową.
- Zmienić połączenia czujników elektrooporowych z mostkiem tensometrycznym 5.
- Przeprowadzić wzorcowanie i zerowanie mostka tensometrycznego bez obciążenia oraz przyjąć odpowiedni zakres wzmocnienia.

- g. Wywierać siłę F_p poprzez dźwignię oporową na siłomierz kabłąkowy przy pomocy korbki umieszczonej na śrubie pociągowej sań narzędziowych, notując wskazania miernika mostka tensometrycznego. Otrzymane wyniki wpisać do protokołu badań.

Uwaga: Pomiarów dokonujemy co 500 N w zakresie 0 – 3000 N.

2.5.3. Pomiar i rejestracja przebiegu sił skrawania przy toczeniu

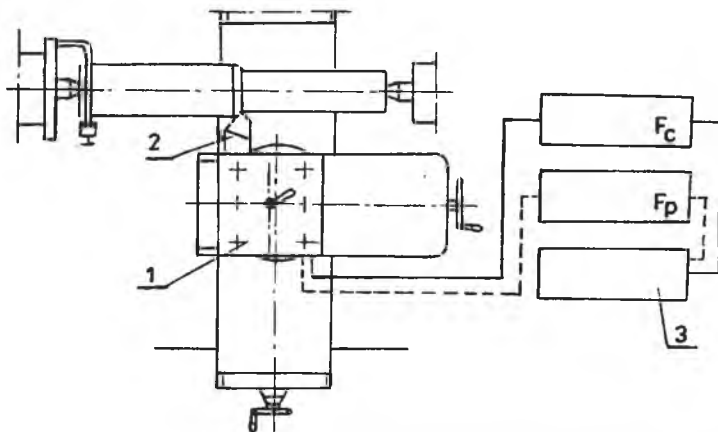
Przed przystąpieniem do pomiaru sił skrawania należy obliczyć wartości składowych sił skrawania (F_c , F_p) na podstawie wzorów empirycznych (2.3 i 2.4) przy następujących warunkach (wartości współczynników i wykładników potęgowych należy dobrać z tablic załączonych do instrukcji ćwiczenia):

- a) stała głębokość skrawania, zmienny posuw,
- b) stały posuw, zmienna głębokość skrawania.

Parametry skrawania ustali prowadzący ćwiczenia. Wyliczone wartości sił skrawania wpisać do protokołu badań.

Wykonanie pomiaru sił skrawania:

Aparaturę pomiarową łączymy zgodnie z rys. 2.6. W miejsce płytki oporowej mocujemy nóż tokarski 2 tak aby był wysunięty na taką samą odległość jak punkt styku płytki oporowej z przyrządem dźwigniowym. Po wyzerowaniu mostka tensometrycznego mierzymy siły F_c i F_p podczas toczenia przy zmiennej głębokości skrawania i posuwie.



Rys.2.6. Schemat układu pomiarowego przy toczeniu.

2.6. Opracowanie sprawozdania, które powinno zawierać:

- Schemat i opis zasady działania siłomierza tokarskiego elektrooporowego.
- Wypełniony protokół badań.

- Wykresy cechowania siłomierza dla siły F_c i F_p .
- Obliczenie wielkości składowych F_c i F_p dla danych parametrów skrawania i porównanie ich z wartościami otrzymanymi w ćwiczeniu.
- Wykresy zależności sił składowych od parametrów obróbki: $F_c = f(a_p)$ i $F_p = f(a_p)$ przy $f = \text{const}$ oraz $F_c = f(f)$ i $F_p = f(f)$ przy $a_p = \text{const}$.
- Wnioski dotyczące wpływu warunków obróbki na wartość składowych sił skrawania oraz dokładność tej metody.

Ćwiczenie 3

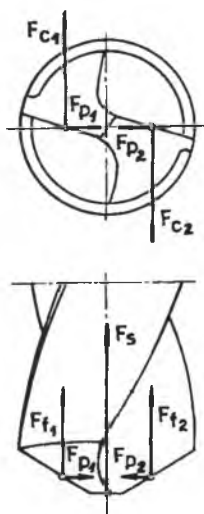
BADANIA WPŁYWU PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA OPORY SKRAWANIA PRZY WIERCENIU

3.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodyką pomiarów oporów skrawania przy wierceniu oraz z wpływem różnych czynników na te opory.

3.2. Wiadomości ogólne

Całkowity opór skrawania przy wierceniu jest sumą oporów cząstkowych występujących na głównych krawędziach skrawających, ścinie i pomocniczych krawędziach skrawających (łysinkach). Rozkład oporów skrawania dla syme-



Rys.3.1. Rozkład oporów skrawania przy wierceniu.

trycznie naostrzonego wiertła pokazano na rys. 3.1. Taki układ sił skrawania można zredukować do wypadkowej siły osiowej F_f i momentu skrawania M :

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} + F_s \quad (3.1)$$

$$M = 0,25(F_{C1} + F_{C2})d \quad (3.2)$$

W powyższych wzorach nie uwzględniono oporów związanych z tarcieniem na łysinkach wiertła.

3.2.1. Obliczanie oporów skrawania przy wierceniu

Siłę osiową oraz moment skrawania można obliczyć korzystając ze wzorów statystyczno-doświadczalnych [21]:

- dla wiercenia w pełnym materiale

$$F_f = C_F f^{u_F} d^{a_F} v_C^{s_F} K_H [N] \quad (3.3)$$

$$M = C_M f^{u_M} d^{a_M} v_C^{s_M} K_H [Nm] \quad (3.4)$$

- dla powiercania, pogłębiania i rozwiercania

$$F_f = C_F f^{u_F} a_p^{e_F} d^{a_F} v_C^{s_F} K_H [N] \quad (3.5)$$

$$M = C_M f^{u_M} a_p^{e_M} d^{a_M} v_C^{s_M} K_H [Nm] \quad (3.6)$$

gdzie: f – posuw ,mm/obr.; d – średnica otworu ,mm; a_p – głębokość skrawania ,mm; v_C – prędkość skrawania ,m/min.; C_F , C_M – stałe zależne głównie od materiału obrabianego; u_F , u_M , e_F , e_M , a_F , a_M , s_F , s_M – wykładniki potęgowe określające intensywność wpływu czynników zmiennych na siłę i moment skrawania; K_H – współczynnik poprawkowy ujmujący wpływ wytrzymałości lub twardości materiału obrabianego.

Dla wiercenia otworu w stali konstrukcyjnej węglowej o wytrzymałości $R_m = 750$ MPa wartości stałych i współczynników we wzorach (3.3) – (3.6) są następujące: $C_F = 847$; $a_F = 1,0$; $u_F = 0,7$; $s_F = 0$; $C_M = 0,338$; $a_M = 1,9$; $u_M = 0,8$; $s_M = 0$; a w przypadku wiercenia w żeliwie szarym o twardości HB = 190 – $C_F = 605$; $a_F = 1,0$; $u_F = 0,8$; $s_F = 0$; $C_M = 0,233$; $a_M = 1,9$; $u_M = 0,8$; $s_M = 0$.

Współczynnik poprawkowy K_H można wyznaczyć według zależności:

- dla stali

$$K_H = \left(\frac{R_m}{750} \right)^{0,75} \quad (3.7)$$

- dla żeliwa szarego:

$$K_H = \left(\frac{HB}{190} \right)^{0,6} \quad (3.8)$$

gdzie: HB – twardość Brinnela.

3.2.2. Czynniki wpływające na opór skrawania

Siła osiowa oraz moment skrawania uzależnione są od materiału obrabianego, narzędzia, parametrów skrawania, płynu obróbkowego oraz długości i średnicy wierconego otworu.

A. Wpływ materiału obrabianego

Oddziaływanie materiału obrabianego na opór skrawania wiąże się głównie z jego charakterystyką naprężeniowo – odkształceniową oraz właściwościami ciernymi. W obrębie jednego gatunku materiału oddziaływanie to sprowadzić można do zależności od wytrzymałości na rozciąganie R_m lub twardości HB. W praktyce przy obliczaniu siły i momentu skrawania wpływ tych wielkości uwzględnia się w postaci odpowiednich współczynników poprawkowych (zależności 3.7 i 3.8).

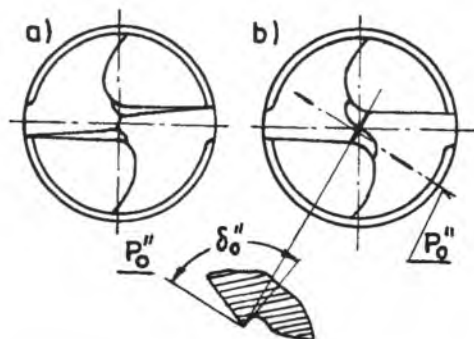
B. Wpływ narzędzia

Wpływ narzędzia na opór skrawania wiąże się z właściwościami ciernymi materiału ostrza, wymiarami narzędzia, kształtem części roboczej oraz zużyciem ostrza.

Ze wzrostem średnicy narzędzia rosną opory skrawania, co wiąże się ze zwiększeniem szerokości warstwy skrawanej oraz, co jest istotne dla momentu skrawania, zwiększeniem długości ramienia pary sił F_C (rys. 3.1).

Obniżenie oporów skrawania można osiągnąć poprzez zastosowanie korekcji krawędzi poprzecznej (ścina) wiertła. Korekcja ta polega na zmniejszeniu długości ścina poprzez odpowiednie usunięcie materiału albo na tak zwanym zaostreniu rdzenia, przez co zostaje zmniejszony na ścinie kąt skrawania (rys. 3.2).

Istotny wpływ na opór skrawania wywierają też kąty: przystawienia χ_r i pochylenia linii śrubowej λ'_s . Ze wzrostem kąta przystawienia następuje zwiększenie siły osiowej i zmniejszenie momentu skrawania. Kąt pochylenia linii śrubowej rowka wiórowego w sposób jednoznaczny jest powiązany z kątem natarcia. Ze wzrostem kąta λ'_s rośnie również kąt natarcia, co powoduje zmniejszenie zarówno siły osiowej jak i momentu skrawania.



Rys. 3.2. Korekcja ostrza wiertła krętego na krawędzi poprzecznej:
a) skrócenie długości ścina, b) zaostrenie rdzenia [8].

Na zmianę siły osiowej i momentu skrawania wpływa zużycie ostrza wiertła, przy czym szybki wzrost oporu skrawania obserwuje się w zakresie dużego stopienia ostrza wiertła.

C. Wpływ parametrów skrawania

W przypadku wiercenia w pełnym materiale głębokość skrawania jest równa połowie średnicy wierconego otworu, a przy powiercaniu – połowie różnicy średnic po i przed powiercaniem. Zwiększenie zarówno głębokości skrawania jak i posuwu prowadzi do zwiększenia przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, co powoduje wzrost zarówno momentu skrawania jak i siły osiowej. Oddziaływanie parametrów na opór skrawania znajduje odzwierciedlenie w wartościach wykładników potęgowych we wzorach (3.3) – (3.6).

D. Wpływ płynu obróbkowego

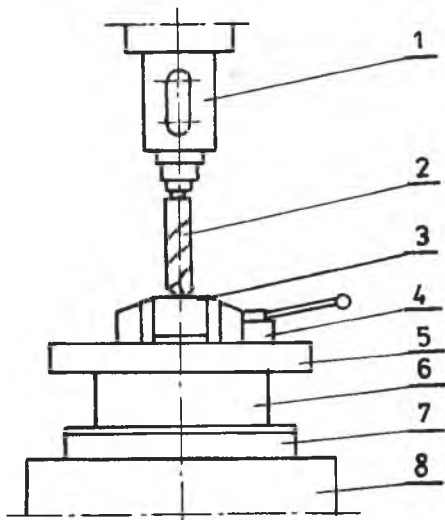
Zmniejszenie oporu skrawania w wyniku zastosowania cieczy obróbkowych wiąże się ze zmniejszeniem tarcia między powierzchniami roboczymi wiertła a materiałem obrabianym oraz z oddziaływaniem powierzchniowo – aktywnym tych cieczy. Zmniejszenie momentu skrawania i siły osiowej na skutek stosowania cieczy obróbkowych jest różne dla różnych materiałów. Przykładowo dla stali konstrukcyjnej zmniejszenie to wynosi 10 – 25%, dla stali narzędziowej 20 – 40%, a dla stopów lekkich 30 – 40% [21].

E. Wpływ długości wierconego otworu

Ze wzrostem długości wierconego otworu obserwuje się wzrost oporów skrawania. Wiąże się to ze zwiększonym tarcie łysinek o powierzchnię obrobioną i wiórów o powierzchnię rowków wiórowych oraz z utrudnionym doprowadzeniem cieczy do ostrza wiertła.

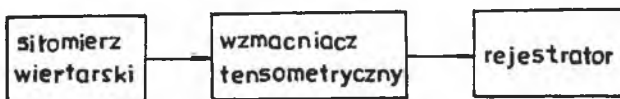
3.2.3. Stanowisko do pomiaru oporów skrawania

Stanowisko badawcze pokazane zostało na rys. 3.3. Na stole wiertarki 8 zamocowany jest siłomierz wiertarski, który umożliwia pomiar momentu skrawania i siły osiowej podczas wiercenia, powiercania, pogłębiania, rozwiercania i gwintowania. Siłomierz składa się z podstawy 7 połączonej z płytą górną 5 za pomocą pierścienia 6. Na płycie górnej znajduje się imadło szybko mocujące 4, w którym zamocowany jest przedmiot obrabiany 3. Otwór w przedmiocie 3 wykonuje się za pomocą wiertła 2 zamocowanego we wrzecionie wiertarki 1.



Rys.3.3 Stanowisko do pomiaru siły osiowej i momentu skrawania.

Działanie siłomierza opiera się na zasadzie pomiaru odkształceń pierścienia sprężynującego 6, które następuje w wyniku obciążenia przedmiotu obrabianego siłą osiową i momentem skrawania. Odkształcenia te mierzone są za pomocą naklejonych na elementach pierścienia tensometrów oporowych. Siłomierz połączony jest za pomocą dwóch przewodów, oznaczonych odpowiednio F_f (siła osiowa) i M (moment skrawania) ze wzmacniaczem tensometrycznym, który z kolei połączony jest z rejestratorem umożliwiającym zapis przebiegu wartości siły i momentu skrawania (rys. 3.4).

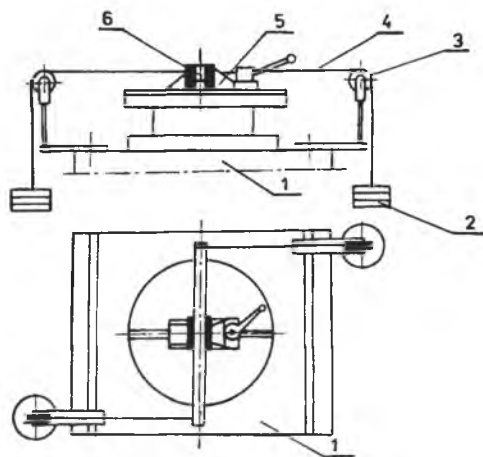


Rys.3.4. Schemat blokowy stanowiska.

3.2.4. Wzorcowanie siłomierza

Przed przystąpieniem do pomiarów niezbędne jest przeprowadzenie wzorcowania siłomierza.

Sposób wzorcowania ze względu na moment skrawania przedstawiono na rys. 3.5 [13]. W uchwycie 5 zamocowana jest belka 6, końce której połączone są za pomocą linek stalowych 4 z szalkami 2. Linki prowadzone są przez krążki 3 zamocowane za pomocą wsporników do stołu wiertarki 1.



Rys.3.5. Wzorcowanie siłomierza ze względu na moment skrawania [13].

Obciążenie szalek ciężarkami wywołuje oddziaływanie na siłomierz momentem

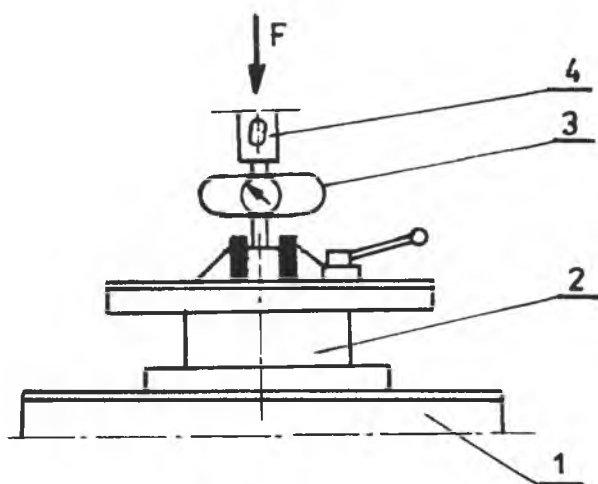
$$M = Fl[Nm] \quad (3.9)$$

gdzie: F – obciążenie jednej szalki, N, (obciążenie obydwu szalek jest jednakowe),

l – długość belki, m.

Podczas stopniowego zwiększania lub zmniejszania momentu M (nakładania i zdejmowania ciężarków) należy zapisywać wskazania rejestratora, co umożliwi sporządzenie wykresu wzorcowania (wskazania rejestratora w funkcji zadanego momentu M).

Sposób wzorcowania siłomierza ze względu na siłę osiową F_f przedstawiono na rys. 3.6. Polega ono na oddziaływaniu na siłomierz wiertarski 2 siłą F o znanej wartości, której kierunek i zwrot jest zgodny z kierunkiem i zwrotem siły osiowej F_b i odczytywaniu wartości wskazań rejestratora. Siłę F wywiera się poprzez podnoszenie do góry stołu wiertarki 1, a jej wartość odczytywana jest na siłomierzu kabłąkowym 3, umiejscowionym między siłomierzem wiertarskim 2 a wrzecionem wiertarki 4.



Rys.3.6 Wzorcowanie siłomierza ze względu na siłę osiową [13].

3.3. Pytania kontrolne

1. Rozkład oporów skrawania przy wierceniu.
 2. Obliczanie momentu skrawania i siły osiowej.
 3. Metody korekcji ostrzy wiertel krętych.
 4. Wpływ różnych czynników na opory skrawania przy wierceniu.
 5. Budowa i zasada pracy siłomierza wiertarskiego.
 6. Pomiary za pomocą czujników tensometrycznych.
 7. Wzorcowanie siłomierza ze względu na siłę osiową i moment skrawania.
- Literatura uzupełniająca: [4, 8, 11, 21].

3.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Wiertarka kadłubowa.
- b. Siłomierz wiertarski.
- c. Wzmacniacz tensometryczny.
- d. Rejestrator.
- e. Zestaw wiertel korygowanych i nie korygowanych.
- f. Próbka ze stali węglowej konstrukcyjnej lub żeliwa szarego.
- g. Siłomierz kabłąkowy.
- h. Oprzyrządowanie do wzorcowania siłomierza ze względu na moment skrawania.
- i. Komplet ciężarków.

3.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Zmontować układ do wzorcowania siłomierza ze względu na moment skrawania (według rys. 3.5) i przeprowadzić wzorcowanie.
2. Zmontować układ do wzorcowania ze względu na siłę osiową (według rys. 3.6) i przeprowadzić wzorcowanie.
3. Zmontować układ do pomiaru oporów skrawania (według rys. 3.3).
4. Przeprowadzić pomiary momentu skrawania i siły osiowej podczas wiercenia wiertłem korygowanym i nie korygowanym, zmieniając posuw f oraz prędkość obrotową n (parametry technologiczne poda prowadzący ćwiczenia).
5. Obliczyć moment skrawania i siłę osiową (dla zadanych parametrów) według wzorów (3.3 – 3.6) i porównać z wynikami pomiarów.
6. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - opis wzorcowania siłomierza i przeprowadzenia pomiarów,
 - szkice stosowanych wiertel i opis korekcji,
 - obliczenia siły osiowej F_f i momentu skrawania M ,
 - wyniki pomiarów (protokoły),
 - wykresy siły osiowej i momentu skrawania w funkcji posuwu i prędkości skrawania sporządzone na podstawie pomiarów oraz obliczeń,
 - wnioski.

Ćwiczenie 4

BADANIE CIEPŁA SKRAWANIA METODĄ KALORYMETRYCZNĄ

4.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą kalorymetryczną pomiaru ciepła powstałego w procesie wiercenia.

4.2. Wiadomości ogólne

Całkowita ilość wydzielonego ciepła Q w ciągu jednej minuty jest równa pracy skrawania wykonanej przez ostrze w tym czasie

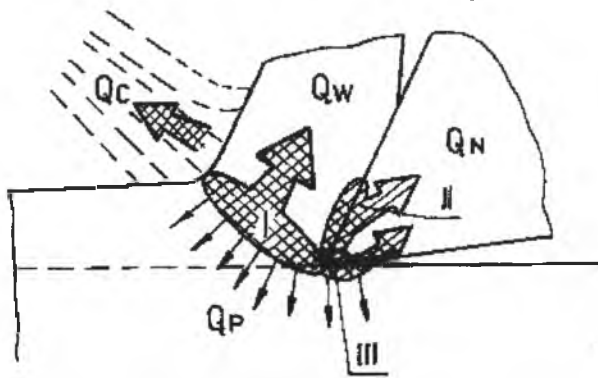
$$Q = F_C v_C [J/min] \quad (4.1)$$

gdzie:

F_C – główna siła skrawania w N,

v_C – prędkość skrawania w m/min.

Głównymi źródłami ciepła w procesie skrawania są (rys. 4.1):



Rys.4.1. Źródła ciepła i drogi jego odprowadzenia.

I – praca odkształceń sprężystych i plastycznych materiału warstwy skrawanej ($Q_{pl} \approx 70 \% Q$),

II – praca tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza ($Q_{tn} \approx 20 \% Q$),

III – praca tarcia powierzchni przyłożenia ostrza o materiał obrabiany ($Q_{tp} = \sim 10 \% Q$).

Uwzględniając powyższe trzy główne źródła ciepła można napisać:

$$Q = Q_{pl} + Q_m Q_{tp} \quad (4.2)$$

Źródło ciepła I znajduje się w obszarze obejmującym płaszczyznę poślizgu, a więc w obszarze materiału oddzielanego przez ostrze. W związku z tym ciepło pochodzące z tego źródła nagrzewa wiór i łącznie z nim odprowadzane jest z miejsca skrawania. Ponieważ jednak źródło to umiejscowione jest przed ostrzem, dlatego część ciepła powstającego w tym źródle płynie w kierunku przedmiotu obrabianego. Intensywność źródła I ciepła rośnie ze wzrostem prędkości skrawania i z tego powodu przy skrawaniu materiału z większą prędkością przedmiot obrabiany bardziej nagrzewa się.

Ciepło ze źródła II częściowo przenika do wióra a częściowo do materiału ostrza narzędzia. Procentowo więcej ciepła powinno przenikać do ostrza niż do wióra, ponieważ wiór jest silnie nagrzany ciepłem źródła I. Jednak duży wpływ ma tu współczynnik przewodności cieplnej, który na ogół jest mniejszy dla materiałów narzędziowych niż materiałów skrawanych.

Ciepło źródła III odpływa do ostrza i bezpośrednio do przedmiotu obrabianego. Procentowo znacznie więcej ciepła z tego źródła przenika do przedmiotu obrabianego ze względu na niższą jego temperaturę niż ostrza oraz z uwagi na wspomniany powyżej większy współczynnik przewodności cieplnej materiału skrawanego.

Odprowadzenie ciepła powstającego w procesie skrawania z obszaru skrawania odbywa się za pośrednictwem:

$$Q = Q_w + Q_p + Q_n + Q_{pow} + Q_{pr} + (Q_c) \quad (4.3)$$

gdzie:

Q_w – ciepło odprowadzone przez wiór,

Q_p – ciepło odprowadzone przez przedmiot obrabiany,

Q_n – ciepło odprowadzone przez narzędzie,

Q_{pow} – ciepło odprowadzone przez otaczające powietrze,

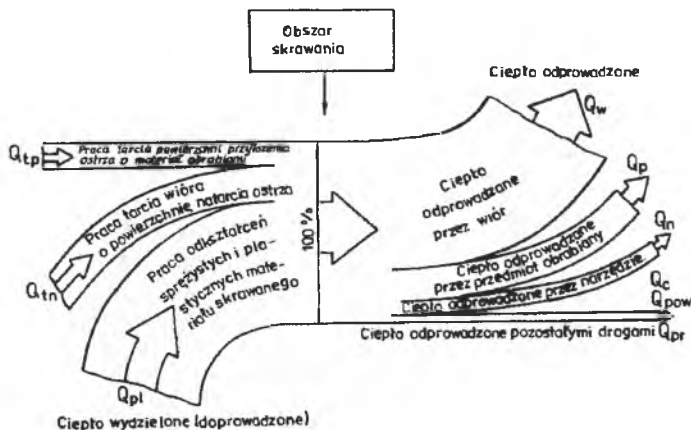
Q_{pr} – ciepło odprowadzone przez promieniowanie,

Q_c – ciepło odprowadzone przez ciecz chłodząco – smarującą (odprowadzenie ciepła nie występuje przy pracy „na sucho”, to znaczy bez chłodzenia).

Największą drogą odprowadzania ciepła z obszaru skrawania jest wiór. Przyjmuje się, że ilość ciepła odprowadzonego razem z wiórem wynosi około 75 %, przy czym ilość ta rośnie wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Ilość ciepła odprowadzonego przez przedmiot obrabiany wynosi około 15 %, natomiast przez narzędzie około 8 %. Reszta ciepła (około 2 %) odprowadzana jest

innymi drogami, to znaczy przez otaczające powietrze, przez promieniowanie i ciecz chłodząco – smarującą.

Bilans ciepła powstającego w procesie skrawania przedstawiony jest na rys. 4.2.



Rys.4.2. Bilans ciepła w procesie skrawania.

Na ilość ciepła wpływają te same czynniki, które wpływają na wzrost praca skrawania będącej iloczynem siły skrawania F_c i prędkości skrawania v_c .

Najważniejsze znaczenie ma tu prędkość skrawania, ponieważ praca skrawania jest wprost proporcjonalna do prędkości skrawania.

Na wzrost ilości powstającego ciepła wpływa również zwiększenie przekroju warstwy skrawanej, gdyż rośnie wtedy siła skrawania, a więc i praca, przy czym głębokość skrawania wpływa silniej niż posuw.

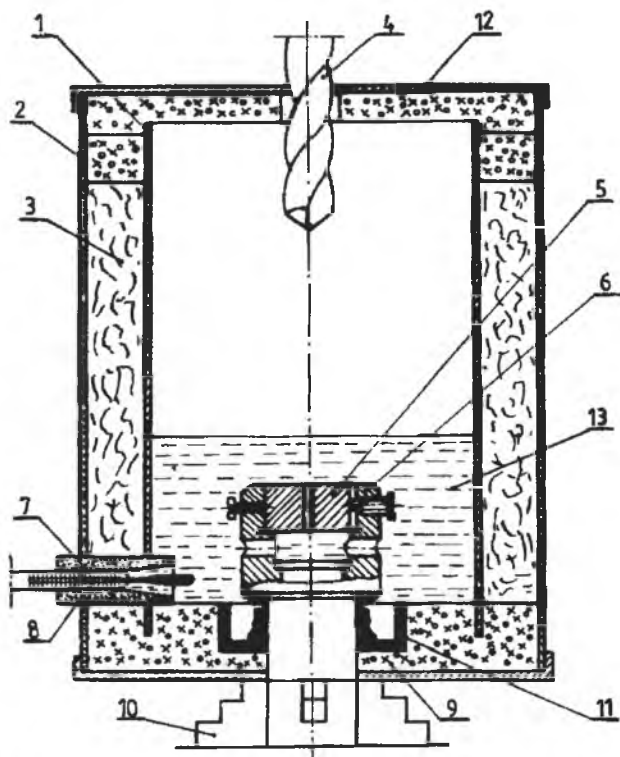
Zjawisko wzrostu ilości ciepła wraz ze wzrostem prędkości skrawania oraz nieproporcjonalny rozkład odprowadzenia ciepła przez wiór, narzędzie i materiał obrobiony stanowi podstawę wysoko wydajnego skrawania. Przy tym skrawaniu dzięki dużej ilości ciepła, wytwarzającego się w warstwie skrawanej, otrzymujemy spadek wytrzymałości tej warstwy, a więc proces tworzenia wióra jest ułatwiony.

Ciepło wydzielone w procesie skrawania można wyznaczyć metodą kalorymetryczną.

4.2.1. Konstrukcja przyrządu

Na rys. 4.3 przedstawiono schemat kalorymetru do mierzenia ilości ciepła, powstającego w procesie wiercenia i do wyznaczania temperatury wiórów.

Do budowy kalorymetru użyto blachy mosiężnej z tego względu, że mosiądz wykazuje dużą odporność na korozję, jak również posiada małą wartość ciepła właściwego, co powoduje zmniejszenie pochłaniania ciepła.



Rys.4.3. Schemat kalorymetru do mierzenia ilości ciepła przy wierceniu.

Naczynia zewnętrzne i wewnętrzne zostały pokryte cienką warstwą chromu. Warstewka ta jako jasna i błyszcząca mniej promieniuje ciepła na zewnątrz, jak również mniej ciepła pochłania z zewnątrz. Właściwość ta wpływa na większą dokładność otrzymywanych wyników podczas prób – zmniejsza się możliwość nagłych zmian temperatury w samym kalorymetrze.

Części składowe kalorymetru:

1. Naczynie wewnętrzne – blacha mosiężna 0,5 mm.
2. Naczynie zewnętrzne – blacha mosiężna 0,5 mm.
3. Wata szklana.
4. Narzędzie – wiertło.
5. Badana próbka.
6. Oprawka do mocowania próbki.
7. Korek gumowy.
8. Termometr ze skalą o działce elementarnej $0,1^{\circ}\text{C}$.
9. Dno gumowe.
10. Uchwyt tokarski samocentrujący.
11. Uszczelka (pierścień uszczelniający).
12. Gumowa pokrywka.
13. Woda.

4.3. Pytania kontrolne

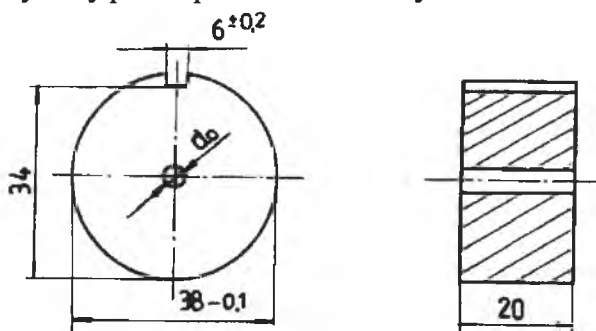
1. Wyszczególnić źródła powstawania ciepła przy skrawaniu oraz drogi odpływu ciepła z obszaru skrawania.
2. Bilans ciepła.
3. Wpływ warunków skrawania na temperaturę.
4. Metody pomiaru temperatury.

4.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Wiertarka WKA 25.
- b. Kalorymetr.
- c. Narzędzie – wiertło NWKa.
- d. Próbki.
- e. Oprawka do mocowania próbek.
- f. Uchwyt tokarski samocentrujący.
- g. Termometr ze skalą o działce elementarnej $0,1^{\circ}\text{C}$.
- h. Woda.
- i. Zlewka laboratoryjna.
- j. Waga analityczna.

4.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

Badania kalorymetrem (rys. 4.3) przeprowadza się na wiertarce WKA 25. Do badań używane są identyczne próbki (5), które ważymy na wadze analitycznej. Kształt i wymiary próbki przedstawiono na rys. 4.4.



Rys.4.4. Kształt i wymiary próbki

W celu wyeliminowania wpływu ścina požądane jest, aby próbki miały wywiercony otwór osiowy o średnicy większej od długości ścina. W dnie kalorymetru jest otwór z pierścieniem uszczelniającym (11), przez który przetknięta

jest oprawka (6) z próbką (5). Wystająca część chwytowa oprawki mocowana jest w uchwycie samocentrującym (10) na stole wiertarki, tak aby uszczelniający korek gumowy (7) opierał się o dno gumowe (9). Zmniejsza to drgania kalorymetru podczas prób wiercenia. Następnie w korku gumowym (7) umieszcza się termometr (8). Termometr w kalorymetrze należy tak umieścić aby skrawane wióry nie padały bezpośrednio na zbiornik z rtęcią, gdyż może to spowodować nagłe wzrosty temperatury, utrudniające pomiar.

Następnie wlewamy do kalorymetru 500 cm^3 zimnej wody (13), zakładamy gumową pokrywkę (12), która będzie zabezpieczała przed stratami ciepła wskutek promieniowania. Opuszczamy wiertło (4) do wody (13), pozostawiając niewielki odstęp od czoła próbki i po włączeniu ruchu obrotowego wrzeczona wiertarki obserwujemy wskazania termometru (8) aż do momentu ustalenia się temperatury. Dokonujemy odczytu temperatury początkowej t_p i wiercimy otwór w próbce na długości w granicach 10 – 20 mm (długość poda prowadzący ćwiczenia). Po osiągnięciu zadanej długości należy lekko cofnąć wiertło (4), nie wyłączając ruchu obrotowego narzędzia, który powoduje mieszanie wody. Gdy wskazania termometru (8) ustalą się odczytujemy temperaturę końcową t_k , następnie wycofujemy wiertło w położenie początkowe, wyłączamy obroty wiertarki i wyjmujemy próbkę (5) z oprawki mocującej (6). Po oczyszczeniu i osuszeniu ważymy próbkę na wadze analitycznej. Różnica ciężaru próbki przed i po wierceniu stanowi ciężar wiórów. Przed każdą następną próbą skrawania należy wszystkie elementy przyrządu dokładnie oczyścić z wiórów i wysuszyć.

W trakcie ćwiczeń laboratoryjnych należy przeprowadzić badania ciepła skrawania:

- 1) przy stałym posuwie, zmieniając prędkość skrawania,
- 2) przy stałej prędkości skrawania, zmieniając posuw.

Temperaturę wiórów obliczamy z bilansu cieplnego:

$$(t_m - t_k)m_m c_m = m_w c_w (t_k - t_p) + A(t_k - t_p) \quad (4.4)$$

stąd:

$$t_m = t_k + \frac{(m_w c_w + A)(t_k - t_p)}{m_m c_m} \quad (4.5)$$

gdzie:

- t_m – temperatura wiórów, $^{\circ}\text{C}$,
- t_p – temperatura początkowa według wskazań termometru, $^{\circ}\text{C}$,
- t_k – temperatura końcowa według wskazań termometru, $^{\circ}\text{C}$,
- m_m – masa wiórów powstałych przy obróbce, g,
- m_w – masa wody wlanej do kalorymetru, g,
- c_m – ciepło właściwe materiału wiórów, $\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$,
- c_w – ciepło właściwe wody (przyjęto $c_w = 1 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C}$),
- A – stała kalorymetru ($A = 62,4 \text{ cal}^{\circ}\text{C}$).

Ilość ciepła, powstałą w procesie skrawania, obliczamy ze wzoru:

$$Q = (t_m - t_k)m_m c_m = (m_w c_w + A)(t_k - t_p) \text{ [cal]} \quad (4.6)$$

oznaczenia – jak wyżej.

Należy opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:

- wypełniony protokół badań,
- szkic urządzenia i opis sposobu przeprowadzenia ćwiczenia,
- obliczenia t_m i Q ,
- wykresy przedstawiające wpływ badanych czynników na t_m i Q z wytłumaczeniem przyczyn takiego przebiegu wykresów,
- wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

Ćwiczenie 5

BADANIE TEMPERATURY SKRAWANIA METODĄ NATURALNEGO TERMEOLEMENTU

5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodyką pomiarów temperatury metodą naturalnego termoelementu oraz z wpływem parametrów technologicznych na temperaturę skrawania przy toczeniu.

5.2. Wiadomości ogólne

Znajomość temperatury skrawania ma duże znaczenie praktyczne ze względu na jej związek z trwałością ostrza narzędzia, dokładnością obróbki oraz stanem warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu.

Jedną z ważnych cech materiału narzędziowego jest odporność na działanie podwyższonej temperatury. W przypadku stali szybko tnących możliwość pracy w podwyższonych temperaturach ograniczona jest temperaturą odpuszczania danej stali. Dla krajowych stali szybko tnących spadek twardości do 60 HRC następuje w zakresie temperatur 605 – 640 °C. Ostrza z węglików spiekanych zachowują dobre właściwości skrawne do temperatury 800 – 900°C, a ostrza ze spiekanych tlenków glinu mogą pracować w temperaturze do 1200°C.

Od temperatury skrawania uzależnione są odkształcenia cieplne narzędzia i przedmiotu obrabianego. Odkształcenia te wpływają z kolei na dokładność wymiarowo – kształtową obrabianych części.

Ponadto temperatura skrawania wpływa na właściwości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu. Wysokie temperatury prowadzić mogą do zmian struktury warstwy wierzchniej (np. podczas szlifowania). Również temperatura w strefie skrawania wywiera wpływ na stan technologicznych naprężeń własnych.

5.2.1. Metody pomiaru temperatur skrawania

Do określania temperatury skrawania stosuje się głównie metody eksperymentalne. Ważniejsze metody pomiaru temperatur to:

- a) metody oparte na zasadzie pomiaru siły termoelektrycznej,
- b) metoda termokolorów,
- c) metoda termometrów półprzewodnikowych,
- d) metoda intensywności promieniowania,
- e) metoda kalorymetryczna.

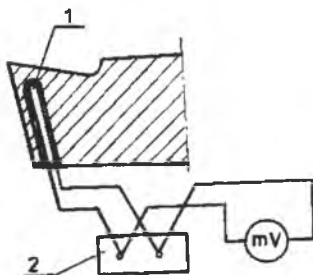
Metody wykorzystujące pomiar siły termoelektrycznej są najczęściej stosowane w praktyce. Metody te oparte są na zjawisku Peltiera, polegającym na występowaniu siły termoelektrycznej w punkcie styku dwóch różnych metali. Przyczyny tego zjawiska tłumaczy się różnicą liczby swobodnych elektronów po obu stronach złączenia dwóch różnych metali w danej temperaturze, co powoduje powstanie pewnej różnicy potencjałów (zależnej od temperatury). Siła termoelektryczna może również występować na długości poszczególnych przewodów obwodu zamkniętego o ile ma miejsce gradient temperatury (zjawisko Thomsona).

Do pomiarów temperatury używa się termoelementów, które tworzą dwa przewody z różnych materiałów połączone na jednym końcu (spoina pomiarowa). Przewody termoelementów wykonuje się z materiałów znajdujących się możliwie daleko w szeregu termoelektrycznym, aby uzyskać duże siły termoelektryczne przy określonej różnicy temperatur, np. żelazo – konstantan, miedź – konstantan, chromel – kopel.

Metody pomiaru temperatur skrawania oparte na zasadzie pomiaru siły termoelektrycznej mogą być realizowane jako:

- obcego termoelementu,
- półobcego termoelementu,
- naturalnego termoelementu (jedno- i dwunarzędziowa).

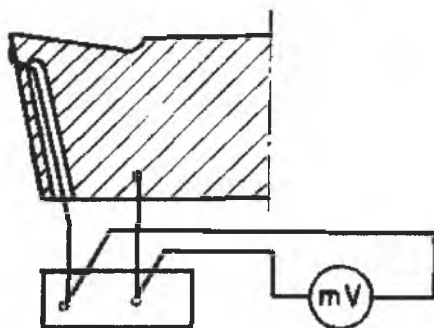
Metoda obcego termoelementu (rys. 5.1) polega na wprowadzeniu do otworu w ostrzu narzędzia lub w przedmiocie obrabianym spoiny pomiarowej 1 termoelementu. Zimne końce termoelementu umieszcza się w termostacie 2. Pomiar siły termoelektrycznej dokonuje się za pomocą miliwoltomierza



Rys.5.1. Schemat pomiaru temperatury skrawania metodą obcego termoelementu.

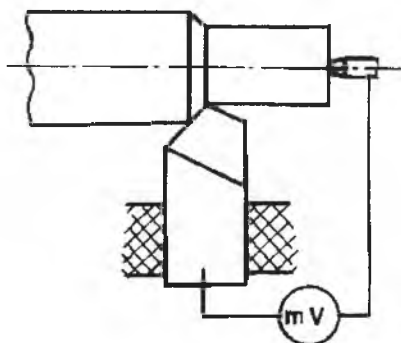
(mV). Do zalet tej metody należy zaliczyć możliwość stosowania typowego termoelementu o znanej charakterystyce, natomiast do wad – brak możliwości pomiaru temperatury na powierzchniach roboczych narzędzia, zmianę warunków cieplnych na skutek wykonania otworu, ograniczenie liczby ostrzeń narzędzia.

W metodzie półobcego termoelementu (rys. 5.2) jednym z materiałów termoelementu jest drut (np. z konstantanu) wprowadzony do otworu w narzędziu i zaklepany na jego powierzchni, a drugim materiałem termoelementu jest materiał samego narzędzia. Metoda ta umożliwia pomiar temperatury na powierzchniach roboczych narzędzia, wymaga jednak wzorcowania dla każdego materiału narzędzia.



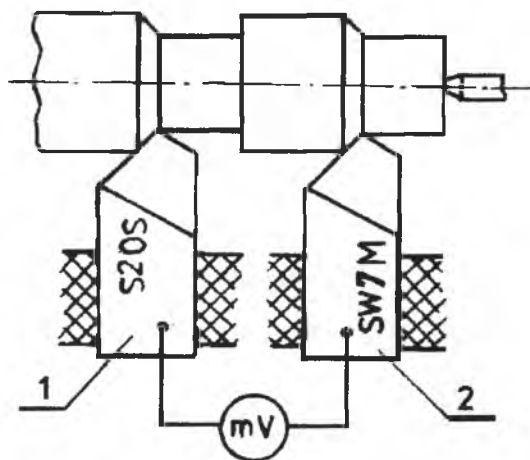
Rys.5.2. Schemat pomiaru temperatury metodą półobcego termoelementu.

Metoda naturalnego termoelementu – jednonarzędziowa polega na tym, że rolę jednego przewodu termoelementu spełnia narzędzie, a drugiego – obrabiany przedmiot (rys. 5.3). Spoinę pomiarową stanowi powierzchnia styku ostrza z przedmiotem obrabianym i wiórem. W obszarze tego styku temperatura nie jest jednakowa, zatem miliwoltomierz wskazuje wartość siły termoelektrycznej odpowiadającej temperaturze średniej. Wadą tej metody jest konieczność wzorcowania dla każdego zestawienia materiał obrabiany – materiał ostrza.



Rys.5.3. Schemat pomiaru temperatury skrawania metodą naturalnego termoelementu - jednonarzędziową.

Metoda naturalnego termoelementu – dwunarzędziowa przedstawiona została na rys. 5.4. Rolę przewodów termoelementu spełniają dwa noże tokarskie 1 i 2 o identycznej geometrii ostrza ale wykonane z różnych materiałów,



Rys.5.4. Schemat pomiaru temperatury skrawania metodą naturalnego termoelementu - dwunarzędziową.

dających możliwie dużą siłę termoelektryczną. Skrawanie obydwoma nożami prowadzone jest przy zachowaniu takich samych warunków technologicznych. Jednakże różne współczynniki tarcia oraz przewodnictwa cieplnego materiałów, z których wykonane są noże 1 i 2, powodują powstanie pewnej różnicy temperatur skrawania poszczególnymi nożami. Różnice te można skompensować poprzez zastosowanie różnych przekrojów trzonków noży, a tym samym zróżnicowanie strumienia przepływającego ciepła. Zaletą tej metody w stosunku do metody jedonarzędziowej jest to, że nie występuje potrzeba wzorcowania dla każdego materiału obrabianego.

Metoda termokolorów polega na pokrywaniu powierzchni roboczych ostrza substancjami chemicznymi, które charakteryzują się trwałą zmianą barwy po przekroczeniu określonej temperatury. Metoda ta umożliwia uzyskanie obrazu pola temperatur na tych powierzchniach ostrza, które nie ulegają ścieraniu w procesie obróbki.

Metoda termometrów półprzewodnikowych polega na wykorzystaniu termistorów do pomiaru temperatury w określonym punkcie narzędzia lub przedmiotu obrabianego (z uwagi na małe wymiary termistorów można przyjąć, że pomiar temperatury jest praktycznie punktowy). Termistory są to nieliniowe rezystory półprzewodnikowe o rezystancji znacznie zmieniającej się wraz ze zmianami temperatury.

Metoda intensywności promieniowania polega na skupianiu na spoinie pomiarowej termoelementu promieniowania cieplnego (promieniowanie podczerwone) wysyłanego z określonego miejsca w strefie skrawania. Zaletą tej

metody jest możliwość pomiaru temperatury w dowolnym „widocznym” miejscu, natomiast wadą trudności z dokładnym wzorcowaniem urządzenia. Metodą kalorymetryczną mierzy się ilość ciepła odprowadzanego ze strefy skrawania przez wióry (szczegółowy opis tej metody został zamieszczony w ćwiczeniu 4).

5.2.2. Czynniki wpływające na temperaturę skrawania

Temperatura skrawania zależy od:

- a) właściwości materiału obrabianego,
- b) materiału, geometrii ostrza oraz wymiarów narzędzia,
- c) rodzaju płynu obróbkowego,
- d) parametrów technologicznych skrawania.

A. Wpływ materiału obrabianego

Na temperaturę skrawania wpływa twardość i wytrzymałość na rozciąganie materiału obrabianego. Ze wzrostem twardości i wytrzymałości na rozciąganie rosną opory skrawania a tym samym ilość wydzielanego ciepła. Zatem dla danego gatunku materiału im większa jest twardość i wytrzymałość na rozciąganie tym większa jest zwykle temperatura skrawania.

O temperaturze skrawania decyduje nie tylko ilość wydzielonego ciepła ale także prędkość, z jaką ciepło ze strefy skrawania jest odprowadzane. Cechą materiału będącą miarą zdolności przewodzenia ciepła przez ten materiał jest współczynnik przewodzenia ciepła. Badania doświadczalne potwierdzają, że przy skrawaniu materiałów charakteryzujących się dużym współczynnikiem przewodności cieplnej (np. aluminium, miedź) temperatura jest znacznie niższa niż przy skrawaniu metali o małym współczynniku.

Na temperaturę skrawania wpływa także rodzaj powstających wiórów. Jeżeli powstają wióry odpryskowe, to maksymalne naciski występują bliżej krawędzi skrawającej niż przy wiórach wstęgowych i w związku z tym ilość ciepła przypadająca na jednostkę masy ostrza jest większa, co prowadzi do wzrostu temperatury ostrza.

B. Wpływ narzędzia

Wpływ materiału ostrza na temperaturę skrawania wiąże się ze współczynnikiem przewodności cieplnej oraz ciepłem właściwym tego materiału.

Wzrost kąta natarcia γ powoduje zmniejszanie pracy odkształceń plastycznych i pracy wióra o powierzchnię natarcia, a wraz z tym zmniejsza się ilość wydzielonego ciepła, ale z drugiej strony wpływa na zmniejszenie kąta ostrza β , a tym samym na zmniejszenie masy ostrza, co pogarsza warunki odprowadzania

ciepła. Badania doświadczalne wykazują, że w zakresie małych kątów natarcia (do kilkunastu stopni) następuje spadek temperatury skrawania wraz ze wzrostem kąta γ , natomiast dla większych kątów obserwuje się zahamowanie spadku temperatury skrawania.

Wzrost kąta przystawienia χ_r wiąże się ze zmniejszeniem długości czynnej krawędzi skrawającej, zwiększeniem grubości warstwy skrawanej i zmniejszeniem kąta wierzchołkowego ϵ_r . Wskutek tych zmian obserwuje się wzrost temperatury ostrza wraz ze zwiększaniem kąta przystawienia.

Również promień naroża r_e wpływa na temperaturę skrawania. Zwiększenie promienia r_e prowadzi do wzrostu sił skrawania a więc i ilości wydzielanego się ciepła ale jednocześnie następuje zwiększenie długości czynnej krawędzi skrawającej. W sumie ma miejsce zmniejszenie obciążenia cieplnego ostrza (przeważa czynnik związany z wydłużeniem czynnej krawędzi skrawającej) i, co potwierdzają dane doświadczalne, ze wzrostem promienia zaokrąglenia naroża następuje obniżenie temperatury skrawania.

Na temperaturę skrawania mają wpływ także wymiary narzędzia. Ze wzrostem przekroju narzędzia ułatwiony jest odpływ ciepła ze strefy skrawania i temperatura ostrza jest mniejsza.

C. Wpływ płynu obróbkowego

Płyny obróbkowe wpływają na obniżenie temperatury skrawania, co wiąże się z:

- odprowadzaniem przez płyn pewnej ilości ciepła, przy czym skuteczność chłodzenia jest większa przy dużych prędkościach skrawania,
- zmniejszaniem tarcia między powierzchniami roboczymi ostrza a wiórem i przedmiotem obrabianym (większa skuteczność przy małych prędkościach skrawania),
- działaniem dodatków powierzchniowo – aktywnych.

A. Wpływ parametrów technologicznych

Wpływ parametrów technologicznych na temperaturę skrawania przy obróbce niektórych materiałów narzędziami jednoostrzowymi można przedstawić w postaci wzorów statystyczno – doświadczalnych [9, 24]:

- dla stali o wytrzymałości $R_m = 400$ MPa

$$T_s = 138v_c^{0,4} f^{0,16} a_p^{0,07} [^{\circ}C] \quad (5.1)$$

- dla stali o wytrzymałości $R_m = 700$ MPa

$$T_s = 154v_c^{0,48} f^{0,33} a_p^{0,1} [^{\circ}C] \quad (5.2)$$

- dla żeliwa o twardości HB = 190

$$T_s = 120v_c^{0,5} f^{0,22} a_p^{0,04} [^{\circ}C] \quad (5.3)$$

- dla stopu tytanu WT14L (według norm rosyjskich)

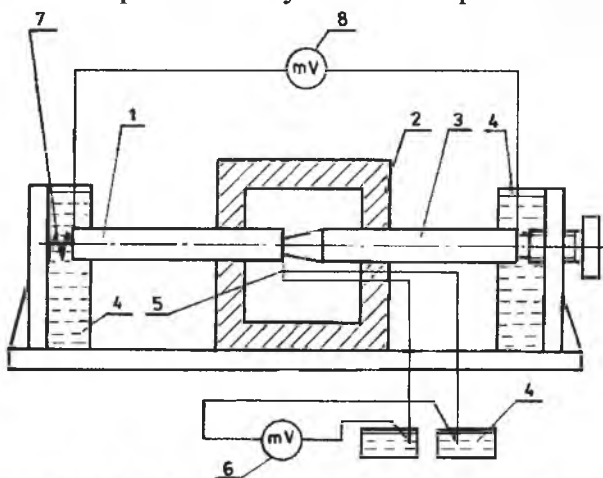
$$T_s = 270v_c^{0,41} f^{0,27} a_p^{0,1} [^{\circ}C] \quad (5.4)$$

gdzie: v_c - prędkość skrawania [m/min], f - posuw [mm/min], a_p - głębokość skrawania [mm].

Powyższe wzory służyć mogą tylko do przybliżonego określania temperatury skrawania.

5.2.3. Wzorcowanie termoelementów

Wzorcowanie termoelementów ma na celu określenie zależności między siłą termoelektryczną STE występującą w miejscu styku metali tworzących termoparę a temperaturą T tego miejsca styku. Schemat stanowisk do wzorcowania termoelementów pokazano na rys. 5.5. Końce próbek materiału narzędzia



Rys.5.5. Schemat wzorcowania termoelementów.

1 i materiału obrabianego 3 znajdują się w piecu elektrycznym 2 tworząc spoinę pomiarową (docisk próbek zapewnia sprężyna 7). Zimne końce próbek znajdują się w naczyniach z lodem 4. Siła termoelektryczna STE występująca między próbkami 1 i 3 mierzona jest za pomocą miliwoltomierza 8. Temperatura T w piecu 2 może być zmieniana za pomocą autotransformatora. Pomiar temperatury T odbywa się za pomocą termoelementu żelazo – konstantan 5 (o znanej charakterystyce) i miliwoltomierza 6. Temperatura zimnych końców termoelementu wzorcowanego jest sprawdzana za pomocą termometrów rtęciowych umieszczonych w naczyniach z lodem.

5.3. Pytania kontrolne

1. Źródła ciepła w procesie skrawania
2. Skutki wzrostu temperatury narzędzia i przedmiotu obrabianego.
3. Opis metod pomiaru temperatury skrawania.
4. Wady i zalety poszczególnych metod.
5. Wpływ materiału obrabianego, narzędzia i warunków technologicznych obróbki na temperaturę skrawania.
6. Wzorcowanie termoelementów naturalnych.

Literatura uzupełniająca: [4, 9, 11, 14, 21].

5.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Tokarka uniwersalna.
- b. Urządzenie do wzorcowania termopar.
- c. Autotransformator.
- d. Miliwoltomierze.
- e. Próbki materiału obrabianego i materiału narzędziowego do wzorcowania.
- f. - Próbki różnych materiałów do toczenia.
- g. Noże tokarskie.

5.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Zmontować układ do wzorcowania termopar.
2. Wyznaczyć charakterystykę $STE = f(T)$ dla podanego przez prowadzącego termoelementu materiał obrabiany – materiał ostrza.
3. Zmontować układ do pomiaru temperatury skrawania metodą jednonarzędziową.
4. Zmierzyć temperaturę skrawania przy toczeniu, stosując różne prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania.
5. Obliczyć temperaturę skrawania według wzorów empirycznych i porównać z wynikami pomiarów.
6. Zmierzyć geometrię ostrza noża używanego do badań.
7. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - opis wzorcowania termoelementu,
 - wyniki wzorcowania i charakterystykę $STE = f(T)$,
 - opis pomiaru temperatury skrawania,
 - wyniki pomiarów temperatury skrawania i wykresy T_{skr} w funkcji prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania.
 - obliczenia temperatury skrawania według wzorów empirycznych,
 - szkic narzędzia używanego do badań,
 - wnioski końcowe.

Ćwiczenie 6

BADANIA TRWAŁOŚCI OSTRZA NARZĘDZI PUNKTOWYCH

6.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodyką badań trwałości ostrza oraz wpływem różnych czynników na tę trwałość.

6.2. Wiadomości ogólne

Trwałość ostrza T jest to łączny czas pracy narzędzia skrawającego w ustalonych warunkach obróbki do chwili stępienia ostrza. Sumę wszystkich okresów trwałości ostrza nazywa się trwałością całkowitą lub żywotnością narzędzia. Czas pracy narzędzia, w którym błąd obróbki spowodowany zużyciem ostrza nie przekracza tolerancji danego wymiaru obróbkowego, nazywamy jego trwałością wymiarową.

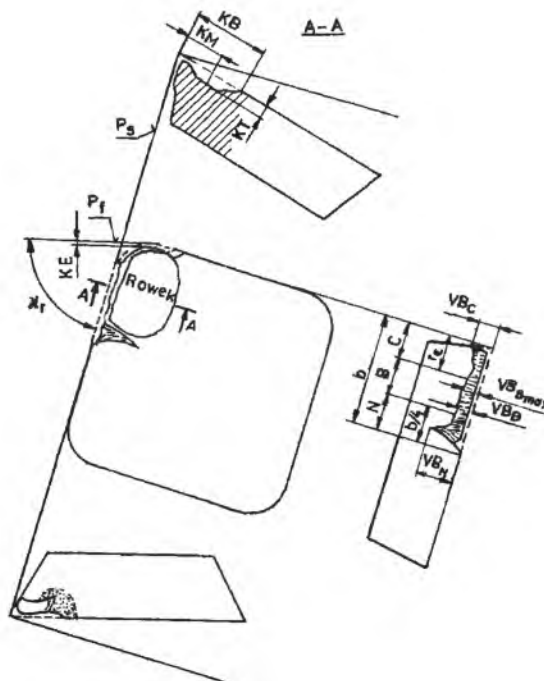
6.2.1. Parametry geometryczne zużycia ostrza

Zużycie ostrza ocenia się za pomocą parametrów geometrycznych (wskaźników) zużycia, pokazanych na rys. 6.1 [21]. Starcie powierzchni przyłożenia charakteryzuje się wskaźnikami:

- VB_B – średnia szerokość pasma zużycia,
- VB_{Bmax} – największa szerokość pasma zużycia,
- VB_N – wyłobienie,
- VB_C – szerokość pasma zużycia naroża.

Wskaźniki charakteryzujące zużycie powierzchni natarcia to:

- KT – największa głębokość rowka zużycia,
- KM – odległość między pierwotną krawędzią skrawającą a największym zagłębieniem rowka zużycia,
- KB – odległość między pierwotną krawędzią skrawającą a brzegiem rowka zużycia najbardziej odległym od tej krawędzi,
- KT/KM – współczynnik rowka zużycia.



Rys.6.1. Wskaźniki zużycia ostrza [21].

Ważnym wskaźnikiem jest też, oznaczane przez KE , cofnięcie naroża ostrza (zużycie promieniowe), które określane jest jako odległość naroża od płaszczyzny bocznej P_b , poprowadzonej przez naroże w jego pierwotnym położeniu.

Zużycie ostrza może narastać w sposób ciągły (bezstopniowy) lub skokowy (katastroficzny) objawiający się gwałtownym ubytkiem materiału naroża.

6.2.2. Czynniki wpływające na zużycie ostrza

Do czynników mających największy wpływ na zużycie ostrza należy zaliczyć: rodzaj materiału obrabianego, materiał, geometrię i stan powierzchni ostrza narzędzia, rodzaj płynu obróbkowego oraz parametry skrawania.

A. Wpływ materiału obrabianego

Na zużycie ostrza mają wpływ właściwości mechaniczne oraz fizykochemiczne materiału obrabianego, które związane są głównie ze składem chemicznym oraz strukturą tego materiału. Charakter oddziaływania właściwości materiału obrabianego na trwałość ostrza jest bardzo złożony i dotychczas niedostatecznie wyjaśniony.

B. Wpływ narzędzia

Zużycie ostrza uzależnione jest od właściwości mechanicznych i fizykochemicznych materiału, z którego wykonana jest część robocza narzędzia. Właściwości te decydują o zachowaniu zdolności skrawnych narzędzia w podwyższonych temperaturach, o odporności na zużycie ściernie oraz wytrzymałościowe (pęknięcia, wyłamania, wykruszenia itp.).

Istotny wpływ na zużycie ostrza ma jego geometria. Ze wzrostem kątów natarcia i przyłożenia maleje tarcie i odkształcenia plastyczne, co prowadzi do zmniejszenia oporów skrawania i ilości ciepła wydzielanego w strefie obróbki. Jednocześnie wzrost tych kątów powoduje pogorszenie warunków odprowadzania ciepła i spadek wytrzymałości ostrza (zmniejsza się kąt ostrza). To oddziaływanie pozytywne i negatywne tłumaczy występowanie wartości optymalnych kątów natarcia i przyłożenia, przy których zużycie ostrza jest najmniejsze.

Wzrostowi kąta przystawienia towarzyszy zwiększenie zużycia ostrza. Tłumaczy się to zmniejszeniem długości czynnej krawędzi skrawającej, co prowadzi do wzrostu jednostkowego obciążenia krawędzi skrawającej. Ponadto następuje zmniejszenie kąta wierzchołkowego, co utrudnia odprowadzanie ciepła i powoduje wzrost temperatury ostrza.

Ze wzrostem promienia zaokrąglenia wierzchołka ostrza obserwuje się zmniejszenie zużycia ostrza. Wiąże się to ze wzrostem objętości naroża, a tym samym ułatwieniem odprowadzenia ciepła i obniżeniem temperatury ostrza.

Również stan powierzchni ostrza ma znaczny wpływ na jego zużycie. Dogłądanie powierzchni roboczych ostrza, mające na celu zmniejszenie chropowatości tych powierzchni oraz zmniejszenie szczyratości krawędzi skrawającej, powoduje zmniejszenie zużycia ostrza, zwłaszcza w pierwszym okresie pracy.

Odporność na zużycie ostrzy narzędzi ze stali szybko tnącej można zwiększyć poprzez zastosowanie zabiegów obróbki cieplno – chemicznej (azotowanie, tlenoazotowanie, węgloazotowanie, siarkowęgloazotowanie). Ważnym sposobem zwiększania odporności na zużycie narzędzi (zarówno ze stali szybko tnącej jak i z węglików spiekanych) jest pokrywanie ich powierzchni roboczych warstwą azotku tytanu.

C. Wpływ warunków skrawania

Zmiana parametrów skrawania prowadzi do zmian obciążenia ostrza oraz temperatury skrawania, co z kolei wpływa na zużycie ostrza. Największy wpływ na zużycie ostrza wywiera prędkość skrawania, a w dalszej kolejności posuw i głębokość skrawania.

Zmniejszeniu zużycia ostrzy sprzyja stosowanie cieczy obróbkowych. Wiąże się to z obniżeniem temperatury w strefie skrawania, zmniejszeniem

oporów tarcia, a także zmianą plastyczności materiału w strefie skrawania (oddziaływanie powierzchniowo – aktywne). Wpływ cieczy obróbkowych na zużycie ostrza zaznacza się tym wyraźniej, im gorsze są zdolności skrawne ostrza narzędzia.

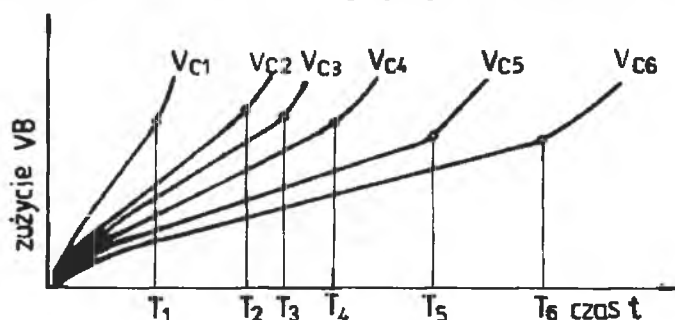
6.2.3. Metody badań trwałości ostrza

Badania zależności trwałości ostrza T od parametrów skrawania v_c , f oraz a_p mogą być prowadzone metodą eksperymentu jednoczynnikowego (rozróżnia się metodę klasyczną i metodę analizy stałej wartości zużycia) oraz przy wykorzystaniu metod matematycznego planowania doświadczeń.

Zależności cząstkowe $T = f(v_c)$ mogą być wyznaczone metodami przyspieszonymi, które pozwalają na znaczne skrócenie czasu badań, jednakże odbywa się to kosztem dokładności ustalonych zależności. Do bardziej znanych metod przyspieszonych należy zaliczyć metodę toczenia promieniowego oraz metodę toczenia stożków.

A. Metoda eksperymentu jednoczynnikowego

Próby skrawania prowadzi się dla różnych wartości jednego z parametrów (np. v_c), przy zachowaniu niezmienności pozostałych warunków obróbki, aż do momentu wystąpienia okresu przyspieszonego zużycia ostrza. Na rys. 6.2 pokazano sposób wyznaczania trwałości ostrza T dla wartości parametru zmiennego v_{c1} , v_{c2} , ..., v_{c6} . Podobnie postępuje się przy wyznaczaniu zależności trwałości



Rys.6.2. Krzywe zużycia ostrza dla różnych wartości badanego parametru v_c .

ostrza od pozostałych parametrów skrawania. Metoda ta może być stosowana również do oceny wpływu innych czynników na trwałość ostrza (np. kąta przystawienia, kąta natarcia itp.). Wadą tej metody jest długotrwałość i duże koszty przeprowadzenia badań.

Powyższa metoda nosi nazwę klasycznej. Pewną jej modyfikację stanowi tzw. metoda analizy stałej wartości zużycia [14]. Metoda ta charakteryzuje się tym, że tylko dla jednej wartości parametru zmiennego prowadzi się próbę

skrawania do osiągnięcia przez ostrze okresu przyspieszonego zużycia, ustalając w ten sposób dopuszczalne zużycie ostrza VB_{dop} . Tak ustaloną wartość VB_{dop} przyjmuje się jako obowiązującą dla pozostałych prób skrawania (dla wszystkich prób trwałość ostrza T odpowiada wartości zużycia równej VB_{dop}).

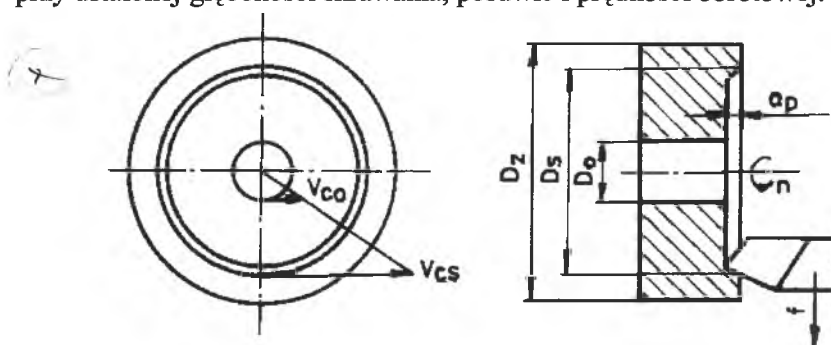
B. Metoda matematycznego planowania doświadczeń

Matematyczne planowanie doświadczeń umożliwia określenie szukanej zależności między czynnikami badanymi a czynnikiem wynikowym na podstawie minimalnej liczby doświadczeń.

Rozróżnia się programy statyczne i dynamiczne. Programy statyczne charakteryzują się tym, że wartości wszystkich układów czynników badanych, dla których mierzona jest wartość czynnika wynikowego, określone są przed rozpoczęciem badań. W przypadku stosowania programów dynamicznych, przed rozpoczęciem pomiarów określa się tylko wartość jednego układu czynników badanych, natomiast wartości pozostałych czynników badanych określone są według pewnej procedury w trakcie badań z uwzględnieniem wyników wcześniejszych pomiarów.

C. Wyznaczanie zależności $T = f(v_c)$ metodą toczenia promieniowego

Tarczę z otworem toczy się poprzecznie od średnicy D_0 (rys.6.3) przy ustalonej głębokości skrawania, posuwie i prędkości obrotowej. Parametry



Rys.6.3. Kinematyka metody toczenia promieniowego.

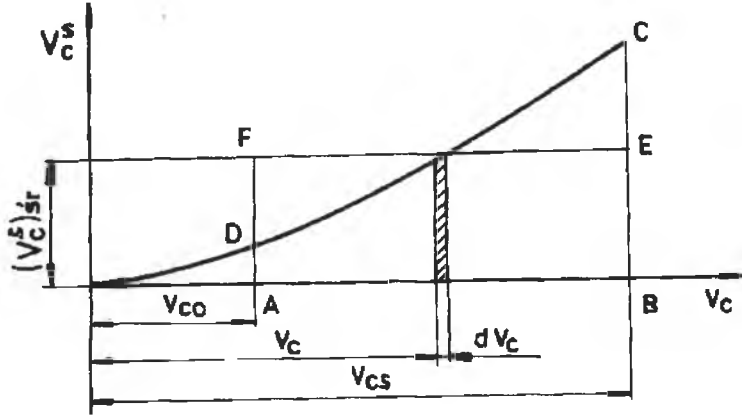
te dobiera się w taki sposób, żeby stępienie ostrza nastąpiło zanim nóż osiągnie średnicę zewnętrzną tarczy D_z . Średnicę, przy której następuje stępienie ostrza, oznacza się D_s . W czasie toczenia prędkość skrawania rośnie od wartości v_{co} (odpowiadającej średnicy D_0) do wartości v_{cs} (odpowiadającej średnicy D_s).

Zakładając, że trwałość ostrza w przypadku toczenia ze zmienną prędkością skrawania zależy od wartości średniej v_c^s , znaną zależność na trwałość ostrza T w funkcji prędkości skrawania v_c można zapisać:

$$T = \frac{C_T}{(v_c^s)_{sr}} \quad (6.1)$$

gdzie: C_T , s – stałe wyznaczone doświadczalnie.

Z wykresu $v_c^s = f(v_c)$ widać (rys. 6.4), że wartość średnia v_c^s jest równa wysokości prostokąta ABEF, którego pole jest równe polu figury ABCD.



Rys.6.4. Wykres funkcji $v_c^s = f(v_c)$.

$$poleABCD = \int_{v_{co}}^{v_{cs}} v_c^s dv_c = \frac{v_{cs}^{s+1} - v_{co}^{s+1}}{s+1} \quad (6.2)$$

$$poleABEF = (v_{cs} - v_{co})(v_c^s)_{sr} \quad (6.3)$$

Po porównaniu (6.2) i (6.3) otrzymuje się:

$$(v_c^s)_{sr} = \frac{v_{cs}^{s+1} - v_{co}^{s+1}}{(s+1)(v_{cs} - v_{co})} \quad (6.4)$$

Trwałość ostrza narzędzia (czas skrawania w trakcie próby) można określić jako:

$$T = \frac{D_s - D_0}{2fn} \quad (6.5)$$

Uwzględniając, że

$$D_s = \frac{1000v_{cs}}{\pi n} \quad \text{oraz} \quad D_0 = \frac{1000v_{co}}{\pi n}$$

wzór (6.5) można zapisać:

$$T = \frac{1000(v_{cs} - v_{co})}{2\pi f n^2} \quad (6.6)$$

Po podstawieniu do wzoru (6.1) danych z zależności (6.4) i (6.6) oraz po wykonaniu przekształceń otrzymuje się:

$$v_{cs}^{s+1} - v_{co}^{s+1} = \frac{2\pi f n^2 C_T (s+1)}{1000} \quad (6.7)$$

Wymiary tarczy oraz parametry skrawania należy dobierać w taki sposób, aby $D_S \geq 2D_0$, a tym samym $v_{cs} \geq v_{co}$. Jeżeli powyższy warunek jest spełniony oraz wykładnik $s \geq 5$, to w zależności (6.7) można pominąć składnik v_{co}^{s+1} (błąd spowodowany tym pominięciem jest niewielki). Wówczas równanie (6.7) można zapisać:

$$v_{cs}^{s+1} = \frac{2\pi f n^2 C_T (s+1)}{1000} \quad (6.8)$$

Przeprowadzając dwie próby toczenia promieniowego przy różnych prędkościach obrotowych n_1 i n_2 (takimi samymi nożami oraz przy zachowaniu stałej głębokości skrawania i posuwu) uzyskuje się stępienie ostrza na różnych średnicach D_{S1} i D_{S2} , którym odpowiadają prędkości skrawania v_{cs1} i v_{cs2} . Podstawiając do wzoru (6.8) odpowiednio n_1 i v_{cs1} oraz n_2 i v_{cs2} otrzymuje się dwa równania, które dzieli się stronami aby otrzymać zależność:

$$\left(\frac{v_{cs1}}{v_{cs2}} \right)^{s+1} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (6.9)$$

Po obustronnym zlogarytmowaniu zależności (6.9) i wykonaniu przekształceń otrzymuje się wzór na wykładnik s :

$$s = \frac{2 \lg \frac{n_1}{n_2}}{\lg \frac{v_{cs1}}{v_{cs2}}} - 1 \quad (6.10)$$

Zapisując wzór (6.8) w postaci:

$$v_{cs}^s v_{cs} = \frac{2\pi f n^2 C_T (s+1)}{1000}$$

i uwzględniając, że

$$v_{cs} = \frac{\pi D_s n}{1000} \quad (6.11)$$

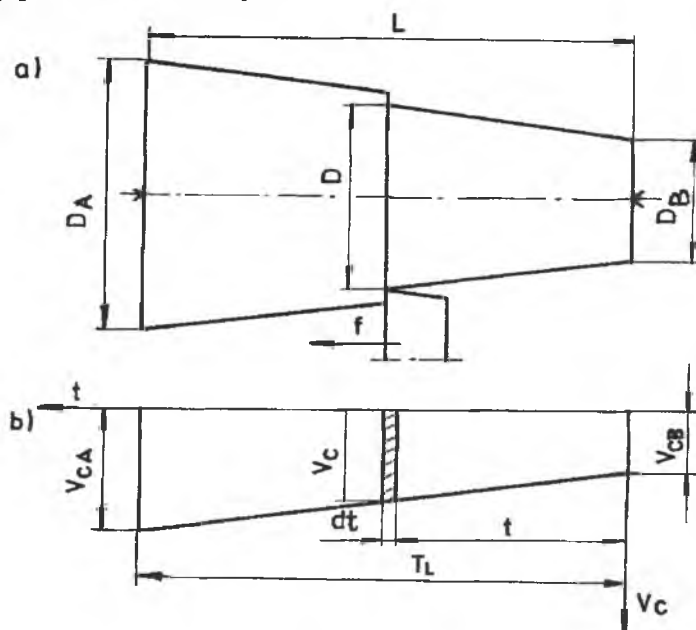
można zapisać zależność na stałą C_T w postaci

$$C_T = \frac{D_s v_{cs}^s}{2 f n (s+1)} \quad (6.12)$$

Przedstawiony powyżej sposób wyznaczania wartości C_T i s oparty jest tylko na dwóch próbach, dlatego też obarczony jest znacznym błędem. Aby zwiększyć dokładność wyliczonych wartości C_T i s należy zwiększyć ilość prób [12, 13, 14].

D. Wyznaczanie zależności $T = f(v_c)$ metodą toczenia stożków

Przedmiot obrabiany w kształcie stożka o długości L i średnicach skrajnych D_A i D_B toczonej jest od średnicy najmniejszej do największej przy zachowaniu stałej głębokości skrawania a_p , posuwu f oraz prędkości obrotowej n (prędkość skrawania rośnie proporcjonalnie do czasu skrawania). Kinematykę tej metody przedstawiono na rys. 6.5.



Rys.6.5. Kinematyka toczenia stożka: a) schemat obróbki, b) wykres prędkości skrawania.

Metoda oparta jest na założeniu, że stosunek elementarnej trwałości ostrza dt do całkowitej jego trwałości T jest równy stosunkowi jego elementarnego zużycia, które nastąpiło w czasie dt , do wartości przyjętego kryterium stępienia VB , co można zapisać:

$$\frac{dt}{T} = \frac{dVB}{VB} \quad (6.13)$$

Znaną zależność

$$T = \frac{C_T}{v_c^s} \quad (6.14)$$

można przedstawić jako

$$T = \left(\frac{C}{v_c} \right)^s \quad (6.15)$$

Po uwzględnieniu (6.15) można napisać:

$$\frac{dt}{T} = \left(\frac{v_c}{C} \right)^s dt \quad (6.16)$$

Po obustronnym scałkowaniu w granicach od 0 do T_L równanie (6.16) przyjmuje postać:

$$\int_0^{T_L} \left(\frac{v_c}{C} \right)^s dt = \int_0^{T_L} \frac{1}{T} dt = \frac{T_L}{T} = w \quad (6.17)$$

gdzie: T_L – trwałość ostrza (czas skrawania) przypadająca na jedno przejście noża

$$T_L = \frac{L}{fn} \quad (6.18)$$

w – stosunek trwałości T_L do trwałości T odpowiadającej dopuszczalnemu stępieniu ostrza VB .

Chwilowa prędkość skrawania v_c może być obliczona w oparciu o rys. 6.5 b:

$$v_c = v_{cB} + (v_{cA} - v_{cB}) \frac{t}{T_L} \quad (6.19)$$

Po uwzględnieniu (6.18) oraz znanych zależności:

$$v_{cA} = \frac{\pi D_A n}{1000} \quad \text{ i } \quad v_{cB} = \frac{\pi D_B n}{1000} \quad (6.20)$$

równanie (6.19) można zapisać:

$$v_c = \frac{\pi n}{1000} \left[D_B + (D_A - D_B) \frac{fn}{L} t \right] \quad (6.21)$$

Podstawiając (6.21) do (6.17) otrzymuje się:

$$w = \left(\frac{\pi n}{1000C} \right)^{sT_L} \int_0^{T_L} \left[D_B + (D_A - D_B) \frac{fn}{L} t \right]^s dt \quad (6.22)$$

Po wykonaniu całkowania

$$w = \left(\frac{\pi n}{1000C} \right)^s \frac{1}{s+1} \frac{L}{fn} \frac{D_A^{s+1} - D_B^{s+1}}{D_A - D_B} \quad (6.23)$$

W celu wyznaczenia stałej C_T i wykładnika s we wzorze (6.14) należy przeprowadzić dwie próby skrawania dwóch stożków z tego samego materiału i o takich samych wymiarach przy różnych prędkościach obrotowych n_1 i n_2 (pozostałe parametry skrawania – jednakowe).. Następnie mierzy się szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia używanych do skrawania noży VB_1 i VB_2 . Zakładając liniową zależność między szerokością pasma zużycia na powierzchni przyłożenia ostrza i czasem skrawania oraz przyjmując kryterium stopienia VB można wyliczyć wartości w_1 i w_2 z zależności:

$$w_1 = \frac{VB_1}{i_1 VB} \quad \text{oraz} \quad w_2 = \frac{VB_2}{i_2 VB} \quad (6.24)$$

gdzie: i_1, i_2 – liczby przejść noża.

Uwzględniając wzór (6.23) można napisać równania:

$$w_1 = \left(\frac{\pi n_1}{1000C} \right)^s \frac{1}{s+1} \frac{L}{fn_1} \frac{D_A^{s+1} - D_B^{s+1}}{D_A - D_B} \quad (6.25)$$

$$w_2 = \left(\frac{\pi n_2}{1000C} \right)^s \frac{1}{s+1} \frac{L}{fn_2} \frac{D_A^{s+1} - D_B^{s+1}}{D_A - D_B} \quad (6.26)$$

Po podzieleniu powyższych równań stronami, a następnie przekształceniu i obustronnym zlogarytmowaniu otrzymuje się zależność, według której liczy się wykładnik s :

$$s = \frac{\log \frac{w_1}{w_2}}{\log \frac{n_1}{n_2}} + 1 \quad (6.27)$$

Mając wyliczoną wartość s możemy wyznaczyć stałą C przekształcając odpowiednio wzór (6.25) lub (6.26); na przykład zależność (6.25) można zapisać jako:

$$C = \frac{\pi n_1}{1000} w_1^{-\frac{1}{s}} \left(\frac{1}{s+1} \frac{L}{f n_1} \frac{D_A^{s+1} - D_B^{s+1}}{D_A - D_B} \right)^{\frac{1}{s}} \quad (6.28)$$

Z porównania wzorów (6.14) i (6.15) wynika:

$$C_T = C^s \quad (6.29)$$

Wzrost dokładności obliczonych wartości s oraz C_T można uzyskać poprzez zwiększenie liczby prób toczenia stożka [12, 14].

6.3. Pytania kontrolne

1. Określenie trwałości ostrza.
2. Rodzaje zużycia ostrza.
3. Przyczyny zużycia ostrza.
4. Parametry geometryczne zużycia ostrza.
5. Kryteria stępienia ostrza.
6. Przebieg zużycia ostrza w czasie.
7. Wpływ różnych czynników na zużycie ostrza.
8. Metody badań trwałości ostrza.

Literatura uzupełniająca: [4, 9, 11, 12, 14, 21].

6.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego.

- a. tokarka uniwersalna,
- b. noże tokarskie o jednakowej geometrii ostrza,
- c. kątomierz do sprawdzania geometrii ostrza noży tokarskich,
- d. próbka w kształcie tarczy o średnicy zewnętrznej około 400 mm z otworem o średnicy około 40 mm,
- e. dwie próbki w kształcie stożka (jednakowe),
- f. suwmiarka,
- g. mikroskop warsztatowy.

6.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Wyznaczyć zależność $T = f(v_c)$ metodą toczenia promieniowego:
 - a) zamocować przedmiot obrabiany w uchwycie tokarki,
 - b) zmierzyć geometrię ostrza noży tokarskich,
 - c) przeprowadzić dwie próby toczenia promieniowego przy stałej głębokości skrawania i posuwie a różnych prędkościach obrotowych, dwoma nożami o jednakowej geometrii ostrza do momentu stępienia narzędzi (parametry skrawania poda prowadzący ćwiczenia),
 - d) zmierzyć średnice, na jakich nastąpiło stępienie ostrzy,
 - e) obliczyć wykładnik potęgowy s oraz stałą C_T według zależności (6.10) i (6.12).
2. Wyznaczyć zależność $T = f(v_c)$ metodą toczenia stożków:
 - a) sprawdzić geometrię ostrza noży tokarskich,
 - b) zmierzyć długość oraz średnicę najmniejszą i największą badanych próbek,
 - c) przeprowadzić dwie próby toczenia wzdłużnego przedmiotów w kształcie stożka przy stałej głębokości skrawania i posuwie a różnych prędkościach obrotowych, nożami o jednakowej geometrii ostrza (parametry skrawania poda prowadzący ćwiczenia),
 - d) korzystając z mikroskopu warsztatowego zmierzyć szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia stosowanych noży,
 - e) obliczyć wykładnik potęgowy s oraz stałą C_T według wzorów (6.27) i (6.29).
3. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - opis przeprowadzenia pomiarów,
 - wyniki pomiarów (protokoły),
 - obliczenia wykładnika s oraz stałej C_T ,
 - szkice przedstawiające wygląd zużytych ostrzy,
 - wnioski końcowe.

Ćwiczenie 7

OBRÓBKA MATERIAŁÓW TRUDNO SKRAWALNYCH

7.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z możliwością poprawy skrawalności metali poprzez zastosowanie podgrzewania przedmiotu obrabianego oraz poprzez wyprzedzające nagniatanie warstwy skrawanej.

7.2. Wiadomości ogólne

Wzrost trwałości maszyn osiągany jest między innymi poprzez stosowanie materiałów o specjalnych właściwościach (np. bardzo wysoka wytrzymałość, odporność na korozję, odporność na zużycie ściernie). Materiały te na ogół trudno poddają się obróbce skrawaniem. Do metod poprawy skrawalności materiałów o specjalnych właściwościach można zaliczyć podgrzewanie przedmiotu obrabianego oraz wyprzedzające nagniatanie warstwy skrawanej.

7.2.1. Skrawanie z podgrzewaniem przedmiotu obrabianego

Wzrost temperatury przedmiotu obrabianego powoduje zmniejszenie twardości jego materiału. Podczas podgrzewania przedmiotu obrabianego następuje także zwiększenie temperatury ostrza. Należy zatem tak dobierać warunki obróbki z podgrzewaniem, aby uzyskać jak największą różnicę twardości ostrza i materiału obrabianego.

Podgrzewanie przedmiotu obrabianego może obejmować cały przedmiot lub tylko obszar w pobliżu strefy skrawania.

Podgrzewanie całego przedmiotu obrabianego najczęściej prowadzone jest w piecach elektrycznych lub gazowych. Może też być wykorzystane ciepło operacji poprzedzającej skrawanie (np. obróbki plastycznej na gorąco). Do wad takiego sposobu podgrzewania przedmiotu obrabianego należy zaliczyć utrudnione mocowanie przedmiotu, mniejszą dokładność obróbki oraz utlenianie się powierzchni obrabianej.

Lokalne podgrzewanie strefy skrawania realizowane jest najczęściej za pomocą palników gazowych i plazmowych, za pomocą łuku elektrycznego, indukcyjnie, elektrostykowo oraz laserowo.

Podgrzewanie przedmiotu obrabianego płomieniem gazowym (np. z palnika spawalniczego przemieszczającego się przed narzędziem) jest sposobem łatwym do wdrożenia ze względu na prostotę i niską cenę stosowanych urządzeń. Jednakże przy takim podgrzewaniu istnieje niebezpieczeństwo uszkodzenia płomieniem powierzchni obrobionej lub zanieczyszczenia jej produktami spalania, a także są trudności z utrzymaniem stałej temperatury strefy podgrzewanej.

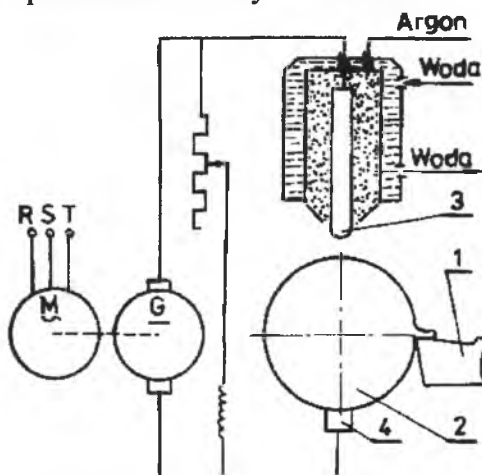
Skrawanie z plazmowym podgrzewaniem materiału obrabianego jest bardzo wydajne i ekonomiczne przy obróbce materiałów wysokostopowych (stali manganowych, nierdzewnych, stopów tytanu, stali czy żeliw żaroodpornych), zwłaszcza przy dużych przekrojach warstwy skrawanej, przy skórowaniu czy usuwaniu bardzo twardych warstw zewnętrznych [16]. Obróbka ta prowadzona jest w taki sposób, że wypływający z dyszy palnika łuk plazmowy kierowany jest na powierzchnię skrawania przed ostrze narzędzia. Efektem oddziaływania łuku plazmowego jest oprócz nagrzewania powierzchni przedmiotu (wywołującego obniżenie wytrzymałości, przemiany strukturalne, naprężenia cieplne i częściowe roztopienie materiału warstw powierzchniowych oraz zmianę warunków tarcia między ostrzem a materiałem obrabianym) także nasycenie gazami utrzymującymi się w łuku plazmowym (szczególnie wodorem) powierzchni przedmiotu, co przyczynia się do zwiększenia kruchości metalu i zmniejszenia pracy odkształcenia plastycznego przy skrawaniu.

Metoda ta umożliwia osiąganie dużej gęstości strumienia cieplnego, co umożliwia podgrzanie obrabianego materiału do bardzo wysokiej temperatury przy znacznej prędkości skrawania. Podgrzewanie plazmowe znajduje zastosowanie przy toczeniu, struganiu, frezowaniu. Do minusów takiego sposobu obróbki trzeba zaliczyć oślepiający blask plazmy (konieczność stosowania osłon) oraz wysoki koszt urządzeń.

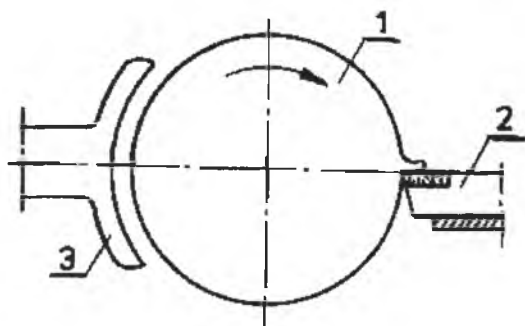
Dobłą koncentracją ciepła charakteryzuje się podgrzewanie warstwy skrawanej za pomocą łuku elektrycznego. W celu zapobieżenia utlenianiu się materiału obrabianego stosuje się nietopliwe elektrody wolframowe oraz atmosfery ochronne (rys. 7.1). Korzystne wyniki (znaczne zwiększenie trwałości ostrza) uzyskuje się stosując podgrzewanie łukiem elektrycznym podczas skrawania staliwa Hadfielda [10]. Utrudnienia w stosowaniu tej metody wiążą się z koniecznością budowy ścian osłonowych i wentylacji stanowiska, a także z dokładnością wymiarowo – kształtową półfabrykatów (w przypadku dużych odchylek kształtu oraz nieciągłości powierzchni następuje gaśnięcie łuku, co powodować może wykruszenie ostrza).

Podgrzewanie indukcyjne prądami wysokiej częstotliwości umożliwia szybkie nagrzewanie przedmiotu obrabianego, przy czym wydzielające się ciepło koncentruje się głównie na powierzchni. Na rys. 7.2 przedstawiono toczenie

z indukcyjnym podgrzewaniem przedmiotu obrabianego. Metoda ta znajduje zastosowanie przy obróbce materiałów magnetycznych, a najbardziej efektywna jest przy obróbce przedmiotów o dużych rozmiarach.



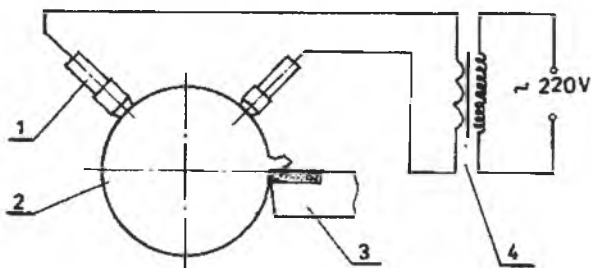
Rys.7.1. Schemat skrawania z podgrzewaniem za pomocą łuku elektrycznego w osłonie z argonu: 1 - narzędzie, 2 - przedmiot obrabiany, 3 - nietopliwa elektroda wolframowa, 4 - szczotkowy zbieracz prądu [10].



Rys.7.2. Schemat toczenia z indukcyjnym podgrzewaniem warstwy skrawanej: 1 - przedmiot obrabiany, 2 - narzędzie, 3 - induktor [14].

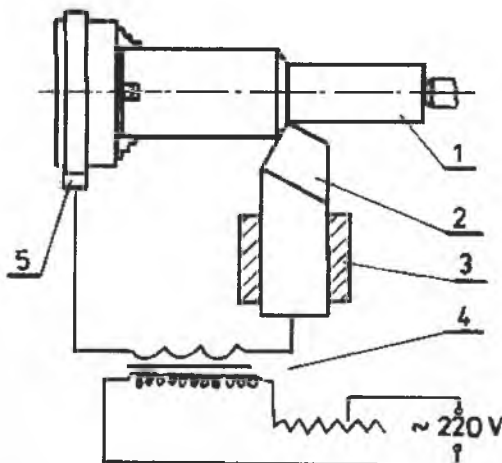
Podgrzewanie elektrostatyczne polega na wykorzystaniu ciepła wydzielającego się podczas przepływu prądu elektrycznego przez przedmiot obrabiany i będącą z nim w kontakcie elektrodę. Ilość wydzielającego się ciepła jest proporcjonalna do oporu elektrycznego i kwadratu natężenia przepływającego prądu. Ponieważ największym oporem charakteryzuje się miejsce styku przedmiotu obrabianego i elektrody, toteż w tym miejscu wydzielają się najwięcej ciepła. Podgrzewanie elektrostatyczne może być prowadzone przy wykorzystaniu specjalnych elektrod prętowych (ślizganie się po przedmiocie obrabianym) lub rolkowych (toczących się po przedmiocie) albo stosuje się układ, w którym prąd przepływa przez styk przedmiotu obrabianego i narzędzia.

Lokalne podgrzewanie przedmiotu skrawanego za pomocą elektrod prętowych pokazano na rys. 7.3. Prąd elektryczny o bardzo dużym natężeniu doprowadzony do elektrod ślizgających się po powierzchni skrawania powoduje nagrzewanie się tej powierzchni. Metoda ta umożliwia obróbkę z podgrzewaniem za pomocą narzędzi z materiałów nie przewodzących prądu elektrycznego (np. płytki ceramiczne). Mankamentem stosowania elektrod ślizgających się po przedmiocie obrabianym jest ich szybkie zużywanie się. Większą trwałość mają elektrody rolkowe.



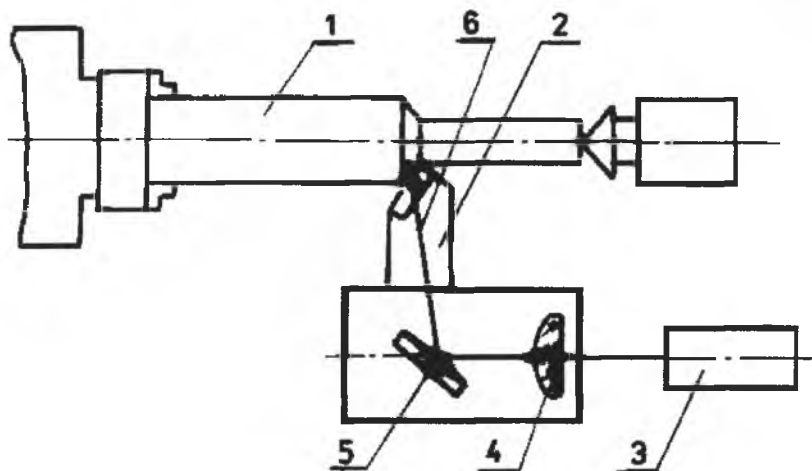
Rys.7.3. Schemat toczenia z podgrzewaniem elektrostatycznym: 1 - elektroda, 2 - przedmiot obrabiany, 3 - narzędzie, 4 - transformator.

Metoda umożliwiająca bezpośrednie podgrzewanie strefy skrawania polega na wykorzystaniu ciepła wydzielającego się przy przepływie prądu o dużym natężeniu i małym napięciu (rzędu 2 – 6 V) między narzędziem a przedmiotem obrabianym (rys. 7.4). Zaletą takiego rozwiązania jest zwiększenie temperatury tylko w strefie tworzenia się wióra bez podgrzewania pozostałej części przedmiotu obrabianego, natomiast wadą – nagrzewanie się ostrza narzędzia i niebezpieczeństwo zniszczenia ostrza w przypadku nieprawidłowego kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym.



Rys.7.4. Schemat toczenia z podgrzewaniem strefy skrawania prądem przepływającym przez narzędzie: 1 - przedmiot obrabiany, 2 - nóż, 3 - izolacja, 4 - transformator, 5 - szczotka.

Skrawanie z laserowym podgrzewaniem materiału obrabianego pokazane zostało na rys. 7.5. Wiązka laserowa, ślizgając się po powierzchni przedmiotu



Rys.7.5. Schemat toczenia z podgrzewaniem laserowym: 1 - przedmiot obrabiany, 2 - narzędzie, 3 - laser, 4 - soczewka, 5 - zwierciadło, 6 - ogniskowanie promienia laserowanego w płamce na powierzchni przedmiotu [15].

obrabanego, nagrzewa ją. W miarę oddalania się od powierzchni w głąb materiału, temperatura spada. Do głównych zalet nagrzewania laserowego należy zaliczyć [15]:

- możliwość koncentracji znacznej energii w małej objętości materiału,
- łatwość zmian energetycznych i charakterystyk przestrzennych wiązki laserowej,
- możliwość doprowadzenia wiązki laserowej do miejsc trudno dostępnych,
- możliwość nagrzewania materiału skrawanego z dużymi prędkościami,
- duża stabilność procesu.

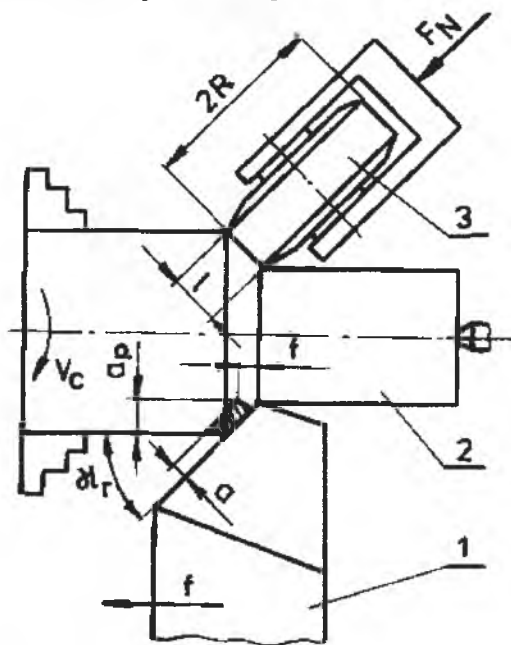
Poza opisanymi powyżej sposobami podgrzewania materiału podczas skrawania znane są jeszcze (choć rzadziej stosowane) wykorzystujące promieniowanie świetlne, tarcie, przepływający elektrolit [14].

7.2.2. Obróbka z wyprzedzającym nagniataniem warstwy skrawanej

W procesie obróbki skrawaniem oddzielanie warstwy materiału obrabianego poprzedzone jest intensywnymi odkształceniami plastycznymi tej warstwy oraz warstwy znajdującej się pod powierzchnią obrobioną. Skrawalność materiałów charakteryzujących się dużą podatnością do umocnienia odkształceniowego (np. stale kwasoodporne) można poprawić poprzez zastosowanie wyprzedzającego nagniatania warstwy skrawanej. Nagniatanie to powoduje korzystne zmiany stosunku granicy plastyczności R_e do doraźnej wytrzymałości na roz-

ciąganie R_m obrabianego materiału. W ten sposób część pracy odkształceń materiału w procesie tworzenia się wióra jest zrealizowana w trakcie nagniatania warstwy skrawanej.

Schemat obróbki skrawaniem z wyprzedzającym nagniataniem warstwy skrawanej (na przykładzie toczenia) pokazano na rys. 7.6. Rolka nagniatająca 3 dociskana jest siłą F_N do powierzchni skrawanej i tocząc się po tej powierzchni powoduje umocnienie warstwy skrawanej.



Rys.7.6. Schemat toczenia z wyprzedzającym nagniataniem warstwy skrawanej:
1 - narzędzie, 2 - przedmiot obrabiany, 3 - rolka nagniatająca.

W wyniku zastosowania wyprzedzającego nagniatania warstwy skrawanej uzyskuje się zmniejszenie siły i temperatury skrawania oraz zwiększenie trwałości ostrza narzędzi skrawających [2, 20]. W zależności od rodzaju materiału obrabianego, grubości warstwy skrawanej i długości styku roboczego dobiera się wymiary rolki roboczej oraz siłę nagniatania F_N .

7.3. Pytania kontrolne

1. Zużycie i trwałość ostrza narzędzi skrawających.
2. Wpływ właściwości materiału na jego skrawalność.
3. Metody skrawania z podgrzewaniem przedmiotu obrabianego.
4. Skrawanie z wyprzedzającym nagniataniem warstwy skrawanej.

Literatura uzupełniająca: [2, 4, 8, 10, 20, 21].

7.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a) tokarka przystosowana do toczenia z podgrzewaniem strefy skrawania,
- b) wałki z materiału trudno skrawalnego,
- c) noże tokarskie,
- d) transformator,
- e) przyrząd do nagniatania warstwy skrawanej,
- f) mikroskop warsztatowy.

7.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Zmontować układ do toczenia z podgrzewaniem strefy skrawania prądem przepływającym przez narzędzie i przedmiot obrabiany (zgodnie z rys. 7.4).
2. Przeprowadzić próby toczenia jednakowych wałków z materiału trudno skrawalnego dwoma nożami o jednakowej geometrii ostrza (geometrię ostrza sprawdzić) z podgrzewaniem strefy skrawania oraz bez podgrzewania, przy stałych parametrach obróbki (wartości parametrów poda prowadzący ćwiczenia).
3. Korzystając z mikroskopu warsztatowego zmierzyć szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia używanych noży tokarskich.
4. Zamontować na tokarce przyrząd do wyprzedzającego nagniatania warstwy skrawanej.
5. Przeprowadzić próby toczenia stali kwasoodpornej dwoma jednakowymi nożami, przy zachowaniu jednakowych warunków obróbki (warunki te określi prowadzący ćwiczenia), stosując w jednej z prób wyprzedzające nagniatanie warstwy skrawanej.
6. Zmierzyć szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia noży, za pomocą których przeprowadzono próby toczenia.
7. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - opis przeprowadzonych prób skrawania,
 - wyniki pomiarów (protokoły),
 - wnioski.

Ćwiczenie 8

BADANIE ZUŻYCIA ŚCIERNIC

8.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z wpływem warunków skrawania na zużycie ściernic oraz metodami oceny tego zużycia.

8.2. Wiadomości ogólne

Narzędzia ścierne pracują w bardzo trudnych warunkach. Podczas szlifowania wierzchołki poszczególnych ziarn ściernych obciążone są siłą rzędu 5 – 10 N, a temperatura na tych wierzchołkach zwykle jest równa a nierzadko nawet wyższa od temperatury topnienia obrabianego materiału [3]. Warunki te powodują zużywanie się narzędzi ściernych, co wpływa na dokładność wymiarowo – kształtową obrabianych przedmiotów oraz na stan ich warstwy wierzchniej.

8.2.1. Zużycie ściernic

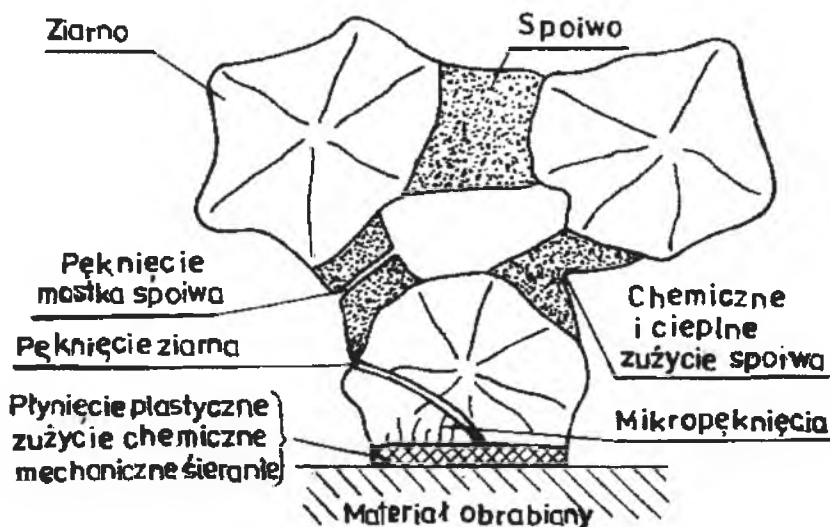
Zużywanie się ściernic jest procesem bardzo złożonym. W wyniku oddziaływania czynników natury fizycznej jak i chemicznej następuje ścieranie i wykruszanie się zarówno ziarn ściernych jak i spoiwa. Typowe rodzaje zużycia ziarn ściernych i spoiwa pokazano na rys. 8.1.

Zużycie ściernic jest rezultatem występowania w procesie szlifowania następujących zjawisk (zjawiska te mogą występować równocześnie) [17]:

- 1) tępienie się ziarn,
- 2) wykruszanie i pęknięcie ziarn,
- 3) wyrywanie ziarn i erozja spoiwa,
- 4) zalepianie ściernicy.

Tępienie ziarn ściernych – jest to proces stopniowego usuwania materiału wierzchołków skrawających. Do podstawowych przyczyn tępienia należy zaliczyć:

- ścieranie mechaniczne,
- plastyczne płynięcie materiału ściernego,
- zużycie adhezyjne,
- zużycie dyfuzyjne.



Rys. 8.1. Charakterystyczne objawy zużycia ziarn ściernych i spoiwa [17].

Mechaniczne ścieranie wierzchołków skrawających ziarn polega na tym, że twarde wtrącenia materiału obrabianego wciskają się w powierzchnię ziarn ściernych (uplastycznioną pod wpływem ciepła) i usuwają cząsteczki materiału ściernego. Na skutek oddziaływania bardzo dużych obciążeń mechanicznych i cieplnych wystąpić może plastyczne płynięcie materiału ściernego.

Zużycie adhezyjne następuje w wyniku wrywania spojeń adhezyjnych występujących na powierzchni styku ziarn ściernych z materiałem obrabianym. Zwiększenie zużycia adhezyjnego następuje wraz ze wzrostem nacisków jednostkowych. Natomiast wzrost temperatury powoduje zmniejszenie zużycia adhezyjnego, co tłumaczone jest wytwarzaniem się na powierzchni styku warstewek tlenków łagodzących warunki tarcia. Ponadto intensywność zużycia adhezyjnego zależy od powinowactwa chemicznego ziarn ściernych i materiału obrabianego oraz wzajemnej relacji ich twardości.

Zużycie dyfuzyjne związane jest z ruchem cząsteczek na styku ziarn ściernych z materiałem obrabianym zachodzącym w bardzo wysokich temperaturach panujących w strefie skrawania. Procesy dyfuzyjne pociągają za sobą zmiany właściwości materiału ziarn ściernych (np. zmniejszenie wytrzymałości, twardości), co czyni je bardziej podatnymi na inne rodzaje zużycia.

Na skutek tępienia ziarn ściernych następuje wzrost sił skrawania, co z kolei prowadzi do zwiększenia ilości wydzielającego się ciepła i wzrostu temperatury skrawania. Nadmierny wzrost temperatury prowadzić może do pojawienia się wad powierzchniowych, głównie w postaci przypaleń szlifierskich i mikropęknięć.

Wykruszanie cząstek materiału z ziarn ściernych oraz całkowite pękanie tych ziarn i wypadanie ich z narzędzia ściernego spojonego ma miejsce wówczas, gdy w ziarnach powstają naprężenia przekraczające wytrzymałość materiału ściernego. Istotny wpływ na intensywność wykruszania się mają właściwości fizyczne ziarn ściernych. Prawdopodobieństwo wykruszeń jest większe dla ziarn z materiałów charakteryzujących się mniejszą ciągliwością. Zużycie wytrzymałościowe ziarn ściernych może wystąpić w postaci zużycia doraźnego, zmęczeniowego lub termozmęczeniowego. Pozytywnym skutkiem wykruszania ziarn ściernych jest odsłanianie nowych krawędzi skrawających (tzw. samostrzenie ściernicy), co umożliwia wydłużenie czasu pracy ściernicy między kolejnymi obciążeniami.

Niekorzystną (na ogół) formą zużycia ściernic z uwagi na bezproduktywną utratę ścierniwa jest wrywanie z powierzchni roboczej narzędzia ściernego całych ziarn na skutek uszkodzenia mostków spoiwa. Głównymi przyczynami pęknięcia mostków spoiwa są oddziaływania mechaniczne na poszczególne ziarna ściernic. Pęknięcia spoiwa mogą mieć charakter doraźny lub zmęczeniowy.

Ocenia się, że przykładowo dla ściernicy o twardości G pękanie spoiwa jest przyczyną około 85% ogólnego zużycia, a dla ściernicy o twardości K udział ten spada do około 55% [3]. Przyczyną wykruszeń ziarn może też być erozja spoiwa, w wyniku czego następuje osłabienie utwardzenia ziarna.

Zalepianie ściernicy polega na wypełnianiu jej porów drobnymi wiórami oraz produktami zużycia ściernicy. Wpływa to niekorzystnie na proces szlifowania, zwiększa tarcie, czego konsekwencją jest wzrost temperatury skrawania. Przy dużej grubości warstwy zalepiającej pojawia się niebezpieczeństwo wrywania ze ściernicy całych bloków ziarn ściernych. W takim przypadku konieczne jest usunięcie znacznej objętości ściernicy podczas jej obciągania.

8.2.2. Czynniki wpływające na zużycie ściernic

Do czynników mających największy wpływ na zużywanie się ściernic należy zaliczyć [3, 17]:

- charakterystykę narzędzia ściernego,
- sposób obciągania ściernicy,
- rodzaj materiału obrabianego,
- warunki obróbki.

A. Wpływ charakterystyki ściernicy

Zużycie ściernic w dużym stopniu zależy od rodzaju materiału ściernego. Najczęściej stosowane materiały ściernie można uszeregować w następującej kolejności ze względu na malejącą odporność na zużycie [17]: diament, regularny azotek boru, elektrokorund, węgiel krzemu. Większą odporność na zużycie wykazują ściernice, w których zastosowano spoiwo ceramiczne w stosunku do ściernic ze spoiwem żywicznym.

Zużycie ściernic zwiększa się w miarę wzrostu wielkości ziarn ściernych, zmniejszania się twardości ściernic (określanej poprzez siłę potrzebną do wyrwania ziarna ściernego z otaczającego je spoiwa), a także, w nieznacznym stopniu, wraz ze wzrostem zwartości struktury ściernic.

Na zużycie ściernic mają wpływ również ich wymiary. Dla ściernic pracujących obwodem zużycie promieniowe zmniejsza się w miarę wzrostu ich średnicy jak i szerokości. Przy czym zużycie to zmienia się wzdłuż tworzącej walca (najmniejsza jest w środku szerokości ściernicy).

B. Wpływ sposobu obciążania ściernicy

Zabieg obciążania ma bardzo znaczący wpływ na zużycie ściernic. Szczególne znaczenie tego czynnika wynika stąd, że duży ubytek objętości ściernicy wiąże się z samym procesem obciążania (ocenia się, że udział ten stanowi 50 – 90% całkowitego ubytku ściernicy), jak i z wpływem sposobu obciążania ściernicy na intensywność jej zużywania się w procesie szlifowania.

Zużycie ściernicy uzależnione jest od materiału i kształtu obciążacza oraz od parametrów technologicznych obciążania.

C. Wpływ materiału obrabianego

Zużycie ściernicy zależy od składu chemicznego oraz struktury szlifowanego materiału (czynniki te decydują o właściwościach fizycznych materiału).

Niektóre domieszki (np. chrom, nikiel) utrudniają tworzenie i usuwanie wiórów, przez co zwiększają zużycie ściernicy. Do wzrostu zużycia ściernicy przyczyniają się też dodatki takich pierwiastków jak wanad, bor, wolfram, kobalt, które tworzą bardzo twarde węgliki. Korzystnie na zużycie ściernicy może wpływać obecność siarki [3].

Składnikiem strukturalnym niekorzystnie wpływającym na zużycie ściernic jest austenit, co tłumaczone jest jego małą przewodnością cieplną oraz dużą plastycznością.

D. Wpływ warunków obróbki

Wzrost wartości takich parametrów szlifowania jak posuw wzdłużny, dosuw wglębny oraz prędkość przedmiotu obrabianego, a więc parametrów bezpośrednio wpływających na wydajność obróbki, powoduje zwiększenie zużycia ściernicy, co może być tłumaczone rosnącymi siłami skrawania.

Natomiast zużycie ściernicy zmniejsza się w miarę wzrostu prędkości szlifowania. Wprawdzie wzrost prędkości szlifowania wiąże się ze wzrostem prędkości tarcia (przy mniejszych przekrojach warstwy skrawanej wzrasta udział zużycia ściernego ostrzy ziarn), zwiększeniem częstości styku ziarn z materiałem obrabianym a także wzrostem plastyczności materiału obrabianego, co sprzyja zalepianiu powierzchni roboczej ściernicy, jednakże okazuje się, iż dominujący wpływ na zużycie ściernicy ma zmniejszenie sił działających na ziarna ściernie (mniejszy przekrój warstwy skrawanej), a także krótszy czas styku.

Korzystnie na zużywanie się ściernic wpływa stosowanie cieczy obróbkowych. Zmniejszenie zużycia narzędzi ściernych tłumaczy się pozytywnym oddziaływaniem cieczy na warunki tarcia w strefie skrawania oraz mniejszą intensywnością zalepiania powierzchni roboczej ściernic.

8.2.3. Wskaźniki zużycia ściernicy

Zużycie ściernicy może być rozpatrywane jako zmiany w obrębie poszczególnych ziarn ściernych i ich otoczenia, zwane mikrozużyciem, albo zmiany wymiarów i kształtu ściernicy, które określane jest mianem makrozużycia. Makrozużycie ściernicy oceniane jest za pomocą wskaźników, z których najczęściej używanymi są:

- zużycie promieniowe ΔR [mm] (rys. 8.2 a),
- zużycie krawędziowe ΔR_k [mm] (rys. 8.2 b),
- zużycie całkowite ΔR_C [mm] (rys. 8.2 c),
- szybkość zużycia promieniowego ściernicy, rozumiana jako wartość zużycia promieniowego przypadająca na jednostkę czasu:

$$\Delta \dot{R} = \frac{d(\Delta R)}{dt} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \quad (8.1)$$

- zużycie objętościowe (ubytek objętości materiału ściernicy) V_s [mm³],
- szybkość zużycia objętościowego, czyli wartość zużycia objętościowego przypadająca na jednostkę czasu:

$$Z_s = \frac{dV_s}{dt} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right] \quad (8.2)$$

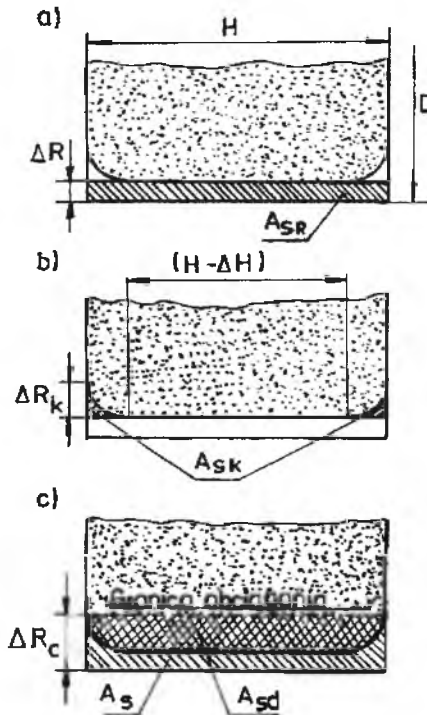
- powierzchnia zużycia promieniowego (rys. 8.2 a):

$$A_{SR} = H\Delta R [mm^2] \quad (8.3)$$

- powierzchnia zużycia krawędziowego A_{SK} (rys. 8.2 b),
- całkowita powierzchnia zużycia ściernicy:

$$A_S = A_{SR} + A_{SK} [mm^2] \quad (8.4)$$

- powierzchnia ubytku ściernicy na skutek obciążania A_{sd} (rys. 8.2 c),
- zużycie względne ściernicy q , wyrażające stosunek zużycia objętościowego ściernicy V_s do objętości zeszlifowanego w tym samym czasie materiału V_m (niekiedy wskaźnikiem tym określa się stosunek ubytku masy ściernicy i materiału obrabianego).



Rys.8.2. Wskaźniki zużycia ściernicy.

Do oceny procesu szlifowania często używa się wskaźnika szlifowania G , który jest odwrotnością wskaźnika q :

$$G = \frac{V_m}{V_s} \quad (8.5)$$

8.2.4. Trwałość ściernicy

Trwałość ściernicy definiowana jest jako czas jej użytkowania między kolejnymi obciąganiem. O konieczności obciągania ściernicy decyduje utrata zdolności skrawnej lub osiągnięcie dopuszczalnej wartości zmiany kształtu ściernicy.

Wartości normatywnych okresów trwałości ściernic w zależności od materiału obrabianego, charakterystyki ściernicy i rodzaju szlifowania wahają się w dość szerokim zakresie (od kilku do kilkudziesięciu minut) [3].

Okres trwałości ściernic może być określany w oparciu o następujące kryteria zużycia:

- przekroczenie dopuszczalnej chropowatości obrobionej powierzchni,
- zmiana kształtu ściernicy w stopniu uniemożliwiającym utrzymanie w granicach tolerancji wymiarów i kształtu przedmiotu obrabianego,
- wzrost sił skrawania i amplitudy drgań,
- wyraźne zwiększenie temperatury skrawania,
- zmiany dźwięków towarzyszących procesowi szlifowania.

Powyższe kryteria wykorzystywane są w systemach nadzorujących proces szlifowania.

8.3. Pytania kontrolne

1. Charakterystyka narzędzi ściernych spojonych.
2. Przygotowanie ściernic do pracy.
3. Obciąganie ściernic.
4. Rodzaje zużycia ściernic.
5. Wpływ różnych czynników na zużycie narzędzi ściernych.
6. Mikrozużycie i makrozużycie narzędzi ściernych; wskaźniki stosowane do oceny makrozużycia.
7. Trwałość ściernicy.
8. Kryteria zużycia ściernic.

Literatura uzupełniająca [3, 4, 17, 21].

8.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Szlifierka do płaszczyzn.
- b. Zestaw ściernic o różnej twardości.
- c. Próbkki materiału szlifowanego (w kształcie prostopadłościanu).
- d. Przyrząd specjalny do pomiaru zużycia ściernicy.
- e. Suwmiarka.
- f. Mikrometr.

8.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Obciągnąć ściernicę:
2. Ustawić przyrząd do pomiaru zużycia ściernicy.
3. Zmierzyć wymiary przeznaczonej do szlifowania próbki.
4. Przeprowadzić próbę szlifowania (parametry technologiczne poda prowadzący ćwiczenia), mierząc czas trwania obróbki.
5. Korzystając ze specjalnego przyrządu, zmierzyć zużycie promieniowe ΔR oraz krawędziowe ΔR_k ściernicy.
6. Zmierzyć grubość szlifowanej próbki.
7. Korzystając z zależności podanych w punkcie 8.3.3 obliczyć:
 - zużycie całkowite ΔR_C ,
 - szybkość zużycia promieniowego ,
 - zużycie objętościowe ściernicy V_S ,
 - powierzchnię zużycia promieniowego A_{SR} ,
 - zużycie względne ściernicy q .
8. Czynności podane w punktach 1 – 7 powtórzyć dla różnych ściernic i różnych materiałów obrabianych.
9. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - charakterystykę ściernic użytych w ćwiczeniu,
 - opis przebiegu ćwiczenia,
 - wyniki pomiarów i obliczeń,
 - wnioski.

Ćwiczenie 9

POMIAR SIŁ WYSTĘPUJĄCYCH W PROCESIE SZLIFOWANIA TAŚMAMI ŚCIERNYMI

9.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie procesu szlifowania taśmami ściernymi oraz sposobu pomiaru sił występujących w tym procesie.

9.2. Wiadomości ogólne

Obróbka ścierna może być prowadzona za pomocą narzędzi ściernych spojonych lub za pomocą luźnego ścierniwa. Spośród narzędzi spojonych wyodrębnić można narzędzia ścierne nasypowe. Najczęściej stosowanymi narzędziami ściernymi nasypowymi są taśmy ścierne oraz tarcze listkowe.

Rosnące zainteresowanie przemysłu szlifowaniem taśmami ściernymi wiąże się z zaletami tego procesu, takimi jak:

- prosta budowa obrabiarek do szlifowania taśmami ściernymi,
- możliwość szybkiej wymiany narzędzi,
- zapewnienie stałej prędkości skrawania,
- brak konieczności wyrównowywania narzędzia,
- duża wydajność w porównaniu ze szlifowaniem ściernicowym,
- lepsze wykorzystanie ziaren ściernych niż w ściernicach,
- możliwość kształtowania powierzchni złożonych dzięki elastyczności narzędzia,
- dobre odprowadzanie ciepła w czasie szlifowania,
- większe bezpieczeństwo pracy w porównaniu ze szlifowaniem ściernicowym (zerwanie taśmy nie stanowi takiego zagrożenia jak rozerwanie się ściernicy)

9.2.1. Budowa narzędzi ściernych nasypowych

Narzędzia ściernie nasypowe zbudowane są z podłoża, ziarn ściernych i spoiwa. Na podłoże nakładana jest warstwa spoiwa podkładowego, następnie w warstwie tej osadzone są ziarna ściernie (grawitacyjnie lub w polu elektrostatycznym), po czym ziarna ściernie utwierdzone są warstwą spoiwa zalewowego.

Podłoża najczęściej wykonuje się z papieru, tkanin lub dzianin (dzianiny charakteryzują się tym, że nici wątki leżą na niciach osnowy i powiązane są szwami w punktach przecięć). Tkaniny wykonywane są z włókien naturalnych lub sztucznych (bardziej wytrzymałe).

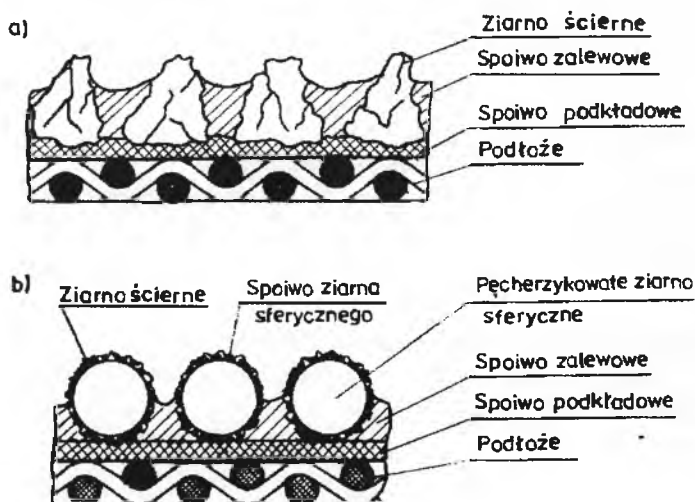
Ziarna ściernie stosowane w narzędziach nasypowych mogą być z materiałów naturalnych (korund, szmergiel, granat, krzemień) lub sztucznych (elektrokorund, węgiel krzemu, borazon, diament syntetyczny). Ziarna ściernie winny charakteryzować się znaczną wytrzymałością i twardością a także trwałością cieplną i chemiczną.

Stosowane spoiwa mogą być: klejowe, klejowo – żywiczne oraz żywiczne. W celu poprawienia warunków pracy narzędzi nasypowych do spoiw dodawane są wypełniacze (np. kreda, kryolit, parafina chlorowana).

Ze względu na budowę wyroby ściernie nasypowe podzielić można na:

- jednowarstwowe,
- wielowarstwowe (kilka warstw ścierniwa – większa trwałość),
- przestrzenne (np. pęcherzykowate – cząstki ściernie tworzą przestrzenną strukturę, w której ziarna ściernie znajdują się na zewnątrz powłoki sferycznej utworzonej przez spoiwo).

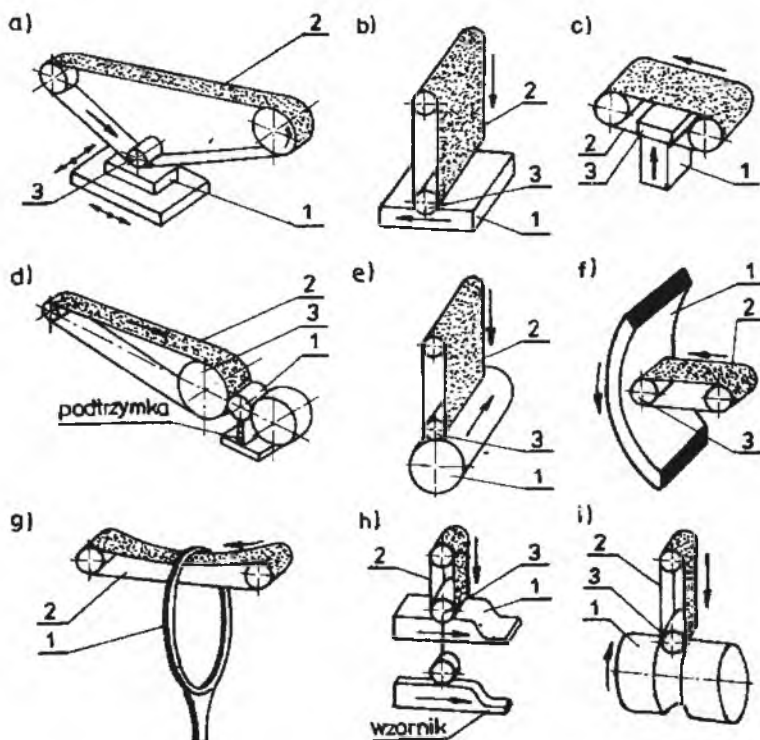
Przykłady budowy wyrobów ściernych nasypowych pokazano na rys. 9.1.



Rys.9.1. Budowa wyrobu ściernego nasypowego: a) jednowarstwowego, b) z zastosowaniem pęcherzykowatych ziarn sferycznych [22].

9.2.2. Odmiany szlifowania taśmami ściernymi

Klasyfikacja odmian szlifowania taśmowego może być prowadzona przy uwzględnieniu różnych kryteriów. Niektóre rozwiązania praktyczne szlifowania taśmami bezkońcowymi powierzchni płaskich, walcowych i kształtowych przedstawiono na rys. 9.2.



Rys.9.2. Odmiany szlifowania taśmami ściernymi bezkońcowymi:
1 - przedmiot obrabiany, 2 - narzędzie, 3 - element dociskowy.

Ze względu na kształt powierzchni obrabianej rozróżnia się:

- szlifowanie płaszczyzn (rys. 9.2 a, b, c),
- szlifowanie powierzchni walcowych zewnętrznych (rys. 9.2 d, e) i wewnętrznych (rys. 9.2f),
- szlifowanie powierzchni kształtowych (rys. 9.2 g, h),
- szlifowanie profilowe (rys. 9.2 i).

W zależności od sposobu wywierania nacisku narzędzia na przedmiot obrabiany szlifowanie dzieli się na:

- swobodne (rys. 9.2g),
- podporowe (rys. 9.2 a, b).

Biorąc pod uwagę wzajemne ruchy narzędzia i przedmiotu obrabianego rozróżnia się:

- szlifowanie wzdłużne (np. rys. 9.2 b),
- szlifowanie poprzeczne (np. rys. 9.2 c).

Szlifowanie taśmowe może być prowadzone:

- ze stałą siłą docisku,
- ze stałym dosuwem.

Kolejnym kryterium podziału jest ośrodek, w którym prowadzony jest proces obróbki. Szlifowanie taśmami ściernymi może być realizowane:

- na sucho,
- na mokro.

W zależności od naddatku obróbkowego oraz wymagań odnośnie dokładności przedmiotu obrabianego i chropowatości powierzchni po obróbce, szlifowanie może być prowadzone jako:

- zgrubne,
- kształtujące,
- wykańczające.

Dalsza klasyfikacja szlifowania taśmami ściernymi wiąże się z ruchami wykonywanymi przez przedmiot obrabiany i narzędzie oraz ze stopniem mechanizacji i automatyzacji obróbki [22].

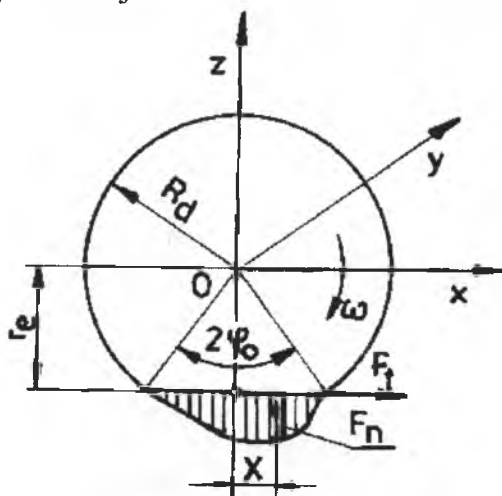
9.2.3. Siły skrawania w procesie szlifowania taśmami ściernymi

Siły skrawania występujące w procesie szlifowania taśmowego są ważnym wskaźnikiem szlifowalności obrabianego materiału. Znajomość wartości tych sił umożliwia określenie mocy silnika obrabiarki, obciążenia taśmy ścierniej, nacisków w strefie skrawania, a także ilości wydzielającego się ciepła i temperatury skrawania.

Wypadkową siłę skrawania rozkłada się na dwie składowe: normalną F_n oraz styczną F_t . Rozkład nacisków podczas szlifowania podporowego pokazano na rys. 9.3 [22]. Widoczne jest przesunięcie siły F_n o wartość x w stosunku do osi tarczy dociskowej, które powoduje występowanie dodatkowego momentu oporu ruchu taśmy ścierniej. Przesunięcie to jest efektem niesymetrycznego rozkładu nacisków spowodowanego tarciem wewnętrznym w układzie taśma – tarcza dociskowa.

W literaturze [5, 22] podawane są zależności empiryczne na obliczanie sił skrawania przy szlifowaniu taśmowym. We wzorach tych uwzględniony jest wpływ takich czynników jak: materiał obrabiany, posuw wzdłużny, posuw poprzeczny, siła napięcia taśmy, szerokość szlifowania, prędkość skrawania, głębokość skrawania.

Właściwości fizyczne materiału obrabianego mają istotny wpływ na siły skrawania. Ze wzrostem twardości obrabianej stali stwierdzono zwiększanie się obydwu składowych sił skrawania, przy czym w większym stopniu wzrasta wartość składowej normalnej.



Rys.9.3. Rozkład nacisków podczas szlifowania taśmowego podporowego [22].

Siły skrawania zależą też od kierunku posuwu. Podczas szlifowania współbieżnego powierzchni płaskich siły skrawania są o 15 – 18% mniejsze niż przy szlifowaniu przeciwbieżnym.

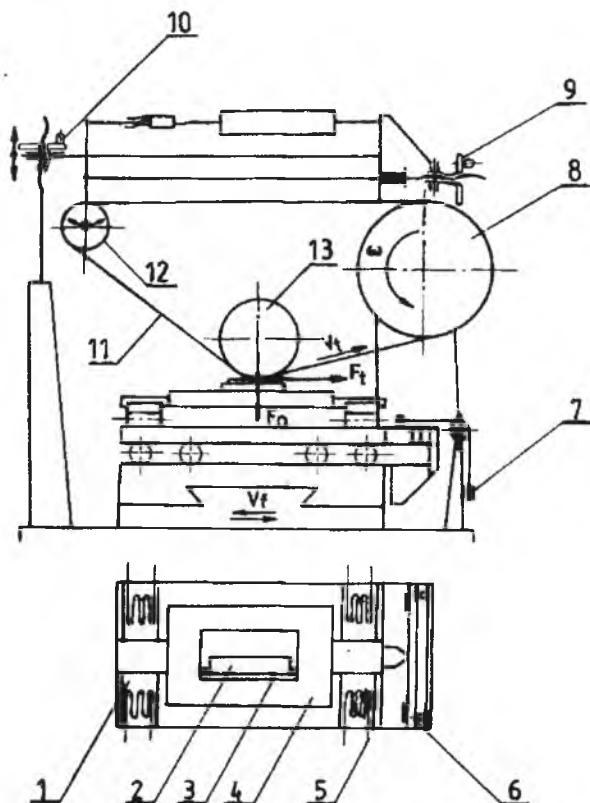
Siły skrawania rosną w miarę zwiększania głębokości skrawania, przy czym wzrost ten jest wyraźniejszy w przypadku obróbki stali i żeliwa niż przy obróbce stopu PA 7 [5].

Opory skrawania w dużym stopniu zależą też od prędkości taśmy ścierniej v_t . Krzywe obrazujące zależność oporu właściwego skrawania od prędkości v_t charakteryzują się występowaniem punktu minimalnego w przedziale $v_t = 30 - 38$ m/s. Złożony charakter wpływu prędkości taśmy na opory skrawania tłumaczony jest zmianami właściwości fizykomechanicznych materiału obrabianego powodowanymi rosnącą temperaturą szlifowania, zmianami adhezyjnej siły tarcia, zmniejszeniem głębokości skrawania oddzielnymi ziarnami, zwiększeniem liczby ziarn w strefie obróbki [22]. Wyraźniejszy wpływ prędkości taśmy na opory skrawania zauważa się podczas szlifowania materiałów plastycznych. Wzrost sił skrawania następuje też w miarę zwiększania szerokości szlifowania oraz wzrostu siły napięcia taśmy.

Siły skrawania przy szlifowaniu taśmą ścierną są o 20 – 25% niższe od sił skrawania przy szlifowaniu ściernicowym. Jest to tłumaczone tym, że spoiwa stosowane do produkcji narzędzi ściernych nasypowych charakteryzują się małym współczynnikiem tarcia. Wartość współczynnika tarcia spoiwa klejowego po metalu waha się w granicach 0,18 – 0,25 [22], natomiast dla spoiwa ceramicznego wartość tego współczynnika wynosi 0,61 – 0,72 [5].

9.2.4. Budowa szlifierki taśmowej

Budowa szlifierki taśmowej, na której przeprowadzane jest ćwiczenie, przedstawiona została schematycznie na rys. 9.4. Szlifierka ta wyposażona jest w siłomierz tensometryczny umożliwiający pomiar sił skrawania F_n i F_t .



Rys.9.4. Schemat kinematyczny szlifierki taśmowej [13].

Przedmiot obrabiany 2 mocuje się za pomocą elementów mocujących 3 w specjalnej oprawce 4. Do połączenia oprawki 4 ze stołem szlifierki zastosowane zostały elementy sprężyste 1, na których naklejono tensometry 5, służące do pomiaru składowej F_n . Siła F_t mierzona jest za pomocą tensometrów naklejonych na belce 6. Stół szlifierki wykonuje ruch posuwowy v_f .

Taśma ścierna 11, napięta na rolkach 8, 12 i 13 porusza się z prędkością v_t . Pokrętko 9 służy do zmiany napięcia taśmy za pomocą układu napinającego. Głębokość skrawania nastawiana jest za pomocą pokrętkła 10.

Wzorcowanie układu pomiarowego ze względu na składową F_n przeprowadzane jest za pomocą ciężarków ustawianych na stole szlifierki. Natomiast ze względu na składową F_t układ wzorcowany jest za pomocą ciężarków 7, zawieszanych na linie przerzuconej przez ułożyskowaną rolę.

9.3. Pytania kontrolne

1. Charakterystyka obróbki narzędziami ściernymi nasypowymi.
2. Zalety szlifowania taśmami ściernymi.
3. Budowa narzędzi ściernych nasypowych.
4. Klasyfikacja szlifowania taśmami ściernymi.
5. Siły występujące w procesie szlifowania taśmowego.
6. Czynniki wpływające na siły skrawania przy szlifowaniu taśmowym.
7. Budowa szlifierki taśmowej.

Literatura uzupełniająca [5, 13, 21, 22].

9.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Szlifierka taśmowa.
- b. Wzmacniacz tensometryczny.
- c. Rejestrator.
- d. Taśmy ścierne.
- e. Próbkę materiału obrabianego.
- f. Komplet ciężarków do wzorcowania układu pomiarowego.

9.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Zamocować badaną próbkę w oprawce stołu szlifierki taśmowej.
2. Przeprowadzić wzorcowanie układu ze względu na siłę normalną i styczną.
3. Zamontować taśmę ścierną.
4. Przeprowadzić pomiary sił skrawania F_n i F_t podczas szlifowania taśmą ścierną, zmieniając posuw i głębokość skrawania.
5. Opracować sprawozdanie, które powinno zawierać:
 - opis stanowiska badawczego,
 - opis wzorcowania układu i przeprowadzenia pomiarów,
 - wyniki pomiarów,
 - wykresy siły normalnej i stycznej w funkcji głębokości skrawania i posuwu,
 - wnioski.

6

.

Ćwiczenie 10

TECHNOLOGIA DRAŻENIA ELEKTROEROZYJNEGO

10.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów ze wskaźnikami technologicznymi oraz zasadami doboru parametrów technologicznych drażenia elektroerozyjnego.

10.2. Wiadomości ogólne

Obróbką elektroerozyjną nazywane są sposoby usuwania zewnętrznych warstw materiału obrabianego poprzez zastosowanie erozji elektrycznej. Erozja ta następuje w wyniku krótkotrwałych wyładowań elektrycznych pomiędzy dwiema elektrodami, znajdującymi się w pewnej odległości względem siebie, z których jedną jest przedmiot obrabiany, a drugą – narzędzie (elektroda robocza). Obie elektrody zanurzone są w cieczy dielektrycznej. W otoczeniu wyładowań temperatura wzrasta do bardzo dużych wartości (tysiące, dziesiątki tysięcy kelwinów), w rezultacie czego następuje topienie a nawet parowanie materiału elektrod. Usuwanie materiału następuje też na skutek rozrywania spowodowanego naprężeniami pochodzącymi od wysokiego gradientu temperatury.

10.2.1. Obróbka elektroiskrowa i elektroimpulsowa

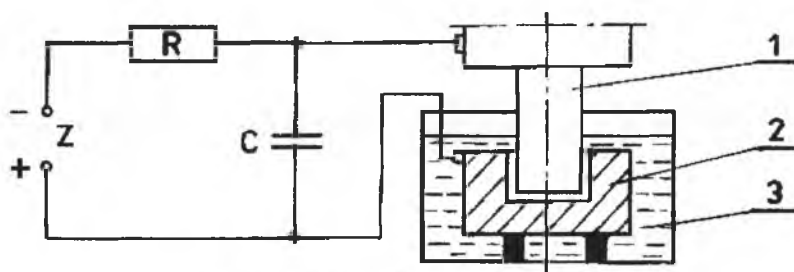
W zależności od przebiegu wyładowań elektrycznych obróbkę elektroerozyjną dzieli się na elektroiskrową i elektroimpulsową.

Obróbka elektroiskrowa realizowana jest za pomocą generatorów relaksacyjnych (zależnych). Najstarszym układem relaksacyjnym jest układ typu RC (rys. 10.1). W układzie tym wyróżnia się obwód ładowania i obwód wyładowania. Ze źródła prądu stałego Z poprzez rezystor R następuje ładowanie kondensatora C , przez co narasta napięcie między elektrodami w obwodzie wyładowania. Napięcie to wzrasta w czasie t_c , zwanym czasem ładowania, do osiągnięcia napięcia granicznego U_g (rys. 10.2). Rosnące napięcie umożliwia zjonizowanie

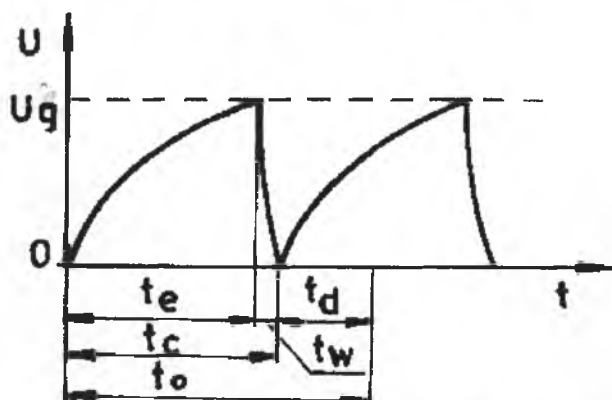
szczeliny między elektrodą roboczą 1 a przedmiotem obrabianym 2. Po osiągnięciu wartości napięcia równej U_g następuje wyładowanie iskrowe w szczeliny, prowadzące do gwałtownego spadku napięcia w obwodzie wyładowania.

Obwód ładowania

Obwód wyładowania



Rys.10.1. Schemat generatora typu RC.



Rys.10.2. Przebieg zmian napięcia w obwodzie RC [11].

Czas spadku napięcia t_w nazywany jest czasem wyładowania, natomiast czas, który upływa od zakończenia wyładowania do zdejonizowania szczeliny roboczej nazywa się czasem dejonizacji t_d .

Wartość napięcia na kondensatorze zmienia się według zależności:

$$U = U_0 \left(1 - \exp \frac{-t}{RC} \right) \quad (10.1)$$

gdzie: U_0 – napięcie źródła prądu,
 t – czas ładowania,
 C – pojemność kondensatora,
 R – rezystancja w obwodzie ładowania.

Natomiast zależność na wartość prądu w obwodzie ładowania ma postać:

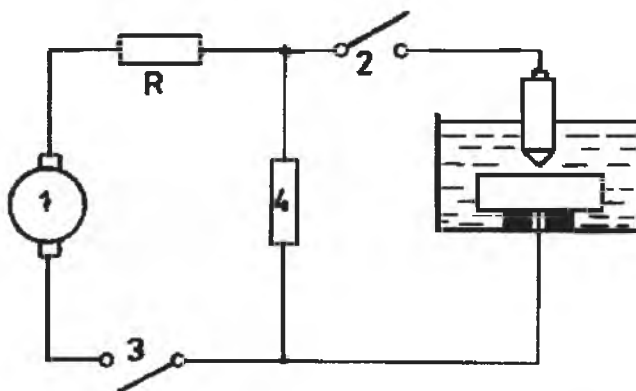
$$i = \frac{U_o}{R} \exp \frac{-t}{RC} \quad (10.2)$$

Oprócz generatorów RC stosowane są generatory zależne z indukcyjnością w obwodzie ładowania, oznaczane RLC, a także z indukcyjnością oraz rezystancją w obwodzie ładowania i wyładowania – RLCLR [1].

Obróbka elektroimpulsowa charakteryzuje się tym, że wyładowania elektryczne powodujące usuwanie materiału obrabianego są wyładowaniami stacjonarnymi (napięcie i natężenie prądu mają wartości stałe lub w przybliżeniu stałe).

W obróbce elektroimpulsowej stosowane są generatory niezależne (częstotliwość wyładowań nie zależy od stanu szczeliny iskrowej).

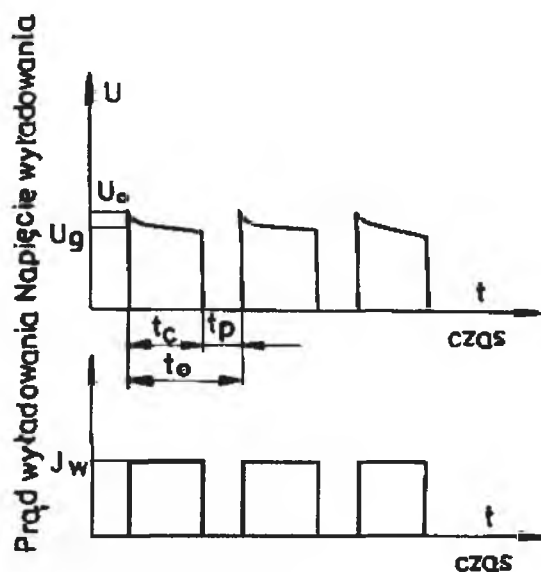
Schemat generatora niezależnego z wielobiegunową prądnicą prądu stałego 1 pokazano na rys. 10.3 [6]. W obwodzie tym występują wyłączniki elektryczne długości impulsu 2 i częstości impulsu 3 oraz element wzmacniający 4.



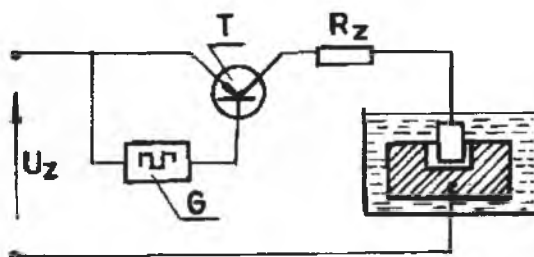
Rys.10.3. Schemat generatora impulsowego (niezależnego) [6].

Przebieg zmian napięcia i natężenia prądu dla generatora niezależnego pokazano na rys. 10.4. Generator impulsowy umożliwia ustalanie czasu trwania impulsu t_c oraz czasu przerwy t_p . W początkowej fazie wyładowania napięcie obniża się od wartości U_o do wartości granicznej U_g . Czas przerwy t_p należy tak dobrać, aby umożliwić dejonizację dielektryka.

Ze względu na swoje zalety coraz częściej stosowane są generatory tranzystorowe (rys. 10.5). W stanie przewodzenia prąd ze źródła napięcia U_z przepływa przez tranzystor mocy T , rezystory zabezpieczające R_z , elektrodę roboczą, szczelinę międzyelektrodową i przedmiot obrabiany. Generatory te umożliwiają nastawianie czasu impulsu i czasu przerwy w bardzo szerokich granicach, pozwalają też na zwiększenie dokładności obróbki [1].



Rys.10.4. Przebieg wyładowania dla generatora niezależnego [6].



Rys.10.5. Schemat generatora tranzystorowego [1].

10.2.2. Wskaźniki technologiczne drążenia elektroerozyjnego

Przebieg procesu drążenia elektroerozyjnego oraz uzyskiwane rezultaty charakteryzowane są za pomocą wskaźników technologicznych. Definicje oraz zakres stosowania tych wskaźników szczegółowo omawia M. Siwczyk [23].

Do najważniejszych wskaźników drążenia elektroerozyjnego należy zaliczyć:

1. Objętościową wydajność drążenia

$$Q_v = \frac{V_m}{t} = 1000 \frac{m_p - m_k}{\rho_m t} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right] \quad (10.3)$$

gdzie:

- V_m – objętość wyerodowanego materiału w mm^3 ,
 t – czas drążenia w minutach,
 m_p – masa materiału przed drążeniem w g,
 m_k – masa materiału po drążeniu w g,
 ρ_m – masa właściwa materiału obrabianego w g/cm^3 .

2. Prędkość drążenia

$$v_d = \frac{g_w}{t} \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (10.4)$$

gdzie: g_w – grubość wyerodowanej warstwy materiału w mm.

3. Wskaźnik objętościowego, względnego zużycia się elektrod roboczych:

$$m_v = \frac{V_E}{V_m} = \frac{\Delta m_E \rho_m}{\Delta m_m \rho_E} \quad (10.5)$$

gdzie:

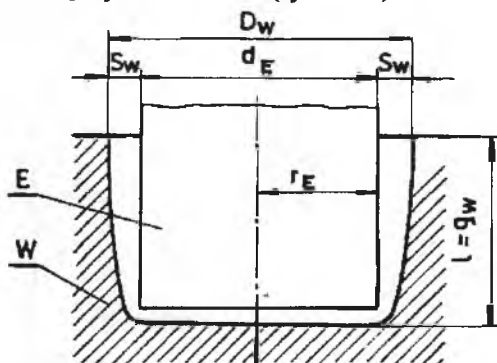
- V_E – objętościowy ubytek elektrody roboczej w mm^3 ,
 Δm_m – masa wyerodowanego materiału w g,
 Δm_E – masowy ubytek elektrody roboczej w g,
 ρ_E – masa właściwa materiału elektrody roboczej w g/cm^3 .

4. Wskaźnik liniowego, względnego zużycia się elektrod roboczych

$$m_l = \frac{\Delta l_E}{g_w} \quad (10.6)$$

gdzie: Δl_E – liniowy ubytek elektrody roboczej w mm.

5. Boczna szczelina międzyelektrodowa (rys. 10.6):



Rys.10.6. Boczne szczeliny międzyelektrodowe przy elektroerozyjnym drążeniu wgłębień: E - elektroda robocza, W - przedmiot obrabiany [23].

$$S_w = \frac{D_w - d_E}{2} \quad (10.7)$$

gdzie:

D_w – średnica wydrążonego wgłębienia przy wejściu elektrody roboczej w materiał obrabiany,

d_E – średnica elektrody roboczej.

6. Zbieżność drążonych otworów:

$$Z_o = \frac{D_l - D_o}{l_o} \quad (10.8)$$

gdzie:

D_l – średnica otworu przy wejściu elektrody roboczej,

D_o – średnica otworu przy wyjściu elektrody roboczej,

l_o – głębokość wydrążonego otworu.

7. Chropowatość i falistość powierzchni (określenia podstawowych wskaźników chropowatości i falistości powierzchni podane są np. w pracy [18]).

8. Grubość warstwy wierzchniej (to jest warstwy, której właściwości zostały zmienione na skutek przeprowadzonej obróbki elektroerozyjnej).

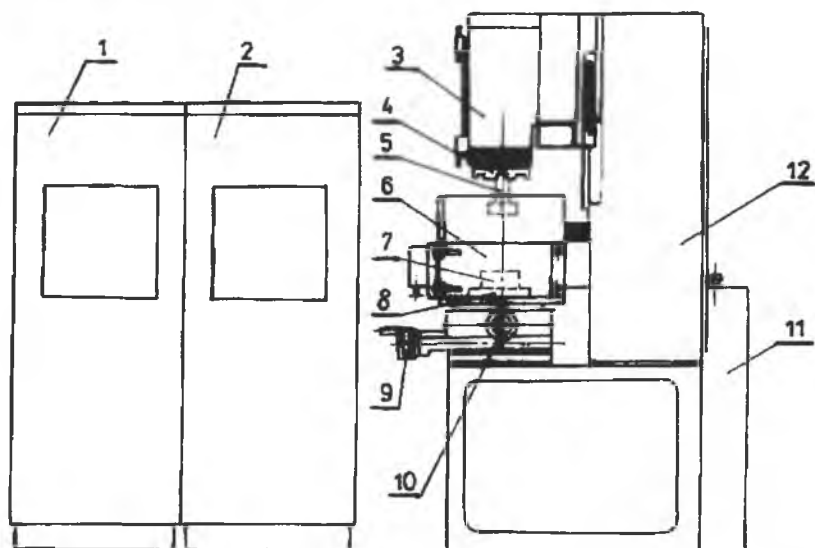
10.2.3. Budowa drążarki elektroerozyjnej

Efekty obróbki elektroerozyjnej w dużym stopniu uzależnione są od jakości obrabiarek, na których obróbka ta jest realizowana. Do najbardziej rozpowszechnionych obrabiarek elektroerozyjnych należą drążarki. Drążarka elektroerozyjna składa się z zespołów mechanicznych, elektrycznych i hydraulicznych. Główne zespoły obrabiarki elektroerozyjnej pokazane zostały na rys. 10.7.

Zespół mechaniczny drążarki składa się z korpusu 12, stołu roboczego 8 i głowicy 3. Korpus powinien charakteryzować się znaczną sztywnością i dużą odpornością na działanie ciepłe. Może on być monolityczny lub składany. Na pionowych prowadnicach korpusu umieszczona jest głowica 3, w której umiejscowione są urządzenia sterujące ruchami elektrody roboczej 5, mocowanej do płyty narzędziowej 4. Przedmiot obrabiany 7 mocowany jest na stole roboczym 8, znajdującym się w wannie roboczej 6. W czasie drążenia wanna 6 napełniana jest cieczą dielektryczną, pompowaną ze zbiornika 11. W celu oczyszczenia ciecz przechodzi przez układ filtrowania. Pozycjonowanie przedmiotu obrabianego względem elektrody roboczej odbywa się za pomocą pokręteł 9 i 10.

Realizacja obróbki elektroerozyjnej wymaga doprowadzania do szczeliny iskrowej impulsów napięcia. Wytwarzanie impulsów odbywa się w generato-

rach 1. Drażarka, na której wykonywane jest ćwiczenie, wyposażona jest w generator zasobnikowy (relaksacyjny) i tranzystorowy. Do sterowania pracą obrabiarki służy szafa sterownicza 2.



Rys.10.7. Widok ogólny drążarki elektroerozyjnej.

10.2.4. Ogólne zasady doboru parametrów drążenia otworów

Parametry technologiczne drążenia elektroerozyjnego winny być dobierane w taki sposób, aby zapewniona była wymagana dokładność wymiarowo – kształtowa i chropowatość powierzchni obrabianego otworu przy możliwie najmniejszych kosztach jednostkowych. Rozróżnia się obróbkę kształtującą i wykańczającą.

Drażenie kształtujące powinno być prowadzone przy parametrach technologicznych zapewniających minimalny czas obróbki. Drażarki elektroerozyjne mają skokową regulację parametrów obróbki (tzw. stopnie robocze, których zwykle jest kilkanaście). W dokumentacji technicznej drążarki podana jest minimalna powierzchnia drążenia $A_{\min}$ oraz wydajność objętościowa obróbki Q_v dla poszczególnych stopni roboczych. Przy ustalaniu parametrów drążenia kształtującego należy obliczyć powierzchnię drążonego otworu, a następnie dobrać taki stopień roboczy, dla którego powierzchnia drążenia jest większa od powierzchni $A_{\min}$ a wydajność Q_v możliwie największa.

W przypadku gdy drążarka, mimo prawidłowo ustawionych parametrów, pracuje nierównomiernie (np. występują częste zwarcia elektrod), należy przeprowadzić korektę warunków obróbki.

Proces drażenia kształtującego powinien być poprzedzony fazą wstępną, prowadzoną przy znacznie „łagodniejszych” parametrach. Podyktowane jest to koniecznością niedopuszczenia do nadmiernego zwiększenia gęstości prądu w początkowej fazie obróbki, kiedy elektroda robocza pracuje częścią swojej powierzchni z powodu błędów kształtu elektrody jak i błędów ustawienia elektrody względem powierzchni przedmiotu.

Obróbka wykańczająca powinna zapewnić wymaganą chropowatość powierzchni oraz dokładność drażonego otworu. Ważny jest też czas maszynowy, gdyż często czas drażenia wykańczającego jest większy od czasu drażenia kształtującego. Aby zminimalizować czas maszynowy należy prowadzić obróbkę przy maksymalnych prędkościach drażenia [23].

Dobór parametrów ze względu na wymaganą chropowatość powierzchni sprowadza się do wybrania odpowiedniego stopnia roboczego na podstawie dokumentacji technicznej drażarki (podane są chropowatości powierzchni używane przy stosowaniu poszczególnych stopni roboczych). Należy też pamiętać, że chropowatość elektrody roboczej powinna być mniejsza od chropowatości powierzchni obrabianej.

Dokładność wymiarowo – kształtowa drażonych otworów zależy od wielu czynników, z których ważniejsze to:

- tolerancja elektrod roboczych,
- dokładność drażarki,
- zużycie elektrod roboczych,
- sposób podawania cieczy dielektrycznej,
- zanieczyszczenie cieczy dielektrycznej.

10.3. Pytania kontrolne

1. Podstawy procesu erozji elektrycznej.
 2. Źródła impulsów elektrycznych w obróbce elektroerozyjnej.
 3. Definicje wskaźników technologicznych drażenia elektroerozyjnego.
 4. Uproszczony schemat drażarki elektroerozyjnej.
 5. Zadania poszczególnych zespołów drażarki.
 6. Zasady doboru parametrów drażenia kształtującego i wykańczającego.
- Literatura uzupełniająca [1, 11, 19, 23].

10.4. Wyposażenie stanowiska laboratoryjnego

- a. Drażarka elektroerozyjna.
- b. Elektrody robocze.
- c. Próbkę materiału drażonego.
- d. Waga laboratoryjna.

- e. Profilometr.
- f. Czasomierz.
- g. Głębokościomierz mikrometryczny.
- h. Mikrometr.

10.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

1. Obliczyć powierzchnię drążenia podczas obróbki kształtującej (wymiary elektrody roboczej zmierzyć za pomocą mikrometru).
2. Korzystając z dokumentacji technicznej drążarki i uwzględniając powierzchnię drążenia dobrać parametry technologiczne drążenia kształtującego.
3. Uwzględniając chropowatość powierzchni po drążeniu (wartość tej chropowatości poda prowadzący zajęcia) dobrać w oparciu o dokumentację techniczną drążarki parametry technologiczne obróbki wykańczającej.
4. Zważyć próbki oraz elektrody do drążenia kształtującego i wykańczającego.
5. Przeprowadzić próbę drążenia kształtującego i wykańczającego mierząc czas drążenia.
6. Ponownie zważyć próbki oraz elektrody robocze.
7. Zmierzyć głębokość otworu wydrążonego przy parametrach dla obróbki kształtującej.
8. Zmierzyć chropowatość powierzchni po drążeniu wykańczającym.
9. Obliczyć, korzystając ze wzorów (10.3), (10.4) i (10.5):
 - objętościową wydajność drążenia,
 - prędkość drążenia,
 - wskaźnik objętościowego, względnego zużywania się elektrod roboczych.
10. Opracować sprawozdanie, które winno zawierać:
 - opis przeprowadzonych pomiarów
 - wyniki pomiarów i obliczeń,
 - uwagi i wnioski.



LITERATURA

1. Albiński K., Miernikiewicz A., Ruszaj A., Zimny J.: Laboratorium obróbki erozyjnej. PWN Warszawa 1980.
2. Bielski J.: Optymalizacja parametrów nagniatania i skrawania materiału z umocnioną nagniataniem warstwą skrawaną. Mechanik Nr 9/1983.
3. Borkowski J.: Zużycie i trwałość ściernic. PWN Warszawa 1990.
4. Dmochowski J.: Podstawy obróbki skrawaniem. PWN Warszawa 1978.
5. Feld M., Szpunar A.: Szlifowanie materiałów konstrukcyjnych taśmami ściernymi. WNT Warszawa 1977.
6. Filipowski R., Marciniak M.: Technologia maszyn i obrabiarki. Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1989.
7. Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej. WNT Warszawa 1983.
8. Górski E.: Poradnik narzędziowca. WNT Warszawa 1989.
9. Górski E.: Technologia maszyn. Podstawy skrawania. Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1970.
10. Grzesik T.: Skrawanie staliwa Hadfielda z podgrzewaniem za pomocą łuku elektrycznego. Mechanik Nr 7/1984.
11. Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej. WNT Warszawa 1970.
12. Kawalec M., Kodym J., Jankowiak M.: Laboratorium z podstaw skrawania. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań 1984.
13. Kądziołka B., Parol A., Stefaniuk A.: Laboratorium obróbki mechanicznej. Wyd. Politechniki Lubelskiej. Lublin 1980.
14. Kiepuszewski B., Legutko S., Wieczorowski K.: Skrawanie metali. Wyd. Politechniki Poznańskiej. Poznań 1980.
15. Oczóś K.: Kształtowanie materiałów skoncentrowanymi strumieniami energii. Rzeszów 1988.
16. Oczóś K.: Skrawanie z plazmowym nagrzewaniem materiału. Mechanik Nr 5/1988.
17. Oczóś K., Porzycki J.: Szlifowanie. Podstawy i technika. WNT Warszawa 1986.
18. Parol A., Zaleski K.: Laboratorium obróbki skrawaniem i obrabiarek. Cz. I. Wyd. Politechniki Lubelskiej. Lublin 1990.
19. Parol A., Zaleski K.: Laboratorium obróbki elektroerozyjnej. Wyd. WSIŃ. Lublin 1977.

20. Podurajew W.N., Jarosławcew W.M., Jarosławcewa N.A.: Effiektiwnost obrabotki riezaniem s opiereżajuszczim płastичесkim dieformirowaniem. Vestnik Maszynostrojenije Nr 12/1972.
21. Praca zbiorowa. Poradnik inżyniera. Obróbka skrawaniem. Tom 1. WNT Warszawa 1991.
22. Pszczołowski W., Rosienkiewicz P.: Obróbka ścierna narzędziami nasypowymi. WNT Warszawa 1995.
23. Siwczyk M.: Obróbka elektroerozyjna. Technologia i zastosowanie. WNT Warszawa 1981.
24. Żuczkov N.S. i in.: Powyszenije effiektiwnosti obrabotki riezaniem zagotowok iz titanowych splawow. Maszynostrojenije. Moskwa 1989.