

Krzysztof JEMIELNIAK<sup>1</sup>  
 Mirosław NEJMAN<sup>1</sup>  
 Dominika ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA<sup>1</sup>

## BADANIE DYNAMICZNYCH WSPÓLCZYNNIKÓW SIŁ SKRAWANIA PODCZAS ORTOGONALNEGO TOCZENIA STALI

W artykule przedstawiono metodę bezpośredniego pomiaru chwilowych sił skrawania podczas obróbki, w czasie występowania drgań samowzbudnych. Metoda ta polega na wykorzystaniu dynamometru zamocowanego na elementach podatnych, który drga równocześnie z narzędziem, jednoczesnym pomiarze siły i przyspieszenia jak też pomiarze przemieszczenia siłomierza i narzędzia podczas skrawania ortogonalnego, mierzone na kierunku posuwu. Przyjęta metodyka pomiaru pozwala na wyznaczenie uśrednionych lub chwilowych dynamicznych współczynników siły skrawania oraz ich zależności od parametrów skrawania i zużycia narzędzia.

## INVESTIGATION OF DYNAMIC CUTTING FORCE COEFFICIENTS DURING ORTHOGONAL TURNING OF STEEL

The paper presents the method of the direct measuring the instantaneous cutting forces during chatter. This method is based on elastically supported dynamometer vibrating with the tool, on measuring the force and acceleration simultaneous, as well on measuring the displacement of the dynamometer and cutting tool during orthogonal turning, measured in the direction of feed. The measurements allow for determination of averaged or instantaneous dynamic cutting force coefficients and their dependence on cutting conditions and the tool wear.

### 1. WSTĘP

Obrabiarka wraz z uchwytem, przedmiotem obrabianym i narzędziem jest złożonym układem masowo-sprężysto-tłumiącym (MST) o wielu stopniach swobody, który pobudzany jest do drgań na skutek działania obciążeń dynamicznych. W określonych warunkach ich rozwój może prowadzić do utraty stabilności i wystąpienia drgań samowzbudnych [1,2,3]. Rozwój drgań samowzbudnych jest zjawiskiem niekorzystnym, prowadzącym m.in. do znacznego pogorszenia jakości obrabianych powierzchni, szybszego zużycia narzędzi jak również samej obrabiarki oraz większego natężenia hałasu.

Najczęściej stosowanym sposobem unikania drgań samowzbudnych, jest dobór parametrów skrawania z uwzględnieniem wyznaczonej uprzednio granicy stabilności. Możliwość określenia granicznej wartości głębokości skrawania zależy od znajomości charakterystyki dynamicznej procesu skrawania oraz znajomości układu masowo-sprężysto-tłumiącego obrabiarki. Charakterystyka procesu skrawania definiowana jest, jako zależność siły skrawania:

- od chwilowych wartości grubości warstwy skrawanej zmieniającej się pod wpływem zmian względnych przemieszczeń między przedmiotem obrabianym a narzędziem (w kierunku prostopadłym do krawędzi skrawania)  $r_t$  oraz fal na powierzchni obrabianej w poprzednim przejściu  $r_T$ ;
- od prędkości tych przemieszczeń  $r_t'$ :

$$F_r = F_{rk}(h) + F_{rc}(r_t'); \quad F_r = F_{rk}(h) + F_{rc}(r_t'); \quad (1)$$

$$h = h_o + h_d = h_o - r_t + R_T, \quad (2)$$

gdzie:

- $F_{rk}, F_{tk}$  – składowe siły skrawania zależne od przemieszczeń względnych między narzędziem a przedmiotem obrabianym,
- $F_{rc}, F_{ic}$  – składowe siły skrawania zależące od prędkości względnych drgań układu narzędzie-przedmiot obrabiany  $r_t'$ ,
- $h$  – grubość warstwy skrawanej,
- $h_o$  – statyczna grubość warstwy skrawanej,

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, WIP, Instytut Techniki Wytwarzania; 02-524 Warszawa; ul. Narbutta 86. Tel.: + 48 22 234-86-56, e-mail: m.nejman@zaoios.pw.edu.pl

$h_d$  – składowa dynamiczna  $h$ ,  
 $r_t=r(t)$  – wewnętrzna modulacja  $h$ ,  
 $r_T=r(t-T)$  – zewnętrzna modulacja  $h$ ,  
 $T$  – okres przejścia ostrza.

Najczęściej wykorzystywanym modelem procesu skrawania jest prosty model liniowy Altintasa [3,4] gdzie składowe dynamiczne siły skrawania są proporcjonalne do grubości warstwy skrawanej:

$$F_r = k_r b h; \quad F_t = k_t b h \quad (3)$$

gdzie:

$k_r, k_t$  – stałe współczynniki skrawania,  
 $b$  – szerokość warstwy skrawanej.

Współczynniki skrawania zazwyczaj wyznaczone są na podstawie stanu ustalonego procesu skrawania [2,4,5,6]. Takie podejście jest wystarczające w przypadku toczenia, kiedy nominalna grubość warstwy skrawanej  $h_0$  jest stała.

Od początku trwania prac badawczych nad drganiami samowzbudnymi zauważono, że proces tłumienia ma zasadniczy wpływ na stabilność obróbki zwłaszcza przy niskich wartościach prędkości skrawania [7]. Jednak zjawisko to było zaniechane z uwagi na brak dostępnych modeli oraz metod pomiarów bezpośrednich, które pozwoliłyby wyznaczyć współczynniki tłumienia.

We wszystkich rozważaniach wartości współczynników tłumienia były uśredniane. Jest to typowe podejście w sytuacji, gdy tłumienie procesu skrawania jest uwzględniane w analizie stabilności [8,9] i prowadzi do zależności opisujących proces skrawania w postaci:

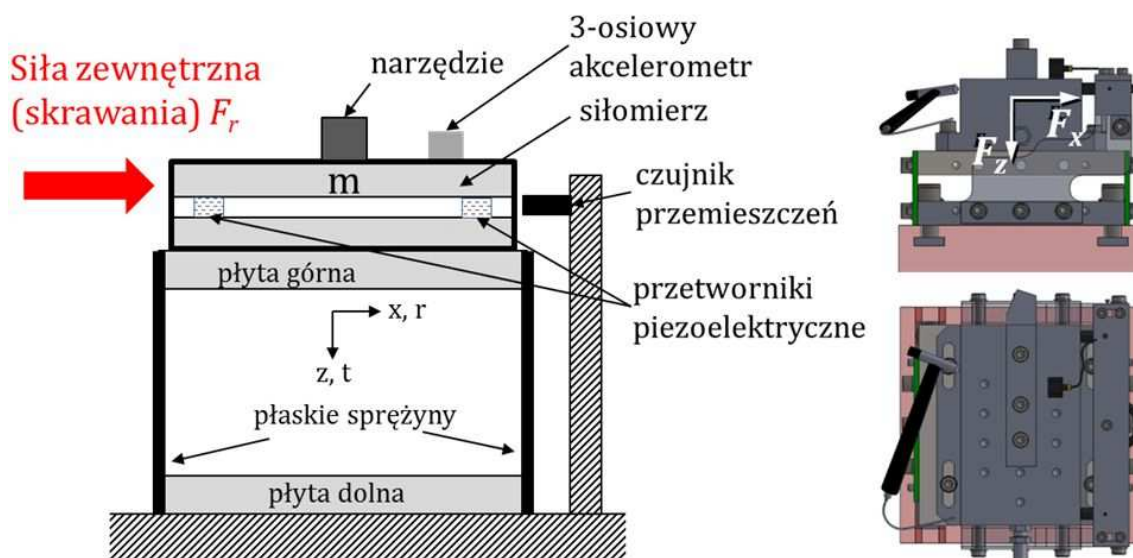
$$F_r = b(k_r h + c_r r_t'), \quad F_t = b(k_t h + c_t r_t') \quad (4)$$

gdzie:

$r_t$  – prędkość drgań w kierunku grubości warstwy skrawanej,  
 $c_r, c_t$  – współczynniki tłumienia siły skrawania.

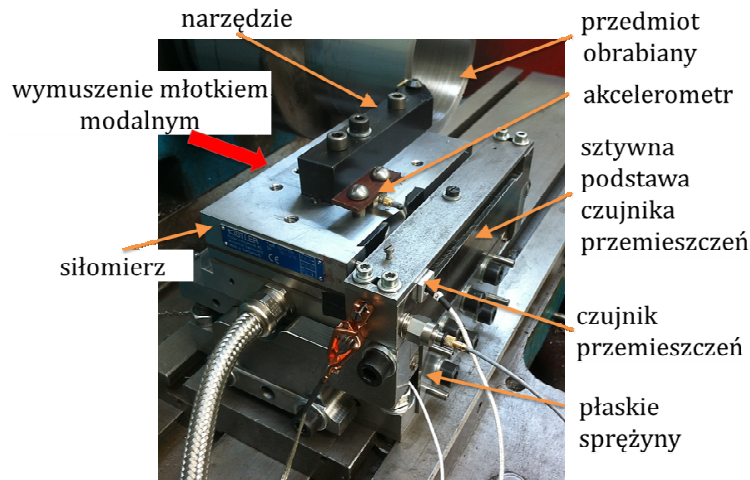
W niniejszym referacie przedstawiony został opis przeprowadzonych badań dynamicznych współczynników sił skrawania podczas ortogonalnego toczenia swobodnego stali. W badaniach zastosowano nowatorską metodę bezpośredniego pomiaru sił skrawania podczas obróbki w czasie występowania drgań samowzbudnych. Metoda ta opiera się na zastosowaniu podatnie umocowanego dynamometru, który drga równocześnie z narzędziem [10]. Wstępne wyniki badań zastosowania powyższej metody (bez występowania drgań samowzbudnych) zaprezentowano w [11]. W poniższym artykule przedstawiony został opis przeprowadzonych badań dynamicznych współczynników sił skrawania podczas ortogonalnego toczenia stali.

## 2. METODYKA BADAŃ



Rys. 1. Koncepcja urządzenia badawczego do pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania [10]

Na rysunku 1 przedstawiono koncepcję urządzenia opisaną szczegółowo w pracy [10] oraz zdjęcie gotowego stanowiska badawczego zamontowanego na tokarce poprzez przykręcenie dolnej płyty w rowkach teowych (rys. 2). Stanowisko badawcze wraz z całym torem pomiarowym zostało wyposażone w dynamometr Kistler 9257BA, 3-osiowy akcelerator Kistler 8763A50 i pojemnościowy czujnik przemieszczeń Lion Precision C23-C. Do badań wykorzystano konwencjonalną tokarkę TUD 100 doposażoną w przetwornik obrotowo-impulsowy E2/CPPC (150 imp/obr) zamontowany na wrzecionie. Parametry akwizycji identyczne jak w artykule [12,13].

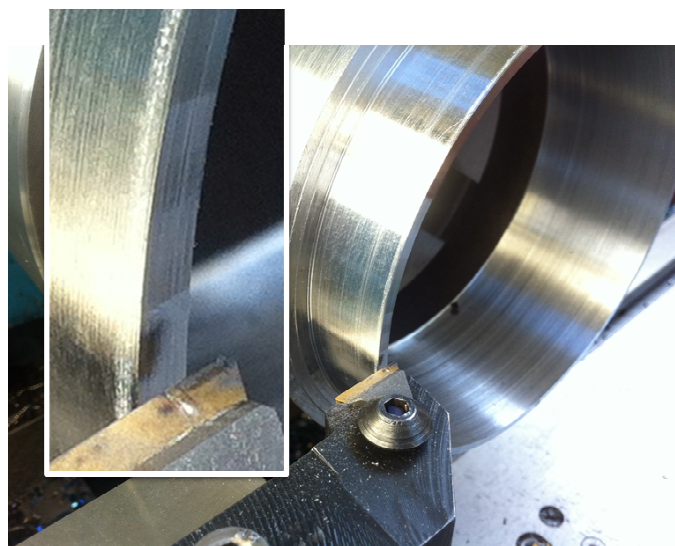


**Rys. 2.** Urządzenie badawcze do pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania

Do badań użyto noża tokarskiego CTGPR2525 z płytkami TPGN 160304, gatunku 1025 (węgiel spiekany pokryty cienką warstwą TiAlN z użyciem metody PVD) do skrawania ortogonalnego (bez zaangażowania naroża). Geometria narzędzia była następująca:  $\kappa_r = 90^\circ$ ,  $\gamma_0 = 5^\circ$ ,  $\alpha_0 = 6^\circ$ .

Przedmiotem obrabianym była rura o średnicy 143,7 mm o grubości 2,5 mm ze stali S355J2H. Grubości ścianki wcześniej przygotowano, tak aby mieć pewność stałej geometrii warstwy skrawanej.

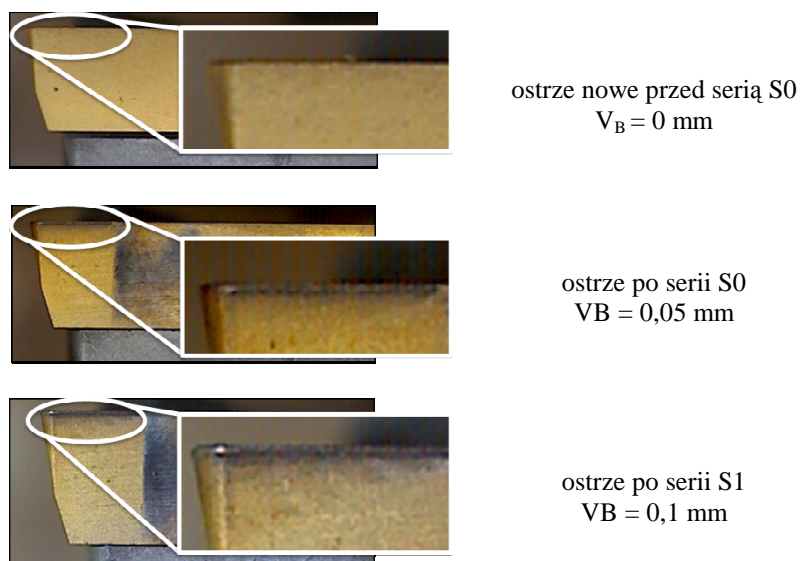
Przyjęto głębokość skrawania  $a_p=2.5\text{mm}$ , prędkości skrawania  $v_c=40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220\text{m/min}$  oraz posuw  $f=0,08\text{mm/obr}$ . Próby zostały przeprowadzone ostrzem nowym (S0) oraz używanym (S1). Położenie narzędzia dobrano tak, aby promień naroża nie brał udziału w skrawaniu.



**Rys. 3.** Zdjęcie przedmiotu obrabianego z naciętą falą oraz narzędzia

Ponieważ w prowadzonych badaniach głębokość skrawania oraz posuw miały stałe wartości kolejnym próbom nadano nazwy zawierające nr serii badań oraz wartość prędkości skrawania – od S0v40 do S1v220.

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcia stanu krawędzi skrawającej narzędzia użytego do badań. Wartość zużycia ostrza w czasie prowadzonych badań była na tyle niewielka, że nie miała bezpośredniego wpływu na uzyskane wyniki.

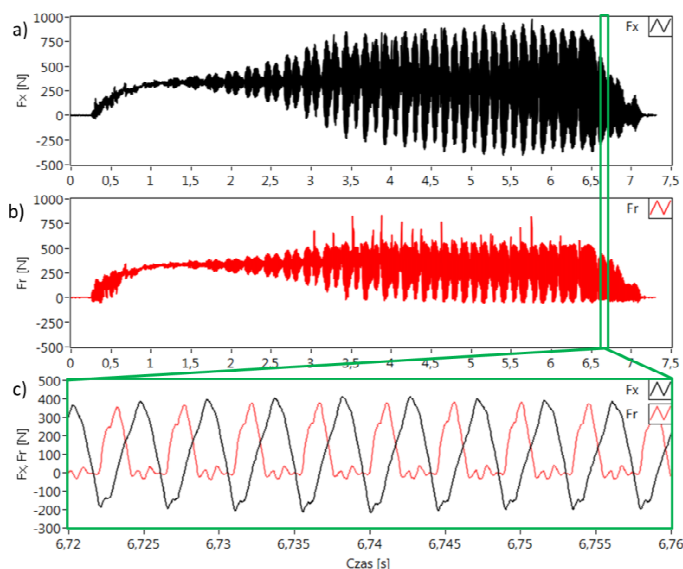


Rys. 4. Zdjęcia stanu ostrza w czasie prowadzonych badań

### 3. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

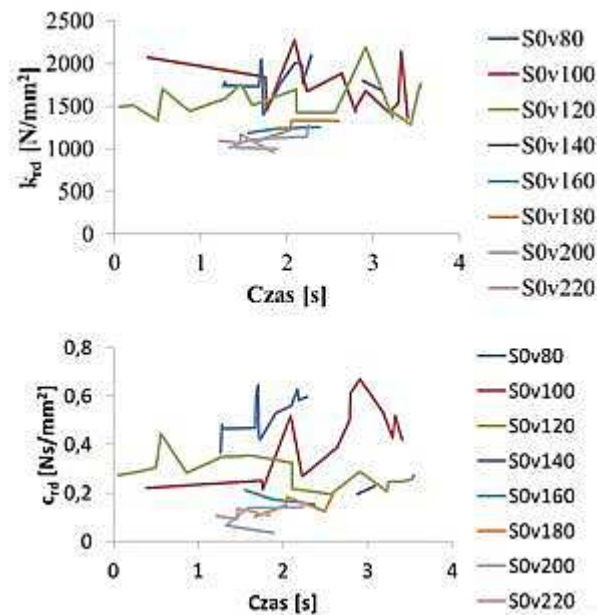
Jednym z ważniejszych zadań realizowanych przez oprogramowanie do analizy drgań samowzbudnych jest usuwanie siły bezwładności z sygnału drgającego siłomierza.

Na rysunku 5 przedstawiono kolorem czarnym sygnał oryginalny z siłomierza  $F_x$  zarejestrowany w czasie występowania drgań, natomiast kolorem czerwonym sygnał siły  $F_r$ , czyli na kierunku posuwu ale z usuniętym wpływem bezwładności. Na wykresie tym widać, że sygnał siły rzeczywistej zmienia się od zera do wartości około 400N. Wartość oscylująca wokół zera oznacza chwile czasowe, w których narzędzie na skutek drgań wyskakuje poza materiał obrabiany, wartość siły skrawania jest wtedy równa zero. Wartość maksymalna siły jest związana z „nurkowaniem” noża w materiale obrabianym.



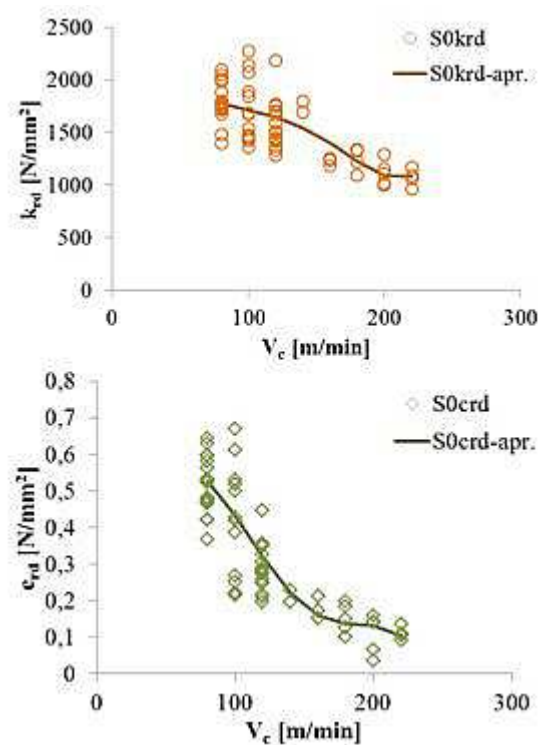
Rys. 5. Fragmenty sygnałów z próby S0v100: a) sygnał  $F_x$ ; b) sygnał  $F_r$ ; c) zestawienie i powiększenie sygnałów  $F_x$  i  $F_r$

W pierwszym etapie analizy sygnałów dla każdej zarejestrowanej próby skrawania wyznaczono dynamiczne współczynniki dla różnych fragmentów sygnałów. Ich zmienność w czasie trwania skrawania próby S0 przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wykreślenie wybranych współczynników  $k_{rd}$  i  $c_{rd}$  w funkcji czasu skrawania

Wyznaczenie pojedynczej wartości dla każdej próby nie było by reprezentatywne, tak więc z każdej próby wyznaczono wiele punktów, a następnie obliczono z nich wartość średnią. Kolejnym krokiem była aproksymacja otrzymanych średnich i wykreślenie w funkcji prędkości skrawania, co przedstawiono na rysunku 7.

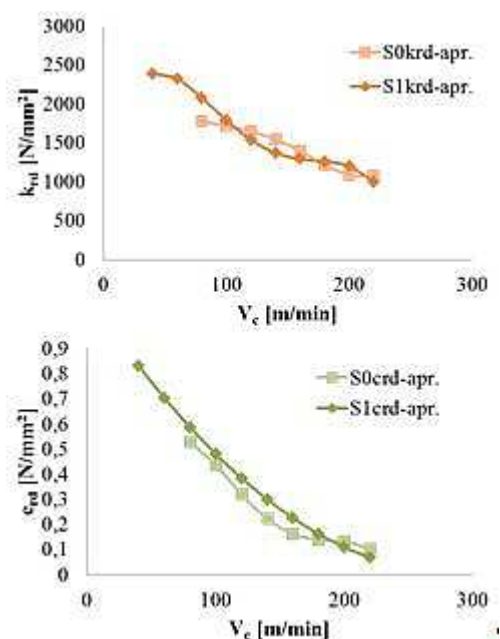


Rys. 7. Wyznaczenie aproksymacji współczynników  $k_{rd}$  i  $c_{rd}$  w funkcji prędkości skrawania

Największy rozrzut wyników można zaobserwować dla niskich prędkości skrawania. Należy pamiętać, iż z literatury i doświadczenia znane jest zjawisko stabilizowania się obróbki dla niskich prędkości obrotowych.

Tak więc rozrzut wyników może być związany z prowadzeniem badań blisko granicy stabilności. Dla prędkości skrawania powyżej 120m/min uzyskane wyniki nie mają już takiego dużego rozrzutu. Wyznaczenie średnich wartości dla każdej prędkości skrawania też nie dawało wyników, dla których wartości współczynników malały przy jednoczesnym wzroście prędkości skrawania. Dopiero aproksymacja wartości średnich wielomianem 4 rzędu dała bardziej oczekiwany wynik.

Na rysunku 8 przedstawiono zestawienie aproksymacji współczynników dla obu wykonanych serii badań. Widać, że stan krawędzi skrawającej nie miał wpływu na wartości współczynników. Za to powtarzalność przebiegu zmian wartości współczynników świadczyć może o poprawnej metodyce prowadzonych badań. Jedyną istotną różnicą między uzyskanymi przebiegami, to brak wartości współczynników dla prędkości skrawania 40 i 60m/min dla narzędzia nowego. Było to spowodowane tym, że obróbka wpadła w drgania samowzбудne dopiero od prędkości 80m/min. Natomiast dla krawędzi skrawającej używanej drgania samowzбудne zarejestrowano już od prędkości skrawania 40m/min.



Rys. 8. Wyznaczenie aproksymacji współczynników  $k_{rd}$  i  $c_{rd}$  w funkcji prędkości skrawania

#### 4. WNIOSKI

Uzyskane wyniki aproksymacji są powtarzalne i pozwalają wnioskować, że opracowana metoda bezpośredniego pomiaru sił skrawania może być zastosowana do eksperymentalnego wyznaczania liniowych dynamicznych współczynników siła skrawania. Z powodów statystycznych planowane jest wykonanie większej liczby powtórzeń serii oraz zbadanie zależności współczynników od zużycia krawędzi skrawającej narzędzia.

#### PODZIĘKOWANIA

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Altintas, Y., Eynian, M., Onozuka, H., *Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2008.
- [2] Altintas, Y., *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press, 2000.
- [3] Jemielniak, K., Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., *Analityczne i numeryczne wyznaczanie granicy stabilności przy toczeniu*, Inżynieria Maszyn, 2012.
- [4] Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A., *Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996.
- [5] Das, M.K., Tobias, S.A., *The Relation Between the Static and the Dynamic Cutting of Metals*, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 1967.

- [6] Jemielniak, K., *Modelling of Dynamic Cutting Coefficients in Three - Dimensional Cutting*, Int. J. Mach. Tools Manufact, 1992.
- [7] Kegg, R.L., *Chatter Behavior at Low Cutting Speeds*, CIRP Annals, 1969.
- [8] Altintas, Y., Kilic, Z.M., *Generalized dynamic model of metal cutting operations*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013.
- [9] Budak, E., Tunc, L.T., *Identification and Modeling of Process Damping in Turning and Milling Using a New Approach*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010.
- [10] Jemielniak, K., Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., Wypisinski R., *Device for dynamic components of cutting force measurement*, Patent P-398818, April 15, 2012.
- [11] Jemielniak, K., Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., *New method of dynamic cutting force coefficients determination*, Proc. of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, 2013.
- [12] Jemielniak, K., Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., *Wyznaczenie dynamicznych współczynników sił skrawania poprzez bezpośredni pomiar siły skrawania w czasie występowania drgań*, Mechanik, 2014.
- [13] Nejman, M., Śniegulska-Grądzka, D., Jemielniak, K., *Wpływ charakterystyki toru pomiarowego na bezpośredni pomiar siły skrawania w czasie występowania drgań*, Mechanik, 2014.