

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Platforma pomiarowa do wyznaczania oporów skrawania

GRZEGORZ SKORULSKI
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

Słowa kluczowe: siły skrawania, pomiary, platforma pomiarowa

STRESZCZENIE

W pracy pokazano na konkretnych przykładach metodę pomiaru składowych sił skrawania dla toczenia i wiercenia. W pomiarach wykorzystano platformę pomiarową AMTI MC6-6-4000. Zaprezentowano zarówno samą aparaturę pomiarową wraz z możliwościami oprogramowania, jak też wyniki przeprowadzonych pomiarów. Otrzymane w wyniku pomiarów wykresy składowych sił skrawania oraz momentów skrawania są z kolei podstawą do obliczeń całkowitej siły skrawania oraz mocy skrawania. Sformułowano również wnioski na temat przydatności metody pomiaru do zastosowań edukacyjnych.

Measurement platform for determining the cutting force

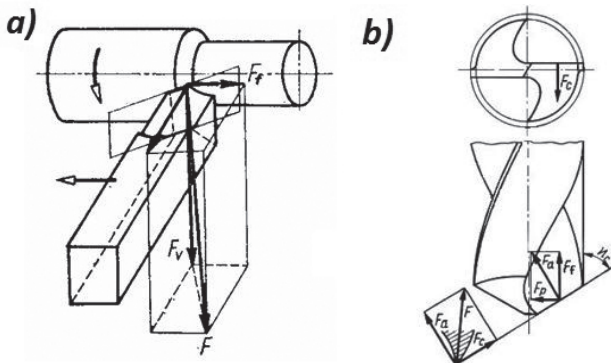
Keywords: cutting forces, measurements, measuring platform

ABSTRACT

The method for measuring the components of the cutting forces for turning and drilling has been shown in this paper by the examples. The measurement platform AMTI MC6-6-4000 has been used for the measurements. Presented are both the measuring equipment and features of the presented software, as well as the results of the measurements. The resulting measurement charts components of the cutting forces and cutting moments are in turn the basis for the calculation of the total cutting force and cutting power. The conclusions about the usefulness of the method of measurement for educational uses have described as well.

1. WSTĘP

Proces skrawania wymaga użycia siły niezbędnej do odkształcenia warstwy skrawanej, oddzielenia jej od materiału w postaci wióra, odkształcenia tego wióra oraz pokonania oporów tarcia, występujących głównie między narzędziem a obrabianym przedmiotem. Siła ta, zwana *siłą skrawania*, zależy od warunków pracy, może się zmieniać w szerokich granicach [1 ÷ 4]. Działa na narzędzie skrawające, a następnie przenosi się na elementy obrabiarki. Siła skrawania działa również na obrabiany przedmiot i może powodować jego uszkodzenie, jeżeli kierunek, sposób działania i wartość przekraczają wartość dopuszczalną. Wobec tego powstaje konieczność zmierzenia jej wartości i rozpoznania sposobu oraz kierunku działania siły skrawania. Przykładowo, dla obróbki tokarskiej, siłę skrawania F można rozłożyć na trzy wzajemnie do siebie prostopadłe kierunki (Rys. 1a). W przypadku wiercenia (Rys. 1b) wypadkową siłę skrawania można rozłożyć na dwie składowe [1, 3].



Rysunek 1 Składowe siły skrawania:

a) dla toczenia wzdłużnego, b) dla wiercenia [1]

Figure 1 Components of cutting forces:

a) for longitudinal turning, b) for drilling [1]

W przypadku toczenia siłę skrawania rozłożyć można na następujące składowe: F_f – działającą równoległe do kierunku posuwu, zwaną składową posuwową siłą skrawania, F_p – działającą prostopadle do powierzchni obrabianej, zwaną składową odporową siłą skrawania oraz F_v – działającą stycznie do powierzchni skrawania, nazywaną składową obwodową siłą skrawania. Składowa F_v jest jednocześnie główną siłą decydującą o zapotrzebowaniu przez obrabiarkę mocy niezbędnej do skrawania. Jej wartość zależy od właściwości materiału obrabianego, przekroju warstwy skrawanej, jej kształtu, geometrii ostrza

skrawającego oraz stanu narzędzi skrawających i właściwości cieczy chłodząco-smarującej. Wartość siły skrawania F można obliczyć z zależności geometrycznych. Jeżeli są znane elementy składowe, wówczas siłę wypadkową wyznaczyć można ze wzoru [1]:

$$F = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_v^2} \quad (1)$$

Na opór skrawania przy wierceniu składają się:

- opory powstające na krawędziach skrawających,
- opory powstające na ścinie,
- opory powstające na łysince wiertła.

Opory na krawędziach skrawających oraz na ścinie są to opory odkształceń plastycznych materiału skrawanego przetwarzanego na wiór oraz opory tarcia narzędzia o materiał obrabiany. Opór powstający na łysince jest głównie oporem tarcia o powierzchnię obrobioną. Przyjmuje się w badaniach, że przy symetrycznym obciążeniu wiertła opór skrawania rozkłada się na dwie składowe, umiejscowione na krawędziach skrawających w odległości $0,5 r$ od osi wiertła. Wypadkowa siła skrawania F działająca na ostrze wiertła może być rozłożona na dwie składowe (Rys. 1b): poziomą F_c i prostopadłą do krawędzi skrawającej w płaszczyźnie pionowej F_a . Składowa F_a może być z kolei rozłożona na dwie składowe F_f i F_p . Otrzymuje się więc trzy składowe: F_p , F_p i F_c wypadkowej siły skrawania F . 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 wgłębieniu się weń wiertła. Działa ona wzdłuż osi wiertła. Jeżeli wartość siły dla jednego ostrza wynosi F_f , to dla obu ostrzy wyniesie $2F_f$. 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 [3].

2. CHARAKTERYSTYKA PLATFORMY POMIAROWEJ I UŻYWANEGO OPROGRAMOWANIA

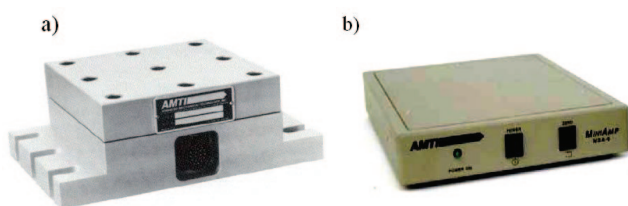
Platforma pomiarowa MC6 wykorzystywana jest do pomiaru sił w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach oraz składowych momentu skręcającego [5]. W jej budowie wykorzystano czujniki tensometryczne mocowane na konstrukcji zapewniającej wysoką sztywność, czułość oraz powtarzalność pomiarów. Konstrukcja przetworni-

Tabela 1 Specyfikacja platformy pomiarowej MC6
Table 1 Specification of measurement platform MC6

Specyfikacja AMTI MC6-6-4000 (wymiary w calach, w nawiasach podano wymiary w mm)			
F_z	F_x, F_y	M_z	M_x, M_y
[N]		[Nm]	
18 000	9 000	680	1 360

ków zapewnia stabilność i znikomy wpływ wzajemny mierzonych wielkości. Rozwiązanie jest chronione patentem: U.S. Patent #4493220. Obudowa wykonana jest w wersji wodo- i olejoszczelnej. Platforma pomiarowa jest stosowana tam, gdzie zachodzi konieczność jednoczesnego rejestrowania kilku wielkości sił i momentów lub pomiarów zmian ich wartości i zwrotu. Wykorzystana w badaniach platforma pomiarowa posiada 6 wyjść odpowiadających siłom F_x , F_y , F_z oraz momentom M_x , M_y , M_z [5]. W Tabeli 1 podano wymiary gabarytowe i zakres pomiarowy platformy MC6.

Platforma, której widok ogólny przedstawiono na Rysunku 2a, posiada sześciocalową, kwadratową płaszczyznę z gwintowanymi otworami do mocowania dodatkowego wyposażenia, np. imaków nożowych, uchwytów trójszczękowych. Można na niej bezpośrednio mocować również przedmioty obrabiane.

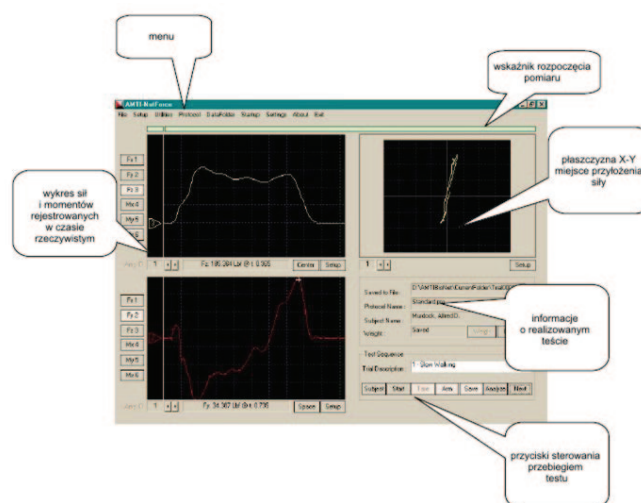


Rysunek 2 Widok ogólny platformy pomiarowej AMTI MC6-6-4000 (a) oraz wzmacniacz pomiarowy MiniAmp MSA-6 (b)

Figure 2 General view of measurement platform AMTI MC6-6-400 (a) and measuring amplifier MiniAmp MSA-6 (b)

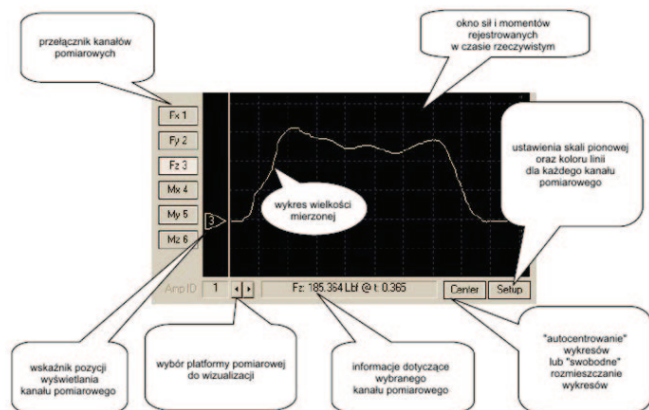
Sygnały mierzone przez poszczególne przetworniki składowe wzmacniane są przez dedykowany sześciokanałowy wzmacniacz MSA (Rys. 2b).

Jest to urządzenie zapewniające wysoki stopień wzmocnienia sygnału i odpowiednie warunki zasilania przetworników. Jednocześnie przetwornik analogowo-cyfrowy pozwala przygotować sygnał do rejestracji na komputerze lub innym urządzeniu wyposażonym w port szeregowy. Do pomiaru oporów skrawania wykorzystano zintegrowane z komputerem stanowisko dydaktyczne z platformą pomiarową AMTI MC6. Sygnały pomiarowe z platformy są wzmacniane przez układ wzmacniacza wielokanałowego MSA-6, a następnie przetwarzane przez program komputerowy AMTI NetForce 2.2. Przykładowe okno pracy z programem pokazano na Rysunku 3, natomiast na Rysunku 4 przedstawiono okno szczegółowe wybranego kanału pomiarowego.



Rysunek 3 Okno programu AMTI NetForce 2.2

Figure 3 Window mode of AMTI NetForce 2.2 programme

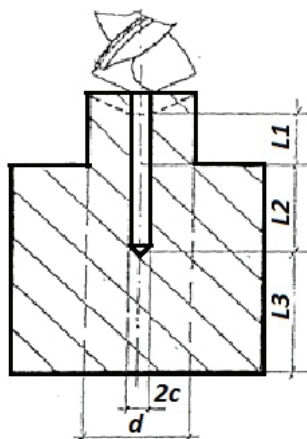


Rysunek 4 Okno wybranego kanału pomiarowego
Figure 4 Window of choosen measuring channel

3. METODYKA POMIARÓW

3.1 Metodyka pomiaru oporów cząstkowych przy wierceniu

Próbka do badań, zgodnie z Rysunkiem 5, pozwala określić, jaki procent siły osiowej P i momentu obrotowego M pochodzi od krawędzi skrawających, ścina oraz od łysinek.



Rysunek 5 Próbka do pomiaru oporów cząstkowych przy wierceniu: d – średnica próbki zależna od średnicy używanego wiertła, $2c$ – średnica otworu równa długości ścina

Figure 5 Sample for measurement of drilling force components: d – diameter of the tool, $2c$ – diameter of the hole corresponding to the chisel drill

Na odcinku $L1$ mierzono opory skrawania pochodzące tylko od głównych krawędzi skrawających, na odcinku $L2$ – opory skrawania pochodzące od głównych krawędzi skrawających oraz opory pochodzące od łysinek, natomiast na odcinku $L3$ – sumę oporów skrawania pochodzących od głównych krawędzi skrawających, łysinek i ścina.

Doświadczalnie stwierdzono (dane literaturowe), że dla wiertel o średnicach $12 \div 36$ mm i głębokościach skrawania nie przekraczających $2,5 d$ oraz wartościach posuwu $0,2 \div 0,4$ mm/obr, udział poszczególnych oporów cząstkowych przy wierceniu jest zbliżony do wartości przedstawionych poniżej:

$$\left. \begin{array}{l} P_{\chi} \approx 50\% \\ P_L \approx 9\% \\ P_{sc} \approx 41\% \end{array} \right\} \text{całkowitej siły osiowej } P,$$

$$\left. \begin{array}{l} M_{\chi} \approx 80\% \\ M_L \approx 12\% \\ M_{sc} \approx 8\% \end{array} \right\} \text{całkowitego momentu obrotowego } M,$$

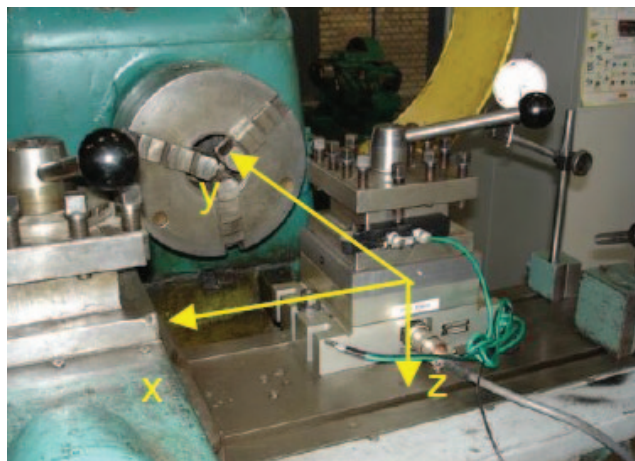
gdzie odpowiednie indeksy w oznaczają:

χ – opory pochodzące od głównych krawędzi skrawających,
 L – opory od łysinek,
 sc – opory od ścina.

Pomiary oporów skrawania przeprowadzono na wiertarce promieniowej WRA40, stosując do badań próbki pokazane na Rysunku 5, wykonane ze stali S215.

3.2 Metodyka pomiarów oporów skrawania przy toczeniu

Pomiary sił skrawania wykonano na tokarce uniwersalnej CU502 wyposażonej w tylny imak narzędziowy wraz z nożem tokarskim, zamocowany na platformie pomiarowej. Widok ogólny stanowiska przedstawia Rysunek 6.



Rysunek 6 Sposób zamocowania platformy pomiarowej i dodatkowego imaka nożowego na tokarce podczas pomiarów sił skrawania

Figure 6 The mounting of the measuring platform and additional tool holder on a lathe while measurement of cutting forces

W badaniach wykorzystano oprawkę tokarską CSSPR2020-12 wraz z płytką skrawającą SPUN-120304. Wykorzystując platformę pomiarową zamocowaną jako dodatkowy imak nożowy, przeprowadzono badania wpływu posuwu, głębokości skrawania i szybkości skrawania (prędkości obrotowej wrzeciona) na wartości składowe siły skrawania. Na podstawie wzoru (1) wyznaczono siłę zwaną oporem skrawania, działającą na narzędzie podczas pracy z określonymi parametrami technologicznymi. Materiałem obrabianym we wszystkich próbach była stal S215.

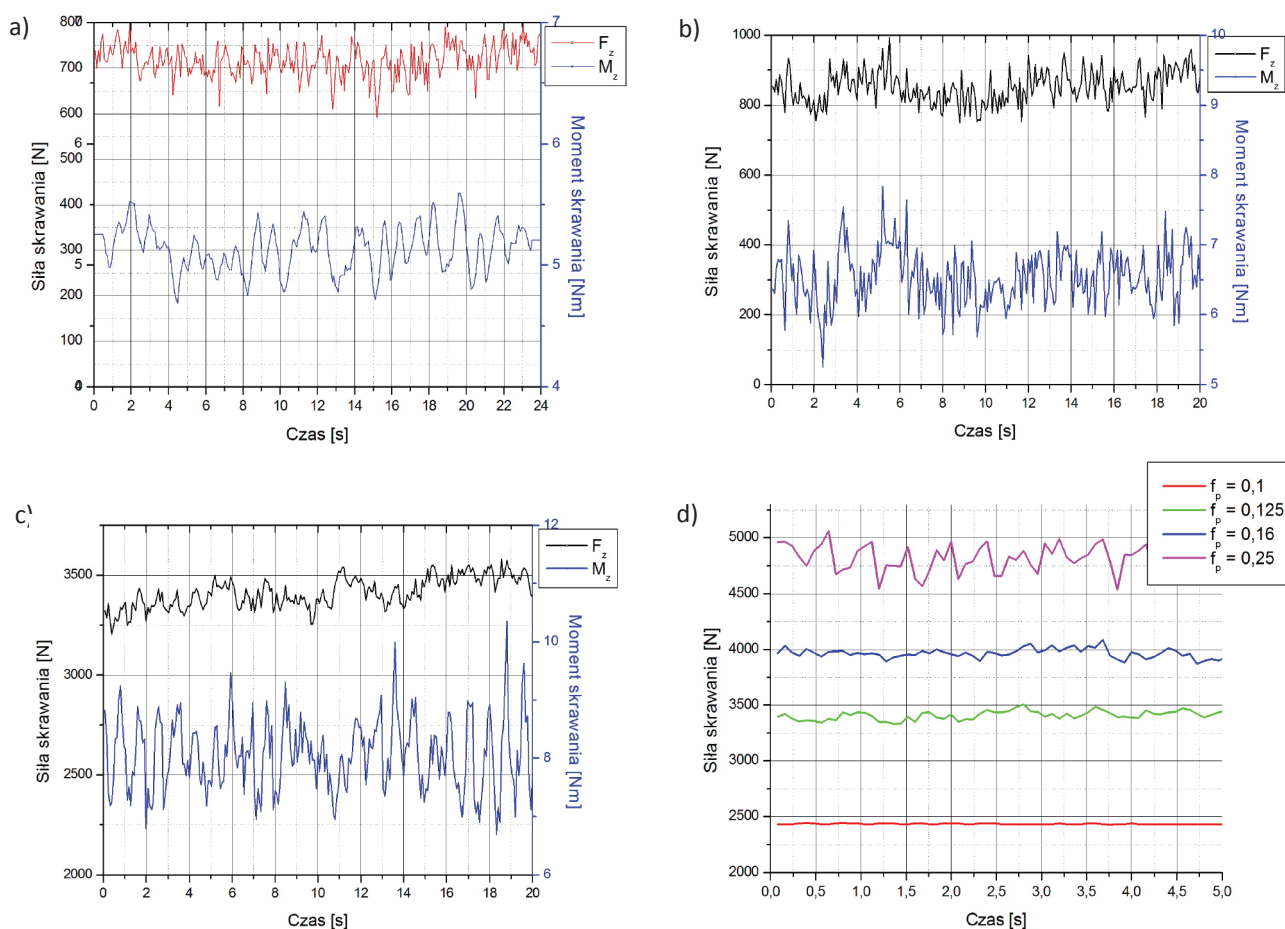
4. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Program AMTI NetForce pozwala na zapis próby badawczej w postaci pliku tekstowego, zawierającego wartości pomiarowe dla poszczególnych kanałów. Do wykonania wykresów interesujących wartości składowych siły skrawania można użyć innego standardowego oprogramowania, np. Microsoft Excel lub Origin.

Na Rysunku 7 przedstawione zostały wyniki pomiarów oporów skrawania dla prób wiercenia. Pierwszy wariant (Rys. 7a) pokazuje wartości siły skrawania F_z i momentu skrawania M_z w czasie pracy na odcinku L1, dla następujących danych wejściowych: średnica wiertła – 10 mm, parametry technologiczne: szybkość skrawania – 15 m/min, posuw wgłębny – 0,1 mm/obr. Wariant drugi (Rys. 7b) i trzeci (Rys. 7c) dotyczy odpowiednio pracy wiertła na odcinku L2 i L3.

Na Rysunku 7d pokazano wpływ wartości posuwu wgłębnego na siłę skrawania (wartości posuwu umieszczono na wykresie), przy pozostałych stałych parametrach – jak w wariacie pierwszym, drugim i trzecim.

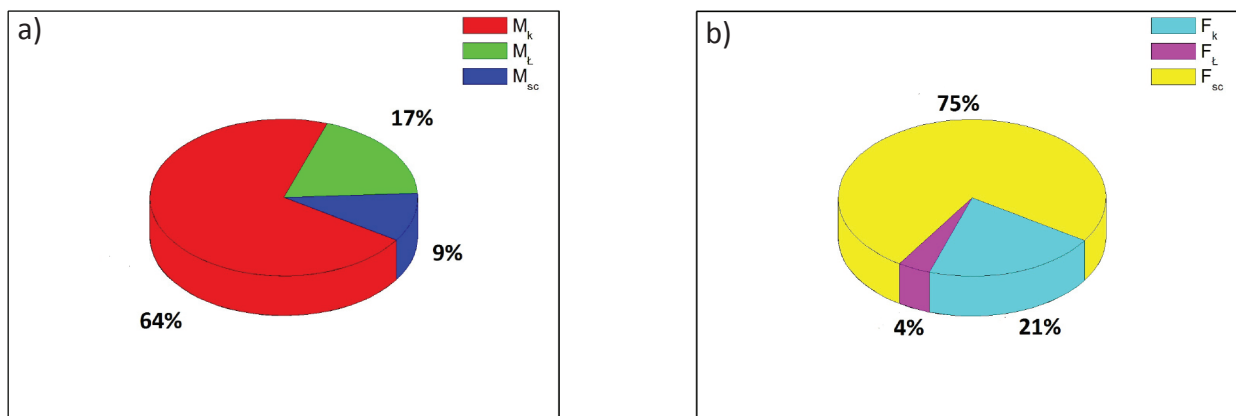
Z wykresów (Rys. 7a, b i c) wyznaczono wartości średnie dla prób wiercenia na poszczególnych odcinkach pomiarowych. Dla odcinka L1: $F_z = 716,38$ N oraz $M_z = 5,14$ Nm, dla odcinka L2: $F_z = 854,22$ N oraz $M_z = 6,54$ Nm, dla odcinka L3: $F_z = 3413,59$ N oraz $M_z = 8,06$ Nm. Procentowy udział cząstkowych składowych oporu skrawania dla momentu



Rysunek 7 Wyniki dla prób wiercenia: wykresy przebiegów rzeczywistych siły i momentu skrawania na odcinku L1 (a), na odcinku L2 (b), na odcinku L3 (c), wpływ posuwu wgłębego na siłę skrawania (d)

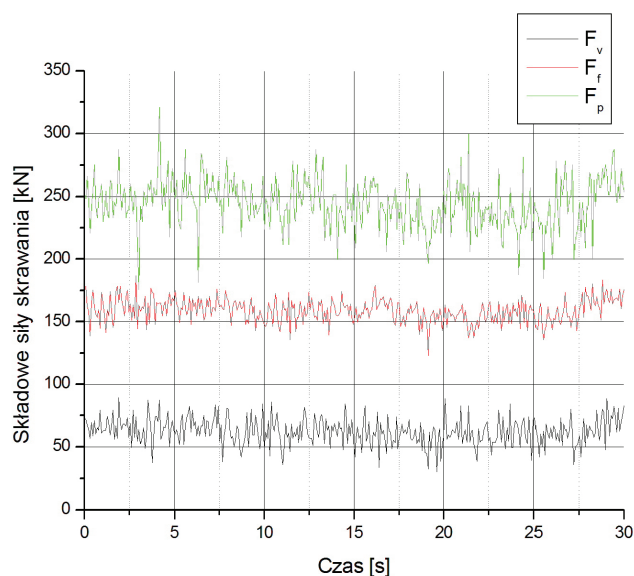
Figure 7 Experimental results of drilling cutting forces and moments on L1 section (a), L2 section (b), L3 section (c), influence of infeed on cutting force (d)

i siły skrawania przy wierceniu przedstawiono na Rysunku 8.

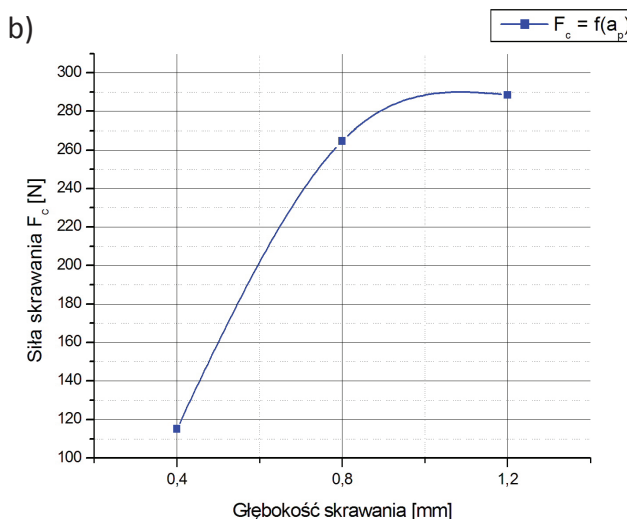
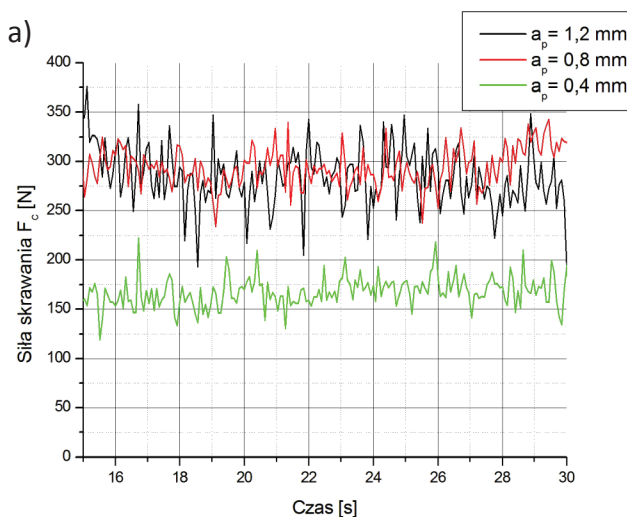


Rysunek 8 Wykres udziału poszczególnych składowych w momencie skrawania (a) i sile skrawania (b)
Figure 8 The diagram of components distribution in cutting moment (a) and cutting force (b)

Poniżej pokazano wyniki pomiarów dla próby toczenia (Rys. 9). Są to zmierzone, rzeczywiste przebiegi składowych siły skrawania dla następujących danych wejściowych: głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm, posuw $f = 0,27$ mm/obr, prędkość obrotowa wrzeciona $n = 450$ obr/min. Korzystając ze wzoru (1) obliczono i pokazano na wykresach wartości siły F_c , zwanej oporem skrawania. Zbadano wpływ głębokości skrawania a_p (Rys. 10), szybkości skrawania v_c (Rys. 11) oraz posuwu f_n (Rys. 12) na opór skrawania w próbach toczenia stali, zgodnie z warunkami opisanymi w rozdziale 3.2.

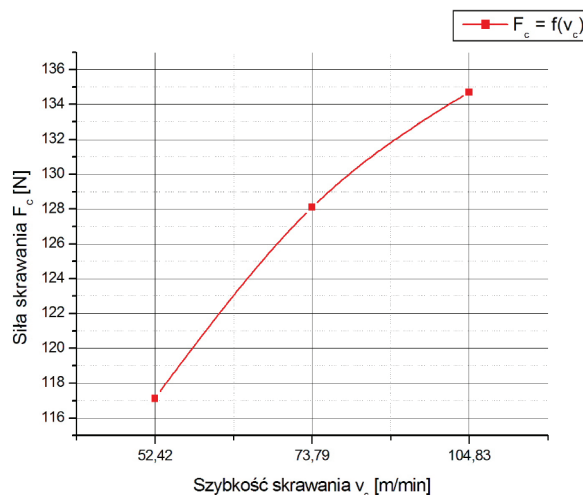
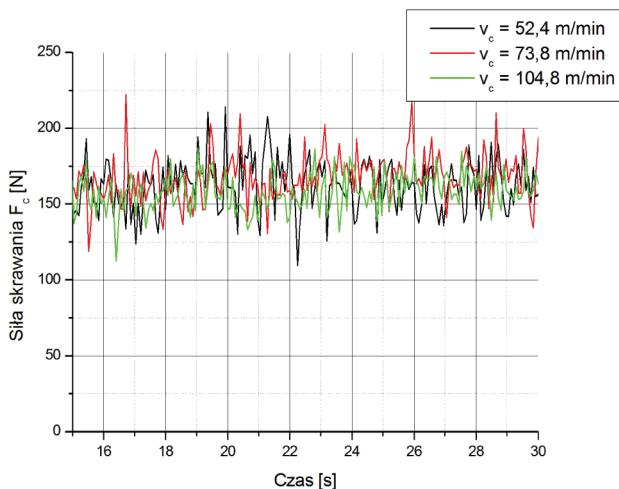


Rysunek 9 Przykładowe wyniki składowych siły skrawania dla prób toczenia: wykresy przebiegów rzeczywistych
Figure 9 The examples of experimental test results for components of cutting force during longitudinal turning



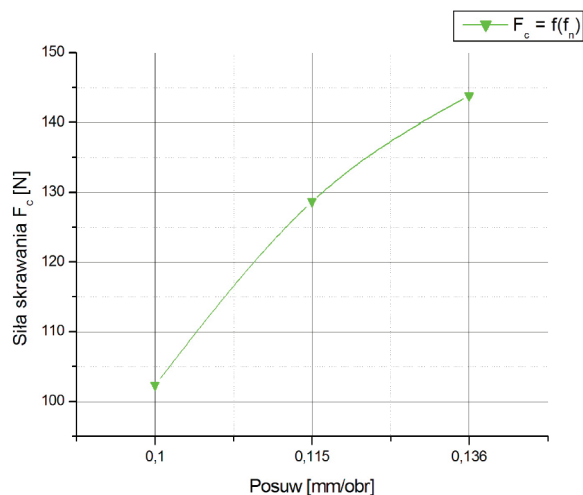
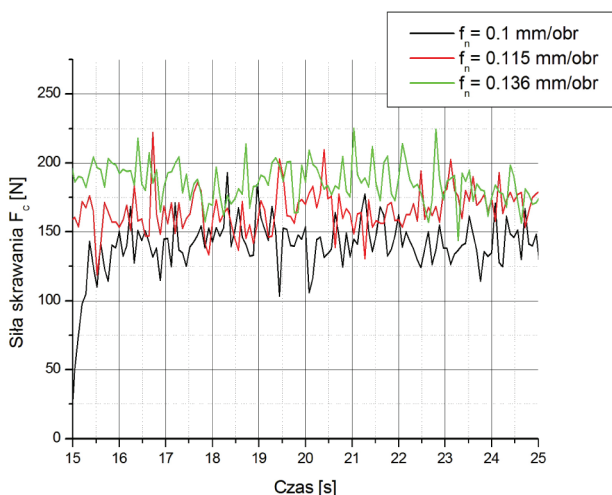
Rysunek 10 Wpływ głębokości skrawania a_p na siłę skrawania F_c : przebiegi rzeczywiste (a), wykres zależności średniej wartości siły skrawania F_c od głębokości skrawania (b)

Figure 10 The influence of depth of cut a_p on cutting force F_c : experimental results (a), influence of depth of cut on average cutting force F_c (b)



Rysunek 11 Wpływ szybkości skrawania v_c na siłę skrawania F_c : przebiegi rzeczywiste (a), wykres zależności średniej wartości siły skrawania F_c od szybkości skrawania (b)

Figure 11 The influence of cutting speed v_c on cutting force F_c : experimental tests (a), influence of cutting speed v_c on average cutting force F_c (b)



Rysunek 12 Wpływ posuwu f_n na siłę skrawania F_c : przebiegi rzeczywiste (a), wykres zależności średniej wartości siły skrawania F_c od posuwu (b)

Figure 12 The influence of feed per revolution f_n on cutting force F_c : experimental tests (a), influence of feed per revolution f_n on average cutting force F_c (b)

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że:

- w przypadku prób wiercenia można z pomocą specjalnie przygotowanej próbki wyodrębnić opory skrawania pochodzące od głównych krawędzi skrawających, łysinek i ścina,
- zgodnie z wynikami pokazanymi na Rysunku 7a, 7b i 7c wprowadzanie kolejnych części wiertła do obróbki powoduje znaczny wzrost siły i momentu skrawania,
- udział oporów cząstkowych w całkowitej sile i momencie skrawania tylko częściowo pokrywa się z danymi opisanymi w literaturze, dla wiertła o mniejszej średnicy (10 mm) największy wpływ na siłę skrawania miała praca ścina; zaobserwo-

wano również zwiększony udział oporów cząstkowych od łysinek,

- w przypadku prób toczenia zwiększenie każdego z badanych parametrów technologicznych powoduje wzrost całkowitej siły skrawania; najmniejszy wpływ, zgodnie z pokazanymi wynikami, zanotowano dla szybkości skrawania, największy dla głębokości skrawania,
- w badaniach doświadczalnych służących wyznaczaniu siły, zwanej oporem skrawania, należy uwzględnić stępienie narzędzia; w przypadku wiertel ostrzonych ręcznie, przywrócenie geometrii bazowej jest praktycznie niemożliwe, stąd mogą wystąpić inne niż podawane w literaturze udziały oporów cząstkowych w całkowitej sile i momencie skrawania.

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że zaprezentowana metoda pomiarów daje dobre rezultaty, jest szybka i czytelna dla użytkownika. Dodatkowo do jej zalet można zaliczyć dużą funkcjonalność i możliwość przystosowania praktycznie do każdego zabiegu obróbkowego. Oprócz zaprezentowanych możliwości, platforma może służyć do wyznaczania oporów skrawania dla zabiegów frezowania lub np. wytaczania. Na platformie można również mocować różne uchwyty obróbkowe. W specjalistycznych zastosowaniach można jej używać na obrabiarkach ze sterowaniem CNC, które z reguły mają zamkniętą przestrzeń obróbkową, a do samej obróbki

używana jest ciecz chłodząco-smarująca. Zakup platformy pomiarowej do budowy stanowiska, pozwalającego w prosty sposób wizualizować i zapisywać wyniki pomiarów, wydaje się być dobrym z praktycznego punktu widzenia rozwiązaniem. Do opracowania wyników wykorzystuje się pliki z danymi pomiarowymi, zapisane w formacie tekstowym.

W rozwiązaniach edukacyjnych warto rozważyć zastosowanie prostego arkusza kalkulacyjnego, za pomocą którego można wyznaczyć całkowitą siłę skrawania, a także dokonać obliczeń zapotrzebowania mocy przez obrabiarkę. Dodatkowo istnieje możliwość wyznaczenia udziału procentowego poszczególnych składników oporów cząstkowych w realizowanej próbie skrawania.

LITERATURA

- [1] Brodowicz W., Grzegórski Z., Technologia budowy maszyn, WSiP, Warszawa, 1993.
- [2] Olszak W., Obróbka skrawaniem, WNT, Warszawa, 2009.
- [3] Stós J., Obróbka skrawaniem w praktyce: poradnik inżyniera, konstruktora i mechanika, Wydawnictwo Verlag Dashöfer, Warszawa, 2008.
- [4] Dąbrowski L., Marciniak M., Nowicki B., Obróbka skrawaniem, ścierna i erozyjna: laboratorium, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001.
- [5] Katalogi firmy: Advanced Mechanical Technology, Inc. 176 Waltham Street, Watertown, MA 02472-4800 USA.