

## 6. POMIARY SIŁ SKRAWANIA

### 6.1. Wiadomości ogólne

Wypadkowa siła skrawania działająca na narzędzie skrawające zależy od wielu czynników związanych z warunkami w których przebiega proces obróbki. Najważniejsze z nich to: parametry technologiczne obróbki, rodzaj materiału obrabianego, geometria ostrza narzędzia, rodzaj obróbki i rodzaj stosowanej cieczy chłodząco-smarującej. Wypadkową siłę  $F$  działającą na ostrze narzędzia rozkłada się zazwyczaj na trzy wzajemnie prostopadłe składowe (rys.6.1.).

Siła składowa  $F_c$  działa w kierunku zgodnym z wektorem prędkości ruchu głównego i jest nazywana składową obwodową, siłą styczną lub główną siłą skrawania.

Siła składowa  $F_f$  jest równoległa do kierunku posuwu i nosi nazwę składowej posuwowej siły skrawania.

Siła składowa  $F_p$  ( składowa odporowa ) jest prostopadła do powierzchni obrobionej oraz do składowych  $F_c$  i  $F_f$  przy toczeniu wzdłużnym nazywana jest składową promieniową.

Wypadkowa składowej posuwowej  $F_f$  i składowej odporowej  $F_p$  może być wyznaczona z zależności:

$$F_{f,p} = \sqrt{F_f^2 + F_p^2}$$

odchyła się ona niewiele od kierunku przekroju głównego  $P_o$  i dla uproszczenia można założyć że się z tym kierunkiem pokrywa tak jak na rys.6.1.

Znając siły składowe  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  można wypadkową siłę skrawania obliczyć z zależności:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_{f,p}^2} = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

Wyznaczanie wartości składowych siły skrawania ma bardzo duże znaczenie teoretyczne i praktyczne. Przy doświadczalnym wyznaczaniu zależności składowych sił skrawania od parametrów technologicznych stosuje się najczęściej następujące wzory potęgowe:

$$F_c = C_c \times a_p^{x_c} \times f^{y_c} \times K_c$$

$$F_f = C_f \times a_p^{x_f} \times f^{y_f} \times K_f$$

$$F_p = C_p \times a_p^{x_p} \times f^{y_p} \times K_p$$

gdzie:  $C_c, C_f, C_p$  - stałe zależne od warunków obróbki, wyznaczone eksperymentalnie;

$x_c, x_f, x_p$  - wykładniki potęgowe charakteryzujące wpływ głębokości skrawania;

$y_c, y_f, y_p$  - wykładniki potęgowe charakteryzujące wpływ posuwu  $f$ , wyznaczane eksperymentalnie, podobnie jak wykładniki  $x$  przy głębokości;

$K_c, K_f, K_p$  - współczynniki poprawkowe uwzględniające wpływ innych czynników jak np. materiał obrabiany i jego stan, geometria narzędzia, stan zużycia ostrza itp.

## 6.2. Zmienność sił skrawania

Rejestrowane doświadczalnie przebiegi sił w czasie wykazują się zmiennością chwilowej wartości siły. Zmienność sił może wynikać z warunków statycznych (zmienny przekrój warstwy skrawanej, zmienna liczba czynnych ostrzy), jak również może być powodowana dynamicznymi warunkami skrawania (drżania wymuszone i drżania samowzbudne).

Na rys. 6.2. przedstawiono charakterystyczne przypadki zmienności siły przy toczeniu, gdzie na „wolno zmienny przebieg siły” powodowany przez zmienność przekroju warstwy skrawanej nakładają się „szybko zmiennie przebiegi sił” powodowane przez drżania wymuszone np. zmiennymi warunkami powodowanymi przez proces tworzenia się wióra, lub przez drżania samowzbudne.

Siła prawie stała (rys. 6.2.a), to przypadek kiedy średnia wartość siły pozostaje praktycznie stała, poza stosunkowo krótkimi czasami wecinania  $t_p$  (wejście w materiał obrabiany) i wyjścia narzędzia  $t_k$ , które przy długim czasie skrawania  $t_{skr}$  (toczenie długiego wałka) nie mają praktycznego znaczenia.

Siła okresowo zmienna (rys. 6.2.b), to przypadek w którym średnia wartość siły zmienia się okresowo w zakresie  $F_{min}$  do  $F_{max}$ , czemu towarzyszy zmienna głębokość skrawania w granicach  $a_{p min}$  do  $a_{p max}$  powodowana toczeniem wałka z nierównomiernie rozmieszczonym naddatkiem.

Siła tętniąca (rys 6.2.c), którą charakteryzuje zmienność jej średniej wartości od  $F_{min} = 0$  do  $F_{max}$  może wystąpić przy toczeniu przedmiotów krótkich lub o powierzchni przerywanej.

### 6.3. Siłomierze do pomiaru sił skrawania.

Pomiar siły oparty jest głównie na pomiarze odkształceń elementów poddanych działaniu sił. Do pomiaru tych odkształceń można używać wiele różnych zjawisk fizycznych, wykorzystując do tego celu czujniki, które przetwarzają odkształcenia elementu poddanego działaniu siły na wielkość dogodną do odczytu zależną od działającej siły. Zależnie od zastosowanych do pomiaru siły czujników siłomierze dzielimy na:

1. mechaniczne (dźwigniowe, uchylne, sprężynowe, z elementem sprężystym i hydrauliczne);
2. elektromechaniczne (tensometryczne, strunowe, indukcyjne, pojemnościowe);
3. elektryczne (magnetosprężyste, piezoelektryczne).

Początkowo do pomiaru sił skrawania wykorzystywano różne odmiany siłomierzy takie jak: siłomierze mechaniczne, hydrauliczne, elektrolityczne, magnetyczne, pojemnościowe i inne.

Obecnie najczęściej wykorzystuje się do tego celu siłomierze tensometryczne i piezoelektryczne.

Siłomierz tensometryczny - jest to siłomierz rezystancyjny, w którym do pomiaru siły wykorzystuje się zależność zmian rezystancji (oporności) układu tensometrów połączonych z elementem sprężystym, od zmian wartości siły działającej na ten element. Siłomierze tensometryczne buduje się z tensometrami: metalowymi - drutowymi lub foliowymi (rys. 6.3.) wykonywanymi zwykle z konstantanu i naklejonymi na element sprężysty oraz półprzewodnikowymi (zwykle z krzemu lub germanu), połączonymi w układzie połowy lub pełnego mostka Wheatstone'a.

Siłomierz piezoelektryczny - jest to siłomierz elektryczny, w którym do pomiaru siły wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne tj. zjawisko powstawania ładunku na ściankach odkształconej pod wpływem siły płytki, odpowiednio wyciętej z materiału piezoelektrycznego (najczęściej kwarcu). Do przekształcenia ładunku (trudnego do pomiaru) w sygnał napięciowy, wykorzystuje się wzmacniacze ładunku.

#### 6.3.1. Budowa siłomierza tensometrycznego

Pomiędzy tensometrami wężykowymi i kratowymi przedstawionymi na rys. 6.3., różnica polega na wyeliminowaniu przejść między równoległymi pasmami drutu oporowego tensometrów kratowych. Powoduje to niewrażliwość tensometrów kratowych na odkształcenia prostopadłe do

kierunku ułożenia drutu oporowego. Tensometry foliowe (rys. 6.3.c) wykonuje się trawiąc chemicznie cienką folię z materiału oporowego połączoną trwale z podkładem żywicznym. Dzięki temu drut oporowy o przekroju okrągłym został zastąpiony pasmami o przekroju prostokątnym o dużym stosunku szerokości do grubości, co stwarza bardzo dogodne warunki odprowadzania ciepła. W związku z tym przez tensometry foliowe może płynąć znacznie większy prąd, bez szkody dla dokładności pomiaru. Do naklejenia tensometrów na odkształcający się pod wpływem siły element stosuje się różne kleje (najczęściej nitrocelulozowy lub żywice epoksydowe). Kierunek pasm oporowych tensometru musi być zgodny z kierunkiem mierzonych odkształceń, wówczas pasma oporowe zmieniają swą długość i tensometr zmienia swą rezystancję proporcjonalnie do wydłużenia. Ponieważ elementy sprężyste siłomierzy tokarskich mogą się odkształcać w granicach sprężystości (prawo Hooke'a), to względne zmiany rezystancji (oporności) tensometrów  $R/R$  nie przekraczają na ogół wartości 1‰. Powoduje to konieczność stosowania układów mostkowych umożliwiających dokładne pomiary małych zmian rezystancji (mostek Wheatstone'a). Zbudowany w byłej Katedrze Obróbki Metali (w latach siedemdziesiątych) tensometryczny trójściłowy siłomierz tokarski mocuje się na suporcie w miejsce imaka narzędziowego. Elementem podatnym (sprężystym), który odkształca się pod wpływem mierzonych sił skrawania jest dwustopniowa cienkościenna rura (rys. 6.4.), w której mocuje się nóż. Rura utwierdzona jest w sztywnym kątowniku, poprzez który siłomierz mocowany jest na suporcie tokarki.

Połączenie tensometrów  $R_1$  i  $R_2$  (służących do pomiaru składowej  $F_c$ ) w układzie mostkowym przedstawia rys. 6.5. Jeżeli siłomierz nie jest obciążony siłą  $F_c$  wówczas rezystancje tensometrów  $R_1$  i  $R_2$  są sobie równe. Pod względem działania siły  $F_c$  tensometr  $R_1$  ulega wydłużeniu i jego oporność będzie równa  $R_1 + R$ , natomiast tensometr  $R_2$  jest ściskany i jego oporność maleje równając się  $R_2 - R$ . Mostek zostaje wytrącony z równowagi, w gałęzi środkowej pojawia się prąd i galwanometr wychyla się proporcjonalnie do wartości siły  $F_c$ .

Pod wpływem siły  $P_p$  tensometry  $R_1$  i  $R_2$  ściskane są równomiernie co nie wpływa na ównowagę mostka (rys. 6.5.) służącego do pomiaru siły  $F_c$ . Podobnie oba tensometry  $R_1$  i  $R_2$  odkształcają się identycznie pod wpływem działania siły  $F_F$ , a zatem również składowa  $F_f$  nie wpływa na zmianę sumarycznej oporności tych tensometrów i nie zakłóca pomiaru składowej  $F_c$ . Ewentualne zmiany temperatury powodują jednakowe odkształcenie obu tensometrów czynnych  $R_1$  i  $R_2$  nie mając również wpływu na równowagę mostka i odczyt wartości siły  $F_c$ .

Podobnie działa układ pomiarowy składowej  $F_f$ , w którym tensometrami czynnymi są tensometry  $R_3$  i  $R_4$  połączone w identycznym układzie mostkowym jak dla pomiaru siły  $F_c$ .

Inaczej połączono tensometry czynne  $R_5$  i  $R_6$  służące do pomiaru składowej  $F_p$ , co przedstawia rys. 6.6. Szeregowe połączenia tensometrów  $R_5$  i  $R_6$  w jednej gałęzi czynnej mostka, naklejonych po przeciwnych stronach rury, spowodowane jest koniecznością kompensacji wpływu siły  $F_f$  na pomiar siły  $F_p$ . Wzrost oporności tensometru  $R_5$  rozciąganego siłą  $F_f$  kompensowany jest przez identyczne zmniejszenie się oporności tensometru  $R_6$  ściskanego siłą  $F_f$ . Jeżeli siła  $F_p$  nie działa, to mostek przedstawiony na rys. 6.6 jest w równowadze, gdyż oporność gałęzi czynnej  $R_5 + R_6$  jest równa oporności drugiej, symetrycznie położonej gałęzi, w której włączone są tensometry  $R_7 + R_8$ , służące do kompensacji temperatury przy pomiarze składowej  $F_p$ . Pod wpływem siły  $F_p$  oba tensometry czynne zmniejszają swoją oporność podczas gdy tensometry kompensacyjne  $R_7$  i  $R_8$  praktycznie jej nie zmieniają, co powoduje wytrącenie mostka z równowagi i wskazanie galwanometru  $G$  proporcjonalne do wartości siły  $F_p$ . W praktyce wzajemne wpływy składowych na siebie zależą od jednakowych własności i wymiarów tensometrów oraz dokładności geometrycznej ich przyklejenia i przy starannym wykonaniu siłomierza nie przekraczają 2%.

### 6.3.2. Budowa siłomierza piezoelektrycznego.

Szereg kryształów wykazuje właściwości piezoelektryczne polegające na tym, że przy ściskaniu lub rozciąganiu w kierunku prostopadłym do osi elektrycznej na powierzchniach kryształu prostopadłych do działających sił pojawiają się ładunki elektryczne (znak i ładunków powstałych przy ściskaniu są przeciwne do znaku ładunków powstałych przy rozciąganiu). Jest to tzw. zjawisko piezoelektryczne wzdłużne. Największe znaczenie techniczne jako piezoelektryki mają kryształy kwarcu  $SiO_2$ , ze względu na ich dużą wytrzymałość mechaniczną, dużą oporność oraz małą zależność zjawiska piezoelektrycznego do temperatury.

#### Kryształy kwarcu.

Kwarc krystalizuje w układzie heksagonalnym (prawo lub lewoskrętnym). W kryształach kwarcu lewoskrętnym (rys. 6.7.) wyróżnia się następujący układ sił krystalograficznych:

1. Oś optyczna  $z$ , prostopadła do przekroju poprzecznego sześciokąta foremego (heksagonu), w kierunku tej osi oporność elektryczna jest najmniejsza.
2. Trzy osie elektryczne  $x$  prostopadłe do osi optycznej przechodzące przez krawędzie kryształu.
3. Trzy osie mechaniczne  $y$  prostopadłe do osi optycznej  $z$  oraz prostopadłe do ścian sześciokąta foremego kryształu jak również prostopadłe do osi  $x$ .

Patrząc na kryształ kwarcu w kierunku osi z (rys.6.8.), można przedstawić sposób wycięcia płytek kwarcu, z których buduje się czujniki (przetworniki) piezoelektryczne siły.

Przyczyną zjawiska piezoelektrycznego jest zmiana równowagi kryształu pod wpływem oddziaływań zewnętrznych (elektrycznych lub mechanicznych). Jeżeli nie ma oddziaływań zewnętrznych sieć krystaliczna piezoelektryka nie jest zdeformowana (w znaczeniu makroskopowym) i w związku z tym jest elektrycznie obojętna.

Zjawisko piezoelektryczne w kwarcu można wytłumaczyć na podstawie rys. 6.9., na którym w narożach sześciokąta widzimy usytuowane na przemian dodatnie jony krzemu  $Si^{4+}$  i ujemne tlenu  $O^{2-}$ .

Jeżeli kryształ kwarcu będziemy ścisnąć wzdłuż jednej z osi elektrycznych (oś x - na rys. 6.9.) to jony krzemu  $Si$  oraz tlenu  $O$  leżące na tej osi zsuną się nieco do środka, a elektrody naciskające A i B wejdą w obszar działania ładunków elektrycznych. Zmiana struktury i związane z nią przemieszczenie jonów i deformacja orbit elektronowych powodują powstanie nieskompensowanej makroskopowej polaryzacji w kierunku wyróżnionej osi, a w konsekwencji powstanie dodatnich ładunków na elektrodzie A pod wpływem większego oddziaływania jonów  $O^{2-}$  i ujemnych ładunków na elektrodzie B pod wpływem większego oddziaływania dodatnich jonów  $Si^{4+}$ . Ładunki na elektrodach powstają natychmiast gdy tylko pojawia się naprężenie deformujące kryształ.

Podstawowe równania opisujące prosty efekt piezoelektryczny w kwarcu mają w zapisie tensorowym następującą postać:

$$P_x = d_{11} T_{xx} - d_{11} T_{yy} + d_{14} T_{yz}$$

$$P_y = -d_{14} T_{xz} - 2d_{11} T_{xy}$$

$$P_z = 0$$

gdzie:  $d_{11} = -2,3$  [pC/N];  $d_{14} = -0,67$  [pC/N]    tensory            współczynników  
(modułów) piezoelektrycznych

$P_x, P_y, P_z$  - wektory polaryzacji (gęstość powierzchniowa ładunków) na powierzchniach płytki prostopadłych do odpowiednich osi krystalograficznych x,y,z.

$T_{xx}, T_{yy}, T_{yz}, T_{xy}, T_{xz}$  - tensory naprężeń, w których pierwszy indeks wskazuje kierunek siły, a drugi powierzchnię prostopadłą (do wskazanej przez niego siły).

Przykładowo:  $T_{xx}$  - oznacza naprężenie na powierzchni prostopadłej do osi krystalograficznej  $x$  (drugi indeks), pochodzące od siły działającej wzdłuż tej osi, czyli naprężenie (ściskające lub rozciągające) w płytce wyciętej prostopadłe do osi  $x$  (rys. 6.8a).

$T_{yz}$  - naprężenie na powierzchni prostopadłej do osi  $z$  pod wpływem siły działającej wzdłuż osi  $y$  (naprężenie styczne).

Z płytek wyciętych w kryształu kwarcu, tak jak pokazuje rys. 6.8a (największa powierzchnia płytki płasko równoległej jest prostopadła do osi elektrycznej  $x$ ) można zrobić przetwornik siły ściskającej jeżeli będzie ona wywierana w kierunku tej osi, ponieważ pierwsze równanie przyjmuje postać:  $P_x = d_{11} T_{xx}$

Naprężenie ściskające (rozciągające)  $T_{xx}$  jest równe  $F_x/s$ , gdzie:  $s$  - powierzchnia płytki, a  $F_x$  - siła prostopadła do powierzchni płytki.

Ładunek  $Q_x$  (wytworzony na powierzchni prostopadłej do osi  $x$ ) jest równy:

$$Q_x = s P_x = s d_{11} T_{xx} = s d_{11} \frac{F_x}{s} = d_{11} F_x$$

Jak widać ładunek ten nie zależy od powierzchni płytki. Ze względu na problemy związane z izolowaniem ładunku stosuje się praktycznie układy typu „sandwich” złożone z dwóch płytek kwarcowych zwróconych do siebie powierzchniami o tym samym znaku ładunku (rys. 6.10).

Z płytek wyciętych prostopadłe do osi mechanicznej  $y$  (rys. 6.8b) można zbudować przetwornik do pomiaru sił stycznych do powierzchni płytek, bo jak to widać na z drugiego z równań podstawowych, przyjmuje ono wówczas postać:

$$P_y = -2d_{11} T_{xy}$$

co oznacza, że polaryzację na powierzchni płytki wywołuje siła skierowana wzdłuż osi  $x$  działająca na powierzchni płytki (powierzchnia prostopadła do osi  $y$ ).

Ładunek  $Q_y$  wytworzony na powierzchni płytki wynosi:

$$Q_y = s P_y = -s 2d_{11} T_{xy} = -2sd_{11} \frac{F_x}{s} = -2d_{11} F_x$$

Ładunek ten, tak jak w przetworniku, dla sił ściskających nie zależy od powierzchni płytki, ale jest dwukrotnie większy dla takiej samej wartości siły.

Dla stosowanej ze względów praktycznych, konstrukcji „sandwich” ładunek ten jest 2 krotnie większy (dwie płytki) i wynosi:

$$Q_y = -4d_{11} F_x \quad (\text{rys.6.11})$$

Opisane wyżej czujniki jednoskładowe (pokazane na rys. 6.10 i 6.11) nie wykazują oddziaływań skrośnych, gdyż obciążanie czujnika do pomiaru sił ściskających (rys. 6.10) siłą styczną nie

powoduje zmian polaryzacji  $P_x$ , jak również ściskanie lub rozciąganie przekaźnika do pomiaru sił stycznych nie powoduje zmian polaryzacji  $P_y$ . Odpowiednie zestawienie w jeden stos pomiarowy jednoskładowych przetworników typu „sandwich” wykonanych z płytek wyciętych prostopadle do osi elektrycznej  $x$  i mechanicznej  $y$  umożliwia skonstruowanie przetwornika mierzącego jednocześnie trzy składowe siły skrawania.

Przetwornik taki (rys.6.12) zbudowany jest z trzech przetworników typu „sandwich” ściśniętych wstępnie śrubą w celu umożliwienia przenoszenia sił stycznych do powierzchni płytek.

Jedna para płytek wyciętych prostopadle do osi elektrycznej  $x$  służy do mierzenia sił działających wzdłuż osi śruby (składowa  $F_c$ ). Pozostałe składowe siły ( $F_f$  i  $F_p$ ) mierzone są przy pomocy dwóch par płytek wyciętych prostopadle do osi mechanicznej  $y$ , przy czym każda para ma osie elektryczne  $x$  obrócone względem siebie o  $90^\circ$ .

Tak skonstruowany trój składowy przetwornik siły charakteryzuje się dużą sztywnością (dzięki małej grubości płytek kwarcowych oraz stosunkowo dużej ich powierzchni). Przetworniki tej konstrukcji oprócz zastosowań uniwersalnych, stanowią podstawowy element trójskładowych siłomierzy piezoelektrycznych (w tym również tokarskich).

Zbudowany w ZSiN (w 1990r.) trójskładowy tokarski siłomierz piezoelektryczny (rys.6.13) ma trzy podpory, którymi są trój składowe czujniki siły. Dwie podpory podtrzymujące płytkę górną siłomierza umieszczone są symetrycznie z przodu, a jedna z tyłu, gdyż jest ona najmniej obciążona przez siłę skrawania.

Wyjścia z poszczególnych czujników jednoskładowych (zabudowanych w trzech podporach) są ze sobą połączone równolegle (dla każdego kanału  $F_f$ ,  $F_p$ ,  $F_c$  z osobna). Wynika stąd, że ładunek mierzony w danym kanale (wytworzony przez składowe siły działające na pojedyncze czujniki) jest sumą ładunków wytworzonych we wszystkich trzech podporach. Siłomierz piezoelektryczny tak skonstruowany ma tę właściwość, że jego wskazanie nie zależy od wartości sił obciążających poszczególne podpory (stosy pomiarowe), a tylko od ich sumy. Właściwość ta powoduje, że siłomierz nie wykazuje praktycznie błędów przy przemieszczaniu się punktu przyłożenia siły. Nóż tokarski mocowany jest w imaku, sztywno związanym z płytą górną siłomierza (rys. 6.13).

Fizyczne wyjścia służące do pomiaru poszczególnych składowych sił są w postaci gniazd typu BNC umocowane w tylnej części płyty dolnej siłomierza, która bezpośrednio umocowana jest do suportu tokarki.

Jak już wspomniano z przetwornika piezoelektrycznego wychodzi sygnał w postaci ładunku, który jest proporcjonalny do działającej siły. Ponieważ zewnętrzne pola elektryczne mogą w czujniku (który jest swoistym kondensatorem) powodować powstawanie ładunków, należy więc



czujnik i przewód doprowadzający ekranować, aby to sobie ułatwić stosuje się (pokazane na rys. 6.10 i 6.11) układy typu „sandwich”. Ponadto gdyby bezpośrednio na przetworniku piezoelektrycznym mierzyć napięcie  $U_p$  to pomiar siły byłby zakłócony przez zmienną pojemność przetwornika  $C_p$ , na którą mają wpływ zmienne pojemności znajdujące się w pobliżu czujnika między innymi pojemności przewodów. Ponieważ:

$$U_p = \frac{Q}{C_p}$$

a pojemność  $C_p$  - jest zmienna, to zmieniałoby się mierzone napięcie mimo, że wytworzony pod wpływem stałej siły ładunek  $Q$  byłby stały (pomijając jego nieuniknioną upływność na skutek skończonej oporności stosowanych izolacji).

Dla zwiększenia tych oporności boki płytek kwarcowych powinny być starannie odtłuszczone, a same czujniki powinny być zamknięte w hermetycznej komorze. Oddzielenie czujników piezoelektrycznych od otoczenia zapobiega zabrudzeniu ich powierzchni i uniezależnia ich oporności od wpływu wilgoci otaczającego środowiska.

Aby uniezależnić się przy pomiarze od wpływu zmiennych pojemności stosuje się tzw. wzmacniacze ładunku, (rys.6.14), których działanie polega na przeniesieniu powstałego na przetworniku ładunku  $Q$  (przy pomocy wzmacniacza operacyjnego) na kondensator wzorcowy  $C$ , którego pojemność jest stała i niezmienna. Wówczas napięcie  $U$  mierzone na tym kondensatorze jest zależne tylko od wytworzonego na przetworniku ładunku, który jest proporcjonalny do mierzonej siły.

$$U = U_c = Q/C$$

gdzie:  $C$  - pojemność wzorcowa (rys.6.14)

Pewne trudności mogą wystąpić przy pomiarze sił statycznych, gdyż wówczas siłomierz może wykazywać zmniejszanie się siły na skutek upływności ładunku.

Przeciwdziałać upływności ładunku można poprawiając izolację czujnika i przewodów doprowadzających oraz stosując odpowiedniej klasy wzmacniacze operacyjne (o małym wejściowym prądzie polaryzacji) co może ograniczyć spadek siły powodowanej upływnością do wartości poniżej 1% na minutę.

#### 6. 4. Wykonanie ćwiczenia

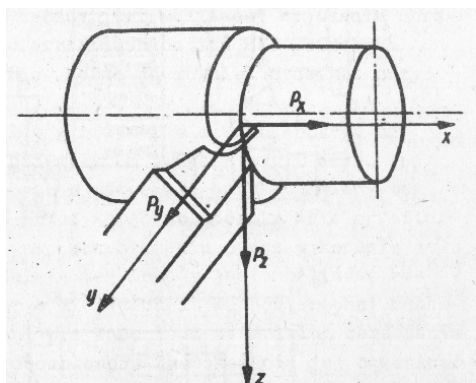
Studenci zapoznają się ze stanowiskiem pomiarowym, na którym można mierzyć siły przy toczeniu za pomocą siłomierza tensometrycznego lub piezoelektrycznego. Następnie wykorzystując zarejestrowane na komputerze wyniki pomiaru składowych sił skrawania dla różnych parametrów technologicznych toczenia wykonują następujące zadania:

1. Przeglądanie zarejestrowanych plików z wykorzystaniem programu „Digrec”.
2. Dla wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie plików studenci oceniają:
  - czas wcinania, czas skrawania przy prawie stałej sile i czas wyjścia ostrza odnosząc go do czasu jednego obrotu toczzonego przedmiotu;
  - stosunek składowej zmiennej siły do jej wartości średniej;
  - wartości średniej siły skrawania dla różnych parametrów tak dobranych, aby mogły posłużyć do zastosowania metody wykreślnej w celu określenia zależności siły skrawania od głębokości skrawania i posuwu;
3. Na podstawie otrzymanych wyników pomiaru siły w funkcji głębokości skrawania i posuwu, metodą wykreślną opracowują wzór na siłę skrawania w postaci

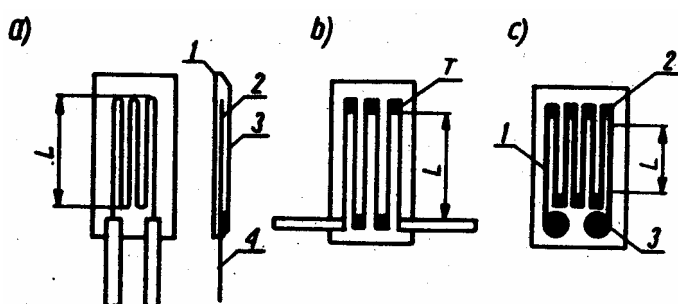
$$F = C \times a_p^x \times f^y$$

tzn. znajdują liczbowe wartości stałej  $C$  i wykładników potęgowych  $x$  i  $y$ .

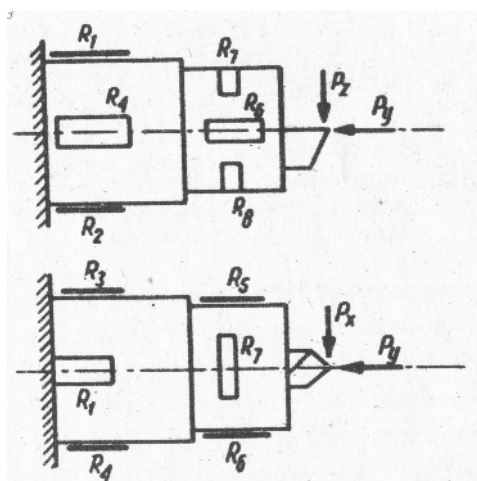
4. Wyniki pomiarów składowej siły skrawania i wykresy siły w funkcji  $f$  i  $a_p$  w skali logarytmicznej należy zamieścić w protokole (tabl. 6.1.).



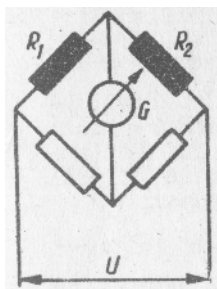
Rys. 6.1. Rozkład siły wypadkowej  $F$  na trzy wzajemnie prostopadłe składowe  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  działające na nóż tokarski.



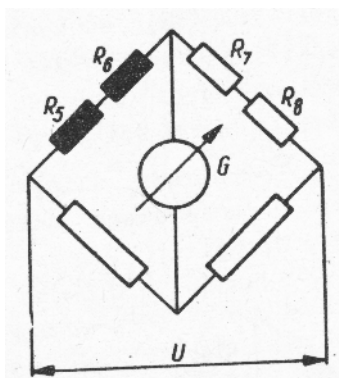
Rys. 6.2. Przykładowe konstrukcje produkowanych w latach siedemdziesiątych w Polsce tensometrów (L - baza pomiarowa tensometrycznego czujnika oporowego): a) tensometr wężykowy, produkcji Instytutu Lotnictwa (1 - podkładka celulozowa lub papierowa, 2 - drut oporowy, 3 - nakładka z tego samego materiału co podkładka 1, 4 - przewód doprowadzający prąd (o znacznie większym przekroju niż drut oporowy), b) tensometr kratowy, produkcji Instytutu Mechaniki Precyzyjnej oraz Politechniki Gdańskiej (konstrukcja różni się od „a” tylko połączeniem par drutów oporowych taśmą T), c) tensometr foliowy, produkcji Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych (1 - podkładka z żywicy termoutwardzalnej, 2 - wytrawione pasma oporowe, 3 - powierzchnie służące do lutowania przewodów łączących).



Rys. 6.3. Schemat elementu pomiarowego tensometrycznego trójskładowego siłomierza tokarskiego z naklejonymi tensometrami (rezystorami):  $R_1$  i  $R_2$  - tensometry do pomiaru składowej obwodowej  $F_c$ ,  $R_3$  i  $R_4$  - tensometry do pomiaru składowej posuwowej  $F_f$ ,  $R_5$  i  $R_6$  - tensometry do pomiaru składowej odporowej  $F_p$ ,  $R_7$  i  $R_8$  - tensometry kompensujące wpływ temperatury.



Rys. 6.4. Połączenie tensometrów  $R_1$  i  $R_2$  służących do pomiaru składowej  $F_c$  (mostek z dwiema gałęziami czynnymi).



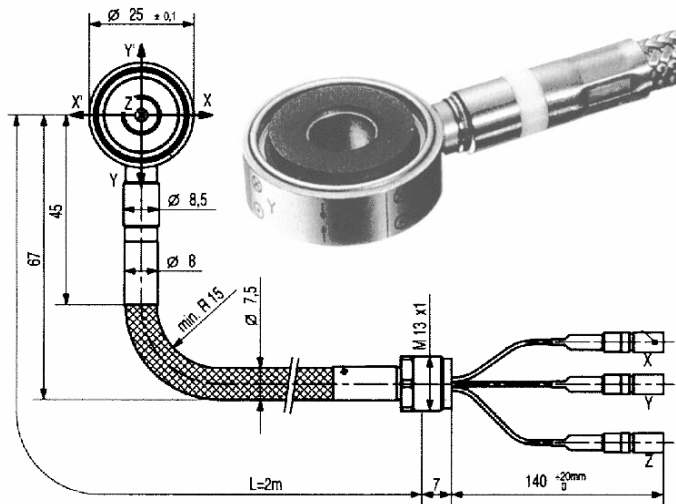
Rys. 6.6. Połączenie tensometrów  $R_5$  i  $R_6$  mierzących składową  $F_p$  (mostek z jedną gałęzią czynną).

Rys. 6.7. Osie charakterystyczne kryształu kwarcu: x - oś elektryczna, y - oś mechaniczna, z - oś optyczna.

Rys. 6.8. Kierunki osi krystalograficznych kryształu kwarcu oraz sposób wycinania przetworników (czujników) piezoelektrycznych.

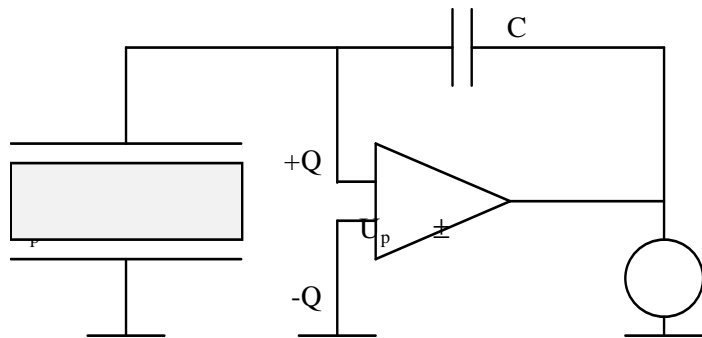
- x - oś elektryczna, przechodzi przez krawędzie sześciokąta,
- y - oś mechaniczna, prostopadła do ścianki przekroju sześciokątnego,
- a - płytka płasko - równoległa o powierzchniach „dużych” prostopadłych do osi elektrycznej x,
- b - płytka płasko - równoległa o powierzchniach prostopadłych do osi mechanicznej y.

Rys. 6.9. Wyjaśnienie zjawiska polaryzacji elektrycznej kryształu kwarcu po jego deformacji powodowanej przez zewnętrzne oddziaływanie siłowe.



Rys. 6.12. Konstrukcja trójskładowego przetwornika siły.

Rys. 6.13. Przekrój siłomierza przez dwie przednie podpory (stosy pomiarowe)



Rys. 6.14. Zasada pomiaru ładunku (schemat ideowy tzw. wzmacniacza ładunku).

$C_p$  - zmienna pojemność przetwornika piezoelektrycznego,  
 $U_p$  - napięcie mierzone bezpośrednio na przetworniku (zmiennie), gdyż zmienna jest pojemność  $C_p$ ,  
 $C$  - kondensator wzorcowy,  
 $U$  - napięcie mierzone na kondensatorze wzorcowym po przeniesieniu nań ładunku przez wzmacniacz operacyjny