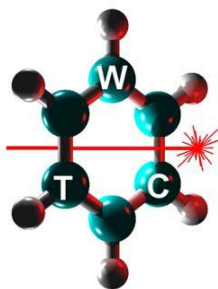


Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Nowych Technologii i Chemii
Katedra Zaawansowanych Materiałów
i Technologii



Ćwiczenie laboratoryjne z przedmiotu
Techniki wytwarzania 2

Temat: **Pomiar sił skrawania**

Wybór materiałów i opracowanie:

dr inż. Radosław Łyszkowski

Warszawa 2017r.

OPÓR SKRAWANIA

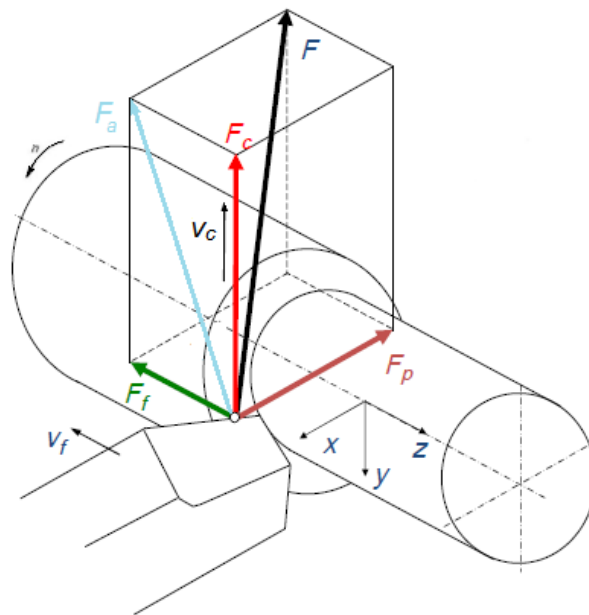
Podczas usuwania warstwy metalu z obrabianej części, ostrze narzędzia musi pokonać opór. Na opór ten składają się następujące siły:

- siła potrzebna do odkształcenia warstwy skrawanej (spęczenia),
- siła potrzebna do oddzielenia warstwy skrawanej od przedmiotu,
- siła potrzebna do odkształcenia wióra,
- siła tarcia między wiórem a powierzchnią natarcia narzędzia,
- siła tarcia między powierzchnią przyłożenia a materiałem obrabianym.

Siła potrzebna na pokonanie wszystkich wymienionych oporów jest **nazywana całkowitą siłą skrawania** i jest oznaczana literą F .

Składowe siły skrawania

Całkowita siła skrawania F , stanowiąca oddziaływanie części skrawającej narzędzia na część obrabianą, umiejscowiona jest w centralnym punkcie aktywnej części krawędzi skrawającej. Jej rzut na oś Z , daje wektor składowej F_c , zwany styczną, obwodową lub **główną siłą skrawania**, rzut na oś X daje wektor składowej F_f , zwany **posuwową siłą skrawania**, a rzut na oś Y daje wektor składowej F_p , zwany **odporową siłą skrawania**. Składowa styczna F_c wiąże się zwykle z wartością obciążenia napędu głównego, składowa posuwowa F_f z wartością obciążenia mechanizmu posuwu, a składową F_p można powiązać z ugięciem przedmiotu obrabianego. W zależności od kierunkach ruchu, wyróżniamy również siłę czynną F_a , będącą rzutem siły F na płaszczyznę boczną roboczą (pł. ruchu) oraz siłę roboczą F_e , jako rzut prostopadły siły F na kierunek ruchu wypadkowego. Poprzez rzutowanie siły F na inne płaszczyzny i kierunki, np. na płaszczyzny ostrza lub kierunek spływu wióra, ruchu narzędzia, itp., możliwe jest uzyskanie odpowiednich składowych w tych płaszczyznach lub kierunkach. Oznacza się je dwoma indeksami, z których pierwszy odnosi się do przecinającej płaszczyzny układu, a drugi do powierzchni ostrza.



Rys. 1. Siła skrawania F i jej składowe F_f , F_p , F_c .

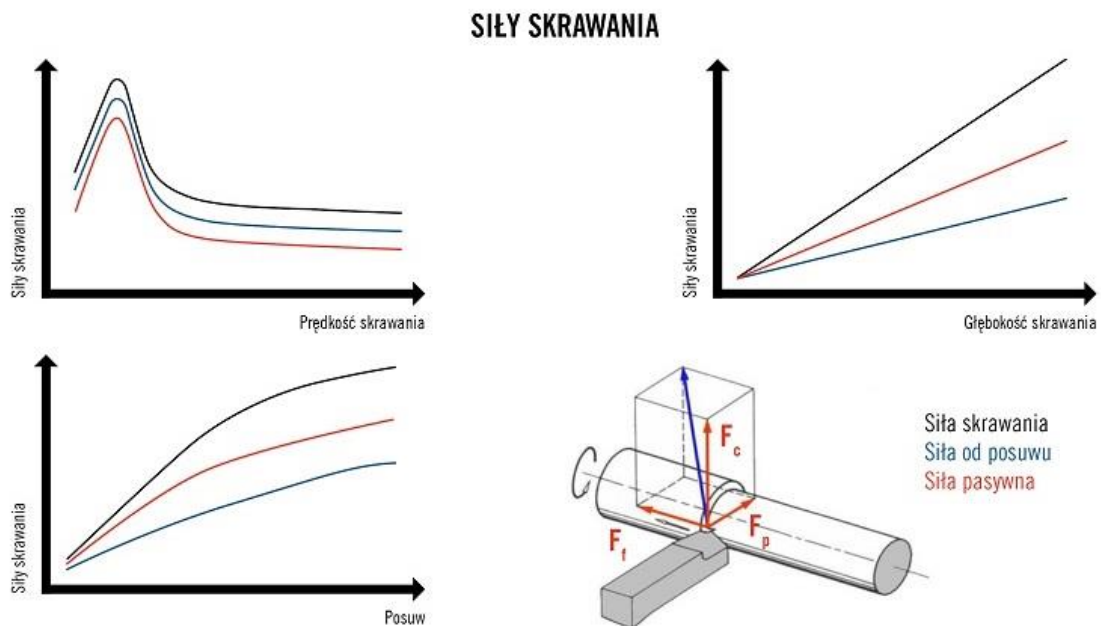
Uwzględniając powyższe rozważania można powiedzieć, że całkowita siła skrawania F w układzie kartezjańskim jest sumą geometryczną swych składowych:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

WPLYW SIŁ SKRAWANIA NA UKŁAD OBRABIARKA – NARZĘDZIE – PRZEDMIOT (ONP)

Od wartości składowych sił skrawania zależy obciążenie mechanizmów obrabiarki, takich jak wrzeciono, łożysko oporowe, prowadnice, mechanizm posuwowy itp. Ponadto siły składowe skrawania działają na uchwyt mocujący obrabianą część oraz narzędzie. Po wpływie tych składowych część obrabiana podlega zginaniu, przy maksimum występującym dla kąta przystawienia noża zbliżonego do zera, czyli gdy siła F_p jest największa. Przeciwnie, najmniejsze zginanie występuje przy kącie przystawienia równym 90° . Składowa F_p jest główną przyczyną drgań części obrabianej i narzędzia skrawania. Siły te powodują również odchylenie noża w kierunku przeciwnym do ruchu narzędzia oraz do dołu. Powoduje to powstawanie niedokładności wymiarowych obrabianego przedmiotu. Tak więc wymiary przekroju trzonka noża muszą być takie, by naprężenia powstałe na skutek jego zginania powstałymi siłami skrawania nie przekraczały dopuszczalnej strzałki ugięcia wierzchołka noża.

Największa spośród trzech składowych jest główna siła skrawania F_c , następna co do wartości - siła odporowa F_p , najmniejsza zaś - siła posuwowa F_f . Doświadczalnie stwierdzono, że wartości sił F_c , F_p i F_f zależą od własności mechanicznych materiału obrabianego, kąta skrawania δ , kąta przystawienia κ , promienia zaokrąglenia wierzchołka noża r_ϵ , pola i kształtu przekroju poprzecznego warstwy skrawanej oraz stanu krawędzi skrawającej. Własności materiału obrabianego mają bardzo duży wpływ na wartość głównej siły skrawania. Im większe są wskaźniki wytrzymałościowe charakteryzujące dany materiał, tym jest ona większa. Również parametry skrawania, jak głębokość skrawania czy posuw wywierają istotny wpływ na jej wartość. Spośród parametrów geometrycznych kąt przystawienia κ wywiera mały wpływ na główną siłę skrawania F_c , natomiast duży na składowe odporową F_p i posuwową F_f . Wzrost kąta natarcia γ prowadzi do spadku wypadkowych sił skrawania, a więc do ograniczenia zniekształcenia skrawanej warstwy. Wpływ pozostałych czynników, jak prędkość skrawania, kąty α i λ oraz środków i sposobów chłodzenia, jest nieznaczny.



Rys. 2. Wpływ parametrów obróbki na wartość sił skrawania.

Główna siła skrawania F_c

- powoduje ugięcie narzędzia poniżej osi.
- powoduje zmniejszenie kąta przyłożenia.

Siła odporowa, F_p ,

- wpływa na głębokość skrawania i grubość wiórów.
- odpowiada za nietrzymanie wymiarów i powstanie drgań.

Siła posuwowa, F_f

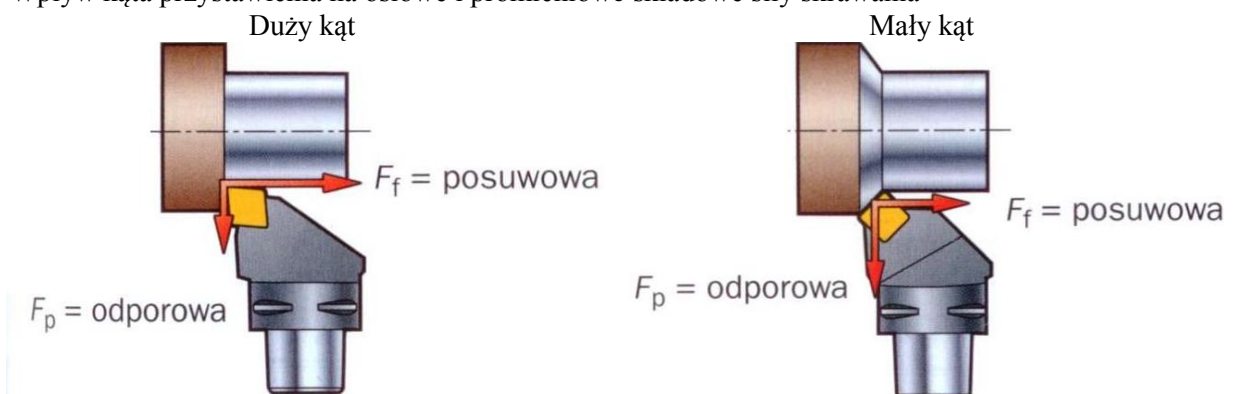
- przeciwdziała posuwowi narzędzia.

Należy więc zauważyć, że manipulacja głębokością skrawania, posuwem i prędkością wpływa w różny sposób na obciążenie narzędzia. Dwukrotne zwiększenie głębokości skrawania podwaja siłę skrawania, a jednocześnie także długość krawędzi skrawającej. W związku z tym obciążenie pozostaje bez zmian w stosunku do jednostki długości krawędzi skrawania. Siły skrawania rosną w sposób nieliniowy wraz ze wzrostem prędkości posuwu. Wyższe prędkości posuwu nie podnoszą sił skrawania tak szybko, jak głębokość skrawania, ponieważ wyższy posuw zwiększa grubość wióra, a nie długość narzędzia podczas skrawania. Prowadzi to do znacznie wyższych obciążeń krawędzi skrawającej.

W przypadku podnoszenia prędkości skrawania siły pozostają generalnie bez zmian, rośnie jednak zapotrzebowanie na moc, zgodnie z podstawowym równaniem mechaniki, definiującym pobór mocy jako iloczyn siły i prędkości. Badania praktyczne pokazują wzrost sił skrawania przy niższych prędkościach skrawania i ich spadek przy wyższych prędkościach. Wzrost sił skrawania przy niższych prędkościach może wynikać z pojawienia się narostów na krawędzi, które same w sobie stanowią wskaźnik nieprawidłowych sił skrawania.

Można więc stwierdzić, że wyższy posuw i głębokość skrawania w połączeniu z niskimi i średnimi prędkościami skrawania oferuje potencjalnie najwyższy poziom bezpieczeństwa i niezawodności obróbki. Natomiast wyższe prędkości skrawania, przy zachowaniu niskiej głębokości skrawania i posuwu w celu ograniczenia sił skrawania, mogą zapewnić wyższą produktywność.

Wpływ kąta przystawienia na osiowe i promieniowe składowe siły skrawania



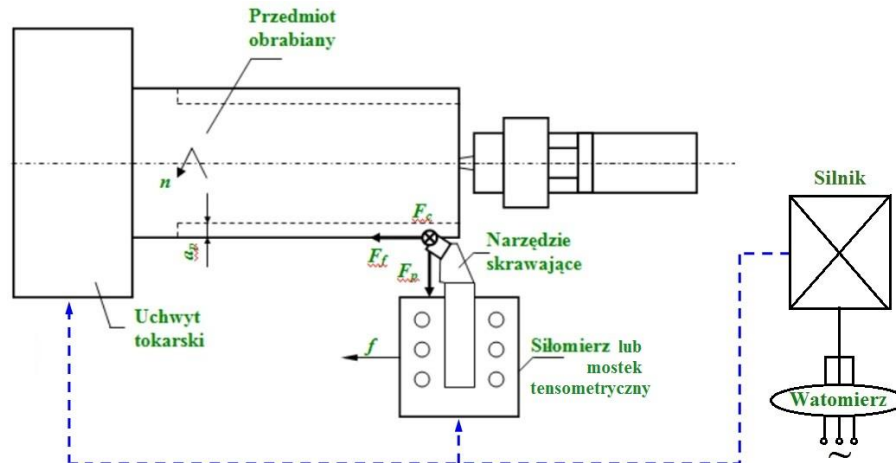
- Wypadkowa siła skrawania skierowana jest w stronę uchwytu, co zmniejsza tendencje do powstawania drgań.
- Siły skrawania są większe, szczególnie przy wejściu i wyjściu z materiału.
- Siły skrawania są skierowane osiowo i promieniowo, co powoduje wzrost tendencji do powstawania drgań.
- Mniejsze obciążenie krawędzi skrawającej, a więc większa trwałość narzędzia.

METODY POMIARU SIŁ SKRAWANIA

Układ do pomiar sił skrawania składa się zwykle z trzech członów:

- czujnika o dużej czułość, małej bezwładność, braku histerezy i prostoliniowej charakterystyce,
- układu pośredniczącego, którego głównym zadaniem jest wzmacnienie sygnałów w odpowiednim zakresie regulacji i liniowej charakterystyce przenoszenia,
- miernika o małej bezwładności, małej histerezie i łatwości odczytu .

Składowe siły skrawania mogą być wyznaczone pośrednio lub bezpośrednio.



Rys. 3. Ogólny schemat stanowiska do pomiaru sił skrawania.

Pośrednio główną siłę skrawania F_c (dla ustalonych parametrów skrawania) można obliczyć na podstawie mocy pobieranej z sieci przez silnik obrabiarki. Metoda polega na pomiarze przy pomocy watomierza podłączonego w układzie Arona, mocy pobieranej z sieci przez obrabiarkę na biegu luzem i pod obciążeniem w czasie skrawania. Jest to bardzo prosta metoda, nie wymagająca użycia specjalnych urządzeń. Jej wadę stanowi trudność dokładnego wyznaczenia sprawności silnika i obrabiarki w konkretnych warunkach pomiaru. Problem ten pokonujemy dokonując porównywalnych pomiarów przy zainstalowanym na obrabiarce hamulcu klockowym. Moc silnika obrabiarki można obliczyć wg wzoru

$$P_{siln} = \frac{I \cdot U}{1000} \cdot \eta_{sil} \quad [\text{N}]$$

Zależności momentu na wrzecionie od mocy jest w przybliżeniu prostoliniowa i zależy od nominalnej prędkości obrotowej. Siłę skrawania z metody mocy liczy się według wzoru

$$F_c = \frac{2M_{WR}}{D_s} = \frac{60 I \cdot U \cdot \eta_{obr} \cdot \eta_{siln}}{v_c} \quad [\text{N}]$$

gdzie: I - prąd w A,

U - napięcie w V,

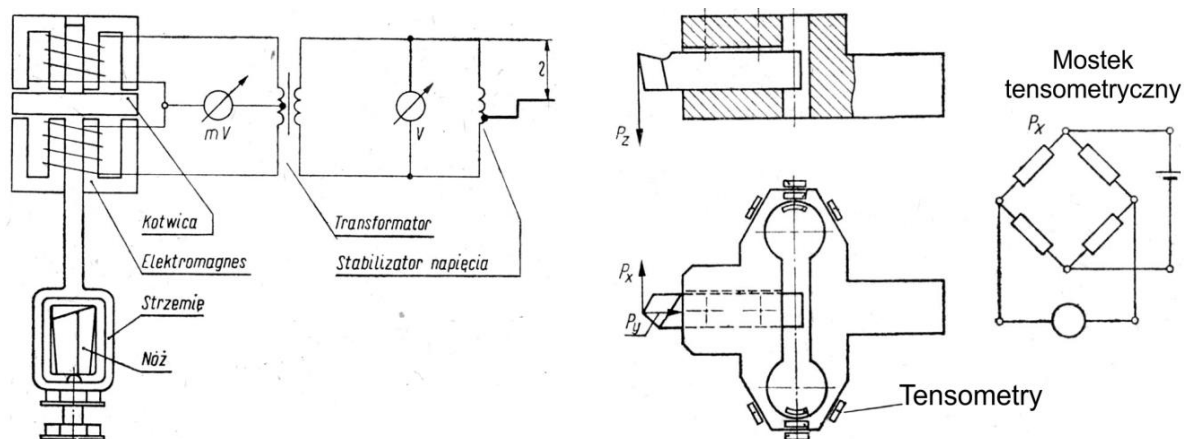
η_{siln} - sprawność silnika,

η_{obr} - sprawność obrabiarki,

v_c - prędkość skrawania w m/min,

D_s - średnia średnica toczenia w m.

Bezpośrednio składowe siły skrawania mierzy się siłomierzami. W czasie toczenia na nóż działa materiał obrabiany siłą nazywaną *oporem skrawania*, równą co do wielkości i kierunku sile skrawania, ale o przeciwnym zwrocie. Siła ta powoduje ugięcie noża tokarskiego, które można mierzyć. Metoda bezpośrednia polega na przyjęciu zasady, że chwilowa wartość odkształcenia sprężystego, jest wprost proporcjonalna do chwilowej wartości siły działającej na element sprężysty, np. nóż. Siłomierze ze względu na zasadę działania można podzielić na: *mechaniczne, hydrauliczne, elektryczne, pneumatyczne*. Pomiar siłomierzami wymaga wzorcowania układu pomiarowego.



Rys. 4. Schemat siłomierza elektromagnetycznego (a) i tensometrycznego (b).

Pomiar siły skrawania **siłomierzem elektromagnetycznym** polega na rejestrowaniu zmian indukcji magnetycznej spowodowanych zmianą wielkości szczeliny między elektromagnesem i kotwicą połączoną z nożem tokarskim.

Siłomierze tensometryczne, nazywane powszechnie tensometrami, umożliwiają pomiar trzech składowych siły skrawania, tj. F_c , F_t i F_p . Wykonane są z drutu metalowego (najczęściej konstantan) lub z warstwy półprzewodnika inkludowanego w masie papierowej lub folii celuloidowej. Do pomiaru wykorzystuje się zmianę rezystancji drutu lub warstwy, wywołanej naprężeniami sprężystymi powstałymi pod wpływem działających sił. Czujniki tensometryczne są bardzo małe, dzięki czemu można je umieszczać w miejscach trudno dostępnych. Mają one przeważnie formę cienkiego paska, przyklejanego do odkształcanego elementu sprężystego, które włącza się w obwód pomiarowy układu elektrycznego. Drugą zaletą stanowi fakt, że składowe siły skrawania można mierzyć w warunkach odpowiadających normalnej pracy narzędzia.



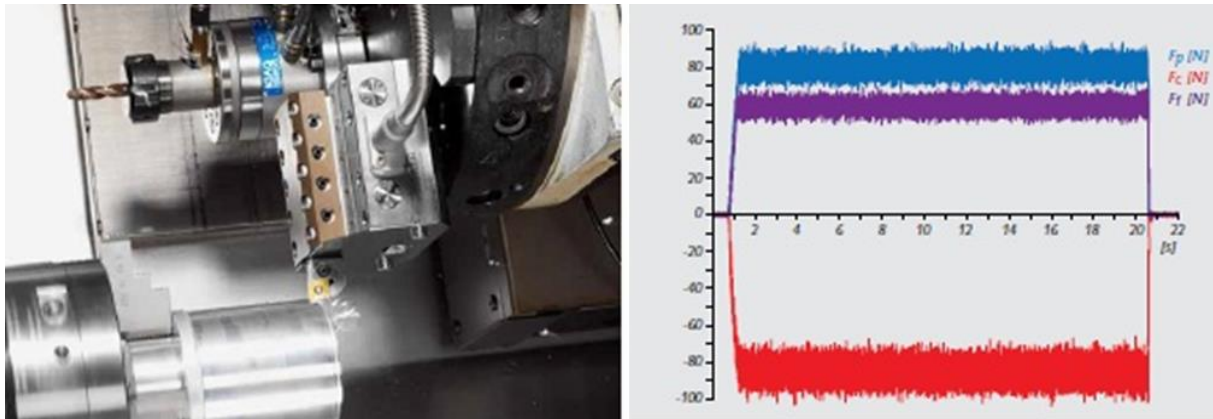
Rys. 5. Tensometryczne układy pomiarowe: a – pojedynczy tensometr foliowy, b – belka pomiarowa, c - system pomiarowy rozkładu ciśnienia chwytu dłoni.

W celu oceny ugięcia noża tokarskiego pod wpływem sił skrawania, na trzonku noża naklejamy tensometry. Po włączeniu ich w układ mostka pozwalają na pomiar powstałych odkształceń, które są proporcjonalne do wartości siły skrawania. Siłomierz tensometryczny wymaga więc wzorcowania układu pomiarowego i określenia zależności pomiędzy siłą i odkształceniem. Moment zginający nóż zależy od ramienia działania siły równego wysięgowi noża, pomniejszonemu o połowę głębokości skrawania g . W obliczeniach trzeba uwzględnić

również współczynnik poprawkowy ze względu na stałą głębokość wzorcowania k_g . Znajomość równania wzorcowania pozwala na określenie siły skrawania w czasie toczenia na podstawie pomiaru odkształceń noża tokarskiego

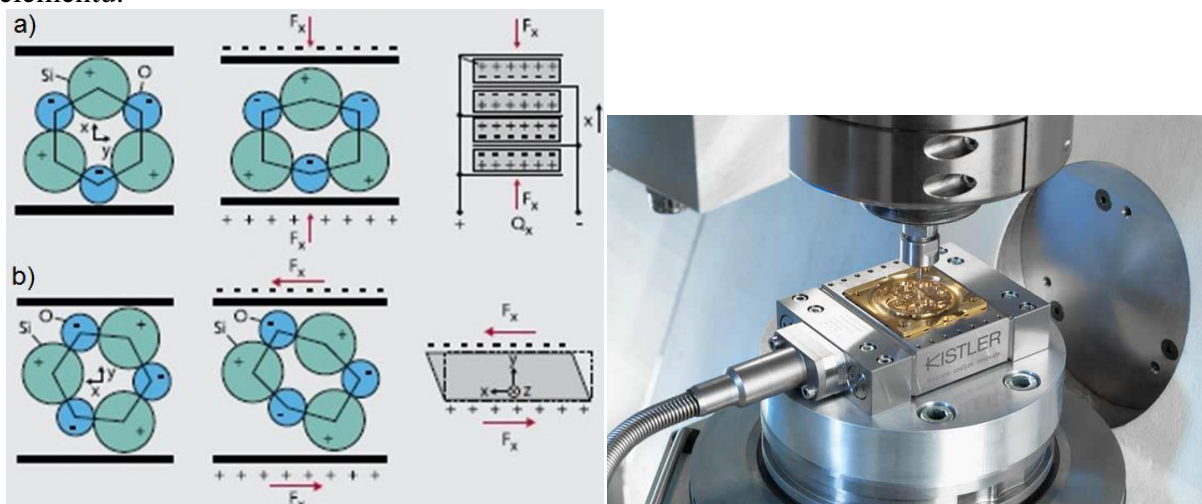
$$F_c = k_g(a + b\varepsilon) \quad [\text{N}]$$

gdzie a, b – współczynniki równania wzorcowania
 ε - odkształcenie noża w %.



Rys. 6. Pomiar sił skrawania na tokarce za pomocą siłomierza.

Siłomierze piezoelektryczne to czujniki wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne dla przetworzenia zmian kształtu lub sił nań działających na napięcie elektryczne. Znajduje zastosowanie w układach pomiaru sił, ciśnienia, prędkości i drgań. Działanie opiera on się na zjawisku piezoelektrycznym, gdzie w skutek działania sił zawiernych dochodzi do generowania ładunku elektrycznego na ściankach kryształu lub do zmiany jego znaku na przeciwny w przypadku odkształcenia. Siły działające na kwarcowy element kryształowy są przekształcane w ładunek elektryczny w sposób proporcjonalny. Wielkość generowanego ładunku elektrycznego zależy wyłącznie od siły przyłożonej, a nie od wymiarów dysków kryształowych. Odkształcenie liniowe elementu piezoelektrycznego wynosi zaledwie kilka tysięcznych części milimetra przy jednocześnie bardzo dużym zakresie pomiarowym takiego elementu.



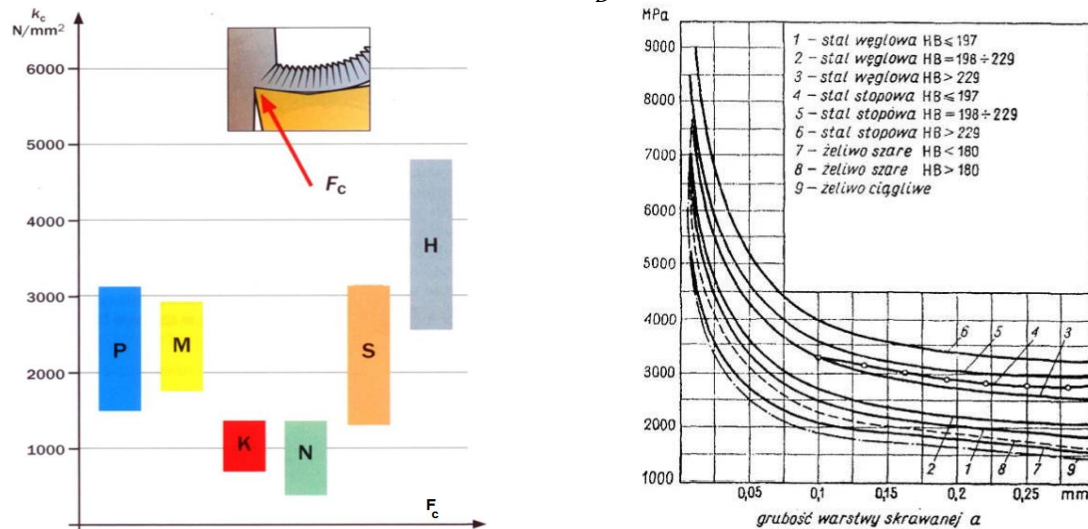
Rys. 7. Zasada działania siłomierza piezoelektrycznego: a - orientacja wzdłużna do pomiaru siły ściskającej, b - orientacja skośna do pomiaru sił ścinających, c - układ pomiarowy.

Natomiast stosowane jeszcze niekiedy siłomierze pojemnościowe, hydrauliczne czy piezoelektryczne są uznane za przestarzałe i wypierane przez bardziej nowoczesne urządzenia.

OBLICZENIA SIŁY SKRAWANIA DZIAŁAJĄCA NA KRAWĘDŹ SKRAWAJĄCĄ

Jak wiemy, siła skrawania (F_c) to siła wymagana do odcięcia wióra o określonym przekroju poprzecznym, w określonych warunkach. Wartość ta służy do wyliczenia poboru mocy niezbędnej do obróbki i silnie zależy od oporów skrawania. Stosunek głównej siły skrawania do nominalnego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej A_D nazywamy **oporem właściwym skrawania** (k_p)

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [\text{MPa}]$$



Rys. 8. Opór właściwy głównych grup materiałowych: P – stale, M – stale i stopy austenityczne, K – żeliwa, N – stopy nieżelazne, S – stale i stopy żarowytrzymałe oraz H - stale w stanie umocnionym (hartowanie).

Przy nie zmienionych parametrach i warunkach obróbki opór ten nie ma stałej wartości i jest tym większy, im mniejszy jest przekrój poprzeczny warstwy skrawanej. Zatem główna siła skrawania F_c jest również stosunkowo większa przy mniejszych przekrojach niż przy przekrojach większych.

W praktyce siły skrawania oblicza się stosując wzory doświadczalne, które uwzględniają warunki toczenia:

$$F_c = C \cdot a_p^{e_c} \cdot f^{u_c} \cdot k_c$$

lub jego uproszczenia

$$F_c = A_D \cdot k_c = a_p \cdot f \cdot k_c$$

gdzie: C – stała charakteryzująca wpływ materiału obrabianego, kąta przyłożenia i innych czynników na wartości sił skrawania, a_p – głębokość skrawania, f – posuw, e_c , u_c – wykładniki potęgowe uwzględniające wpływ a_p i f na wartości sił skrawania.

Natomiast pozostałe składowe siły F_f i F_p oblicza się ze związków

$$\frac{F_p}{F_c} = 0.4 \div 0.6 \quad \text{oraz} \quad \frac{F_f}{F_c} = 0.25 \div 0.3$$

Po podstawieniu składowych siły F_p i F_f do wzoru można obliczyć całkowitą siłę skrawania jako funkcję siły skrawania F_c . W normalnych warunkach skrawania stali z posuwem wzdłużnym przy niestępionej krawędzi skrawającej można przyjąć, że:

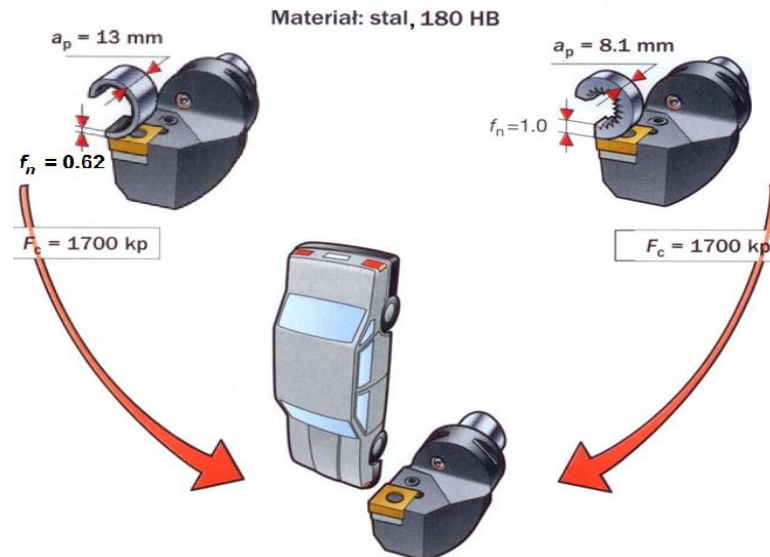
$$F_p = (0.3 \div 0.5) F_c$$

$$F_f = (0.15 \div 0.3) F_c$$

$$F = (1.1 \div 1.15) F_c$$

Wynika z tego, że wypadkowa siła skrawania jest co do wartości niewiele większa od siły obwodowej.

Aby uświadomić sobie, jak duża siła działa na krawędź skrawającą podczas obróbki, prześledźmy następujący przykład. Węgiel spiekany charakteryzuje się dużą wytrzymałością na ściskanie i przy dobrym podparciu płytki, nie łamie się on nawet pod wpływem dużych sił skrawania. Przyjmijmy, że materiał skrawany to stal typu CMC 02.1 o twardości 180 HB dla której $k_c = 2100 \text{ N/mm}^2$. Obliczmy wartość siły F_c dla dwu porównywalnych wariantów parametrów skrawania, a mianowicie głębokości skrawania $a_p = 13$ i 8.1 mm oraz posuwów $f_n = 0.62$ i 1.0 mm, odpowiednio.



Rys. 9. Obciążenie krawędzi skrawającej noża siłą obwodową.

$$F_c = k_c \times a_p \times f_n = 2100 \times 13 \times 0.62 = 17000 \text{ N}$$

oraz

$$F_c = 2100 \times 8.1 \times 1.0 = 17010 \text{ N}$$

Siła styczna działająca w przedstawionych przypadkach wynosi ok. 17000 N i jest porównywalna z ciężarem dużego samochodu osobowego.

Moc skrawania, to moc dostarczana przez silnik obrabiarki do noża. Możemy przedstawić ją jako sumę trzech składowych mocy: głównej P_c , promieniowej P_p i posuwowej P_f

$$P_e = P_c + P_p + P_f$$

gdzie

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 1000} \text{ [kW]}$$

Podobnie również dla P_p i P_f .

W toczeniu wzdłużnym, prędkość obwodowa $v_p = 0$, wobec tego i moc $P_p = 0$. Analogicznie, w toczeniu poprzecznym $v_f = 0$, więc moc $P_f = 0$.

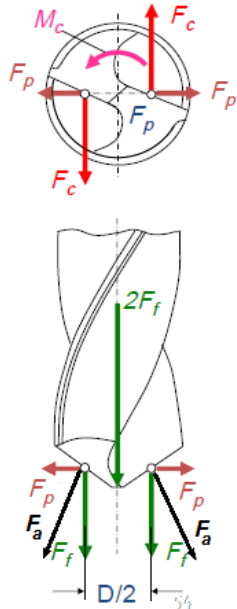
Moc obwodowa nazywana jest mocą główną. Moc posuwowa jak i odporowa są tak małe, że często w obliczeniach mocy całkowitej pomijamy je. Stąd można przyjąć, że:

$$P_e = P_c$$

Tak więc, zapotrzebowanie na moc zależy praktycznie od obwodowej siły skrawania i od prędkości skrawania v_c . Jeżeli opory skrawania, zależnie od własności materiału i od przekroju warstwy skrawanej są duże, to można zmniejszyć zapotrzebowanie mocy przez zmniejszenie prędkości skrawania. W przeciwnym przypadku, w celu wykorzystania mocy obrabiarki można zwiększyć prędkość skrawania. Jednak nadmierne jej zwiększenie może powodować szybkie zniszczenie narzędzia wskutek przyspieszonego zużycia się ostrza.

SIŁY I MOC SKRAWANIA PODCZAS WIERCENIA

W przypadku obróbek takich jak wiercenie i pochodnych, przedstawiony dla toczenia układ sił ulega ograniczeniu, a wypadkowa F siły skrawania działająca na ostrza narzędzia może być rozłożona na składową poziomą F_c i prostopadłą do krawędzi skrawającej w płaszczyźnie pionowej F_a . Składowa F_a może być rozłożona na dwie składowe:



$$F_a^2 = F_f^2 + F_p^2$$

Siła skrawania F_c jest to siła oporu materiału przeciwdziałająca obracaniu się wiertła dookoła swej osi. Siła ta daje moment skrawania. Siła F_f jest to siła oporu materiału przeciwdziałająca wgłębianiu się weń wiertła. Działa ona wzdłuż osi wiertła. Dla narzędzi dwu-ostrzowych jakimi są wiertła, wyniesie ona w sumie $2 F_f$. Siła promieniowej F_p działającej na jedną krawędź odpowiada równa co do wartości, ale odwrotnie zwrócona siła F_p działająca na drugą krawędź. Siły te równoważą się.

$$\text{Ponieważ} \quad F_f = F_a \cdot \sin \kappa$$

to ze wzrostem kąta wierzchołkowego wiertła (2κ) wzrasta siła posuwowa F_t . Siły: $2F_f$ (działająca na główne krawędzie skrawające) oraz F_{scin} (działająca na ścin) tworzą wypadkową F_{pos} , nazywaną siłą posuwową lub siłą osiową. Siła F_c daje moment skrawania

$$M_c = \frac{F_c \cdot d}{2 \cdot 1000} \quad [\text{Nm}]$$

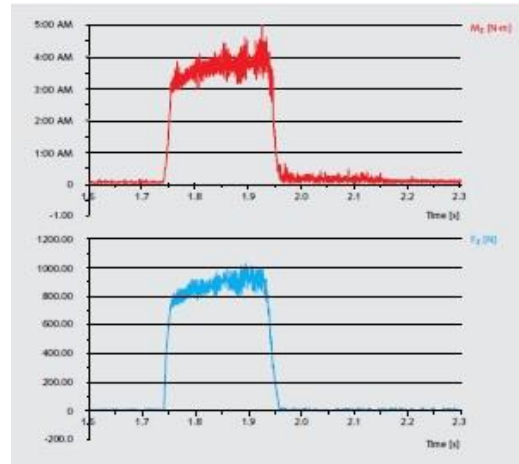
Moment skrawania jest pokonywany przez moment przenoszony od silnika na wrzeciono obrabiarki.

Do pomiaru sił i momentów występujących podczas wiercenia używa się najczęściej siłomierzy elektrooporowych (tensometrycznych), działających na tych samych zasadach co przyrządy stosowane do pomiaru sił skrawania podczas toczenia.

Czynniki wpływające na wartość oporu skrawania

Moment skrawania i siła osiowa przy wierceniu zależą od:

1. Własności materiału obrabianego - największy wpływ na wartość momentu skrawania i siły osiowej wywierają wytrzymałość na rozciąganie i twardość obrabianego materiału. Wpływ ten uwzględnia się stosując odpowiednie współczynniki poprawkowe.
2. Głębokości skrawania a_p i posuwu - zwiększenie średnicy wiertła oraz posuwu powoduje wzrost przekroju warstwy skrawanej, a tym samym wzrost siły osiowej i momentu. Wzrost momentu jest większy niż siły osiowej, ponieważ ze zmianą średnicy wiertła zmienia się również ramię pary sił F_c .
3. Długości poprzecznej krawędzi skrawającej - kąt natarcia poprzecznej krawędzi skrawającej (ściny) jest ujemny i wynosi do -60° . Wskutek tego krawędź ta nie skrawa, lecz skrobie, a w części środkowej - gniece materiał, gdyż prędkość skrawania maleje tu do zera. Powoduje to znaczny wzrost siły skrawania.
4. Kąta wierzchołkowego 2κ - przy wierceniu, podobnie jak przy toczeniu, wartość kąta κ wpływa na wartości składowych F_c oraz F_f . Przy zmniejszaniu kąta wierzchołkowego 2κ siła osiowa maleje, a moment wzrasta.
5. Kąta λ pochylenia linii śrubowej rowków wiórowych - wzrost kąta λ powoduje wzrost kąta natarcia, co ułatwiają proces skrawania i tworzenia wióra. Jednocześnie jego wzrost powoduje zmniejszenie siły osiowej i momentu skrawania.
6. Rodzaju cieczy smarująco-chłodzącej - użycie dobrych cieczy, takich jak oleje mineralne aktywowane związkami siarki powoduje zmniejszenie siły osiowej i momentu o 30-35%.



Rys. 10. Dynamometr obrotowy firmy Kistler oraz typowy zapis pomiaru.

Obliczanie siły posuwowej, momentu obrotowego i poboru mocy

Wartość siły osiowej jak i momentu obrotowego nie powinna przekraczać wartości dopuszczalnych ze względu na wytrzymałość mechanizmu posuwowego wiertarki i wytrzymałość wiertła.

Siłę osiową i moment skrawania przy wierceniu w materiale pełnym obliczamy ze wzorów:

$$F_f = C_f \cdot d^{z_f} \cdot f_n^{u_f} \cdot K_m \quad [\text{N}]$$

$$M_c = C_m \cdot d^{z_m} \cdot f_n^{u_m} \cdot K_m \quad [\text{Nm}]$$

Można również skorzystać z wzorów uproszczonych:

$$F_f \approx 0.5 \times k_c \times \frac{D_c}{2} f_n \times \sin K_r \quad (\text{N}) \quad M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n} \quad (\text{Nm})$$

gdzie: C_f, C_m - stałe zależne od warunków obróbki,

d, D_c - średnica wiertła w mm,

f_n - posuw w mm/obr,

n - prędkość obrotowa wrzeciona (obr/min)

z_f, u_b, z_m, u_m - wykładniki zależne od warunków obróbki,

K_m - współczynnik poprawkowy zależny od własności mechanicznych materiału obrabianego,

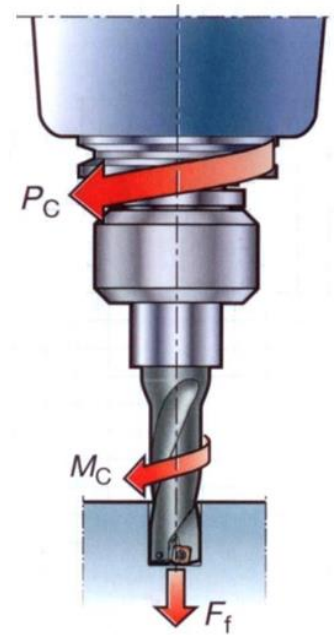
Moc skrawania wyznaczamy na podstawie zależności:

$$P_c = \frac{M_c \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot 1000} = \frac{M_c \cdot n}{9555} \quad [\text{kW}]$$

$$P_c = \frac{f_n \times v_c \times D_c \times k_{c1}}{240 \times 10^3} \quad \text{kW}$$

lub

ISO	CMC No.	Material	Specific cutting force	Hardness	m_c	
			k_c 1	Brinell		
			N/mm ²	HB		
P		Steel				
		Unalloyed				
	01.1	C = 0.1–0.25%	1500	125	0.25	
	01.2	C = 0.25–0.55%	1600	150	0.25	
	01.3	C = 0.55–0.80%	1700	170	0.25	
	01.4	High carbon steel, annealed	1800	210	0.25	
	01.5	Hardened and tempered	2000	300	0.25	
		Low alloyed (alloying elements ≤ 5%)				
	02.1	Non-hardened	1700	175	0.25	
	02.2	Hardened and tempered	1900	300	0.25	



Rys. 11. Fragment tabeli współczynników do obliczeń mocy skrawania przy wierceniu, wg katalogu firmy Sandvik.

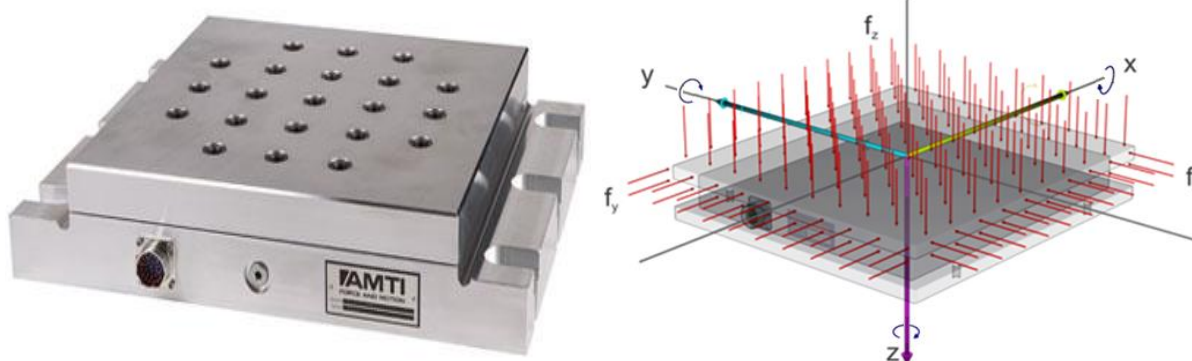
UKŁAD POMIAROWY

System pomiarowy składa się z płyty pomiarowej, wzmacniacza, przewodów i oprogramowanie akwizycji danych. Dzięki dużej sztywności, wysokiej czułości, niskim przesłuchuchom kanałów, doskonałej powtarzalnością i stabilnością urządzenia te wykorzystuje się do statycznych i dynamicznych badań materiałów, oprzyrządowania maszyn, w tribologii, symulacji trzęsienia ziemi. W przemyśle lotniczym do pomiarów w tunelach aerodynamicznych, badań konstrukcji podwozia, ergonomii i skuteczności działania podzespołów. W przemyśle samochodowym do badania dynamiki i aerodynamiki pojazdu, wydajność ogumienia i oprzyrządowania pojazdów oraz w crash-testach. W biomechanice do badań ortopedycznych i wydajności organizmów. Ponadto do badania wydajności i optymalizacji procesów, a także monitorowania zużycia.



Rys. 12. Układ pomiaru sił i momentów firmy AMTI.

Sercem układu jest płyta pomiarowa, przeznaczona do pomiaru sił i momentów przyłożonych do jej górnej powierzchni. Urządzenie rejestruje trzy składowe siły F_x , F_y i F_z , które są zgodne z osiami xyz ortogonalnego układu współrzędnych. F_x i F_y są składowymi poziomymi związanymi z występowaniem sił ścinających, a F_z jest składową pionową. Natomiast M_x , M_y i M_z są trzema składowymi momentu siły wokół odpowiednich osi. Na schemacie, zgodnie z regułą prawej dłoni, strzałki wskazują dodatnie kierunki działania siły i momentów.



Rys. 13. Płyta pomiarowa AMTI wraz ze schematem orientacji sił i momentów.

Urządzenie do pomiarów wykorzystuje cienkościenne czujniki tensometryczne. W zależności od rozwiązania, płyta może być wyposażona w do 400 takich elementów, zapewniających uzyskanie dokładność pozycjonowania do 0.005 mm. Każdy z nich składa się z cylindrycznego czujnika naprężeń, który jest wzbudzany przez stało-napięciowy sygnał kondycjonujący.

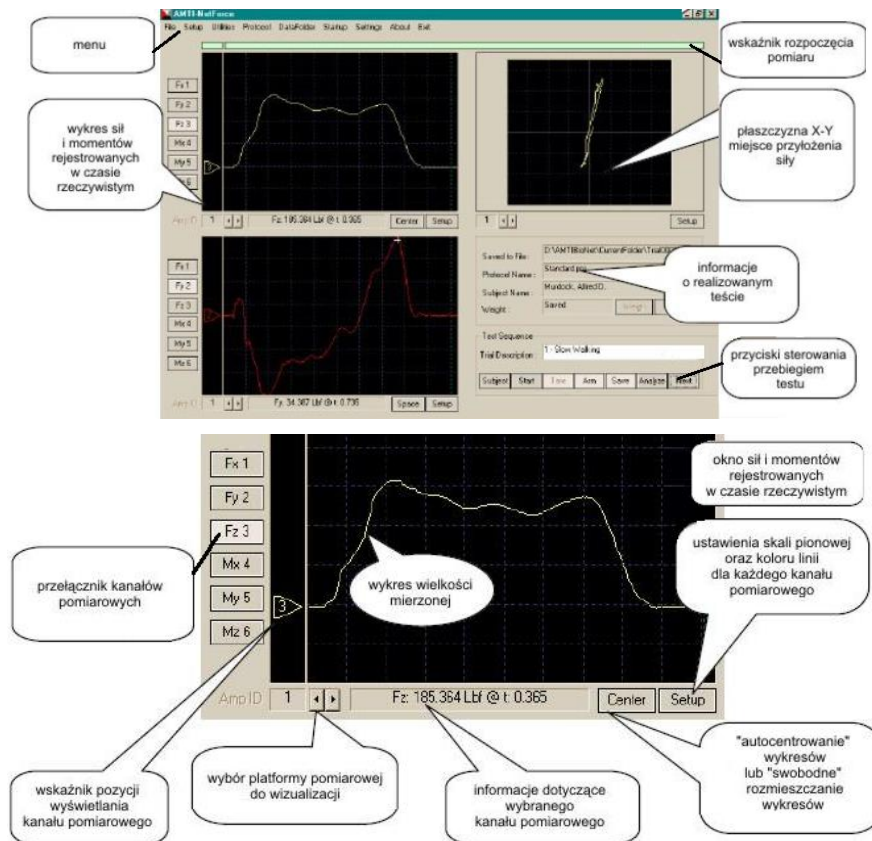
Gdy obciążenie zewnętrzne działa na powierzchnię roboczą przetwornika, wówczas w ścianach cylindrów nośnych generowane jest odkształcenie. Powoduje to zmianę rezystancji czujników naprężeń, a za razem zmianę napięcia wyjściowego, które jest proporcjonalne do wartości tej siły. Kondycjoner (wzmacniacz) sygnału zapewnia odpowiednie wzbudzenie napięciowe elementów tensometru. Następnie wzmacnia i warunkuje sygnał wyjścia, odpowiedni dla systemu komputerowego. Urządzenie jest podłączone do kondycjonera przez

podwójnie ekranowany przewód, co gwarantuje możliwie najwyższą odporności na zakłócenia (przesłuchuchy).

Zastosowany przetwornik AMTI Gen 5 jest sześciokanałowym wzmacniaczem sygnału tensometrycznego do stosowania z platformami siłowymi oraz wieloskładnikowymi przetwornikami siły i momentu obrotowego. Rejestrowane obciążenie jest rozkładane na sześć składowych, trzy związane z siłą oraz trzy związane z momentem obrotowym. Gen 5 wzmacnia sygnały pochodzące z kanałów do których dostarcza napięcie pobudzające zestawy mostków tensometrycznych znajdujących się w platformie. W rezultacie powstaje niskie napięcie wyjściowe proporcjonalne do danej składowej przyłożonego obciążenia mechanicznego. Ten prąd wyjściowy jest wzmacniany, filtrowany, a następnie okresowo próbkowany. Powstające sygnały tworzą analogowy i cyfrowy strumień danych.



Cyfrowy strumień danych wyjściowych może zawierać 6 lub 8 kanałów danych: po 3 składowe przyłożonych sił (F_x , F_y , F_z) i momentów obrotowych (M_x , M_y , M_z) oraz opcjonalnie dwa kanały informujące o stanie urządzenia i liczbie zestawów danych.



Rys. 14. Okna programu AMTI NetForce.

Natomiast każdy z 6 kanałów analogowych posiada niezależny 16 bitowy konwerter cyfrowo-analogowy (DAC) zapewnia sygnał o częstotliwości 2 kHz i napięciu ± 5 V. Gen 5 posiada cztery ustawienia wzmocnienia sygnału, zapewniające optymalną rozdzielczość.

Program Gen 5 Setup służy do koordynowania oraz konfigurowania wzmacniaczy. Oprogramowanie AMTI NetForce przeznaczone jest do rejestracji danych z jednej lub kilku wielosiowych platform siłowych lub czujników siły. Zbiera ono dane z kanałów w czasie rzeczywistym, a następnie eksportuje je w formacie AMTI lub ASCII (możliwy do importu przez program Excel).

WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Wymagane wiadomości

- a) Siły działające na ostrze skrawające,
- b) Metody pomiaru sił skrawania:
 - Zrównoważenie siły ciężarem,
 - Pomiar momentu skrawania,
 - Pomiar zapotrzebowania mocy,
 - Pomiar wywołanych odkształceń sprężystych,
 - Pomiar wywołanych odkształceń plastycznych,
- c) Ogólna charakterystyka układu pomiarowego do pomiaru sił skrawania,
- d) Czujniki pomiarowe stosowane w pomiarach sił skrawania:

Parametryczne:	Generacyjne:
– Pneumatyczne,	– Mechaniczne,
– Tensometryczne,	– Hydrauliczne,
– Indukcyjne,	– Piezoelektryczne,
– Pojemnościowe,	– Elektrodynamiczne,
– Magnetyczne,	– Elektromagnetyczne,
– Fotoelektryczne,	– Termoelektryczne;
- e) Pośrednie układy pomiarowe w pomiarach sił skrawania,
- f) Mierniki i rejestratory pomiarowe.

2. Literatura

- M. Gabrylewski: *Mechaniczna Technologia Metali*, WAT, Warszawa 1995.
- W. Brodowicz: *Skrawanie i narzędzia*, WSzIP, Warszawa 1989.
- Poradnik Inżyniera: *Obróbka skrawaniem*, Tom I.
- W. Grzesik: *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, WNT, Warszawa 1998.
- K. Jemielniak: *Obróbka skrawaniem*, Oficyna Wyd. Polit. Warszawskiej 2012.
- Materiały reklamowe firmy AMTI.
- Materiały reklamowe firmy Sandvik.
- Materiały reklamowe firmy Kistler.

3. Przebieg ćwiczenia

- Sprawdzenie wiedzy teoretycznej,
- Omówienie zagadnień związanych z pomiarem sił skrawania,
- Omówienie budowy i działania stanowiska pomiarowego,
- Pomiary sił skrawania,
- Omówienie i podsumowanie przebiegu zajęć.

W zależności od aktualnych możliwości sprzętowych, ćwiczenie realizowane jest przy pomocy tensometrycznego układu pomiarowego (toczenie) lub piezoelektrycznej płyty pomiarowej (toczenie lub wiercenie). Parametry procesu podaje prowadzący zajęcia.

4. Sprawozdanie wg załączonego druku. W sprawozdaniu zawrzeć:

- a) Wykres zmian siły posuwowej skrawania (wszystkich prób) z zaznaczoną linią średnią przy stabilnym etapie wiercenia (przebiegi uzyskane dla jednej średnicy wiertła umieścić na jednym wykresie).
- b) Uzupełnić tabelę z obliczonymi teoretycznie i uzyskanymi doświadczalnie wartościami sił posuwowych F_f i momentów M_c .
- c) Wykres słupkowy obrazujący wpływ wartości posuwu na siłę posuwową F_f i moment skrawania M_c .
- d) Wykres słupkowy obrazujący wpływ prędkości skrawania na siłę posuwową F_f i moment M_c .
- e) Analizę zamieszczonych wykresów.



Wydział Nowych Technologii i Chemii
Katedra Zaawansowanych Materiałów
i Technologii

Sprawozdanie z ćwiczenia laboratoryjnego z przedmiotu
Techniki wytwarzania 2

Temat: **Pomiar sił skrawania**

Wykonali:

Grupa:

Data:

Ocena:

1. Warunki wiercenia:

Wiertło kręte: **NWka**
Materiał ostrza: stal szybko tnąca **HS 6-5-2**
Średnica wiertła: **Ø6mm, Ø8mm, Ø10mm**
Zużycie ostrza: **VB (h_p) < 0,5mm** (szerokość starcia powierzchni przyłożenia)
Materiał obrabiany: **AW-2017A (PA6) o R_m = 380 MPa, HB = 95**

2. Stanowisko pomiarowe:

Obrabiarka: uniwersalna wiertarko-frezarka **FP-48SP**
Układ pomiarowy: platforma **AMTI MC6**

3. Pomiary w próbach wiercenia:

Obrotów nominalne wrzeciona: **n = obr/min**

d [mm]	f [mm/obr]	V _c [m/min]	F _{f-śred}		M _{c-śred}	
			doświadczalna	obliczona	doświadczalna	obliczona
Ø6	0,06					
Ø6	0,20					
Ø6	0,36					
Ø8	0,06					
Ø8	0,20					
Ø8	0,36					
Ø10	0,06					
Ø10	0,20					
Ø10	0,36					

4. Obliczenia:

Prędkość skrawania obliczyć wg wzoru:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \left[\frac{m}{min} \right]$$

Teoretyczną posuwową siłę skrawania F_f i moment skrawania M_c obliczyć wg wzorów:

$$F_f = C_f \cdot d^{Z_f} \cdot f^{U_f} \cdot K_m \quad [N]$$

gdzie: $C_f = 600$; $Z_f = 1,0$; $U_f = 0,8$; $K_m = \left(\frac{HB}{95} \right)^{0,6}$

$$M_c = C_m \cdot d^{Z_m} \cdot f^{U_m} \cdot K_m \quad [Nm]$$

gdzie: $C_m = 230$; $Z_m = 1,9$; $U_m = 0,8$; K_m jak wyżej.