

Dr inż. Mirosław NEJMAN, dr inż. Dominika ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA,  
prof. dr hab. inż. Krzysztof JEMIELNIAK (Politechnika Warszawska):

## **PORÓWNANIE DYNAMICZNYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW SIŁ SKRAWANIA ZMIERZONYCH W CZASIE WYSTĘPOWANIA DRGAŃ SAMOWZBUDNYCH DLA OSTREJ I ZUŻYTEJ KRAWĘDZI SKRAWAJĄCEJ**

### Streszczenie

Podczas doboru warunków skrawania dla danego procesu należy wziąć pod uwagę przeciwdziałanie drganiom samowzbudnym. Powszechnie przyjętą metodą unikania drgań samowzbudnych podczas skrawania jest uwzględnienie granicy stabilności wyznaczonej dla wybranego narzędzia oraz rodzaju materiału obrabianego. Niestety, ta granica przesuwa się wraz z degradacją krawędzi ostrza skrawającego. W artykule przedstawiono wpływ zużycia ostrza na wyniki pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania.

**Słowa kluczowe:** *drgania samowzbudne, siły skrawania*

## **THE COMPARISON OF DYNAMIC CUTTING FORCE COEFFICIENTS MEASURED DURING SELF-EXCITED VIBRATIONS FOR SHARP AND WORN CUTTING EDGE**

### Abstract

Preventing the occurrence of self-excited vibration is very important in selection of cutting conditions. Commonly accepted method of avoiding self-excited vibrations during cutting is the determination of the stability limit for selected tool and workpiece material. Unfortunately, this limit changes with the degradation of the cutting edge. This paper presents the influence of the tool wear on the measurement results of dynamic coefficients of cutting forces.

**Keywords:** *self-excited vibration, cutting force coefficients, turning*

# **PORÓWNANIE DYNAMICZNYCH WSPÓŁCZYNNIKÓW SIŁ SKRAWANIA ZMIERZONYCH W CZASIE WYSTĘPOWANIA DRGAŃ SAMOWZBUDNYCH DLA OSTREJ I ZUŻYTEJ KRAWĘDZI SKRAWAJĄCEJ**

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

## **1. WPROWADZENIE**

Od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych trwają prace nad analizą sił skrawania. Wyniki analiz są niezwykle cenne dla przemysłu lotniczego, czy medycznego, który to zajmuje się wytwarzaniem przedmiotów z materiałów drogich, bardzo twardych, często o skomplikowanej geometrii i jeszcze z wysokimi dokładnościami. Niezwykle trudno pogodzić jest wymagania wysokiej precyzji w obróbce skrawaniem z dużą wydajnością. Oznacza to wysokie kwalifikacje technologa w procesie projektowania procesu obróbki skrawaniem, konieczność prowadzenia wielu testów doboru parametrów skrawania. Zwiększanie wydajności obróbki skrawaniem to m.in. zwiększanie prędkości skrawania i wymiarów warstwy skrawaniem. Niestety dla materiałów trudnoobrabialnych jest to równocześnie przepis na uzyskanie drgań samowzbudnych w czasie skrawania. Drgania samowzbudne często pojawiają się podczas obróbki przedmiotów cienkościennych.

Znanych jest wiele metod przeciwdziałania drganiom samowzbudnym [7,8,9,10]. Począwszy od metod bardziej wyrafinowanych jak stosowanie aktuatorów, czy pulsacja prędkości obrotowej, po bardziej tradycyjne – zwiększenie posuwu, zmniejszenie prędkości obrotowej. Dużo bardziej skuteczne jednak byłoby posiadanie wydajnego aparatu matematycznego do szacowania siły skrawania z uwzględnieniem niebezpieczeństwa wpadania obróbki w drgania samowzbudne. W świecie naukowym znanych jest wiele modeli siły skrawania [1,2]. Rozważając zmienność siły w zależności od

---

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania, 02-524 Warszawa, ul. Narbutta 86  
tel.: +48 22 234-82-59, e-mail: m.nejman@zaoios.pw.edu.pl

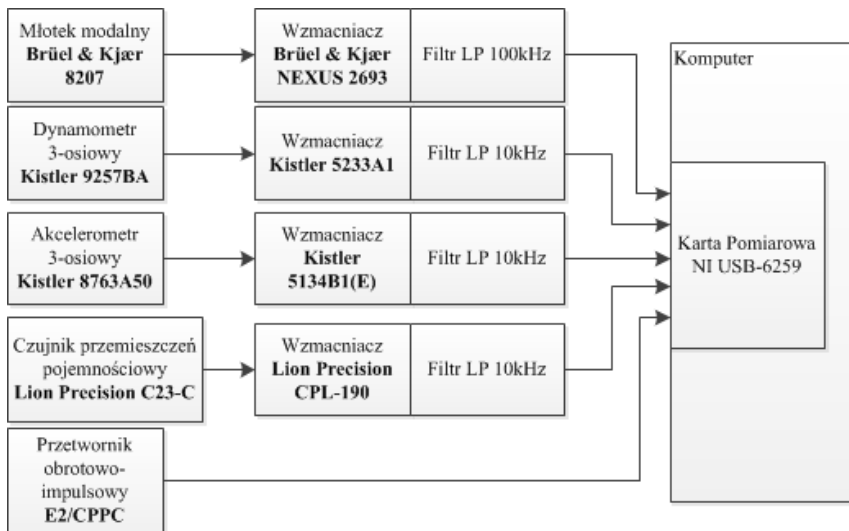
procesu skrawania najczęściej uwzględniany jest parametr zależny od sztywności dynamicznej procesu skrawania. W wielu pracach jednak wykazano, że siła skrawania musi być zależna od zmian prędkości tego ruchu, a więc i od dynamicznego współczynnika tłumienia [3,5,6].

Niniejsza praca nie jest pracą teoretyczną, a pomiarem dynamicznych współczynników sił skrawania, dzięki wykorzystaniu urządzenia do pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania [4,5,6].

W ramach tego artykułu podjęto się zadania wyznaczenia dynamicznych współczynników sił skrawania w zależności od dwóch skrajnych stanów krawędzi skrawającej narzędzia tokarskiego. Pierwszy stan to krawędź skrawająca nowa, nieużywana, ogólnie mówiąc ostra oraz drugi stan – krawędź ostrza stępiona, czyli w stanie dla którego osiągnęła maksymalny wskaźnik zużycia i powinna być wycofana z dalszego procesu skrawania. Badania przeprowadzono dla stałej wartości posuwu i głębokości skrawania oraz pełnego zakresu prędkości skrawania, przewidzianej dla wybranego gatunku płytki węglkowej pokrywanej.

## 2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Jak wspomniano wcześniej, w eksperymencie za cel badań postawiono sobie pomiar i analizę porównawczą wyników uzyskanych podczas toczenia dla wybranych parametrów skrawania. Przy czym przeprowadzono dwie serie eksperymentów – pierwszy nową krawędzią skrawającą i drugi – narzędziem, którego krawędź skrawająca jest u kresu okresu trwałości.



Rys. 1. Schemat toru pomiarowego

Badania prowadzono na tokarce uniwersalnej TUD 50. Przedmiotem obrabianym był wałek stalowy o gatunku 45, średnicy 109,5mm oraz długości 1200mm. Do badań użyto noża tokarskiego CTGPR 2525 M 16 z płytką TPGN 160304 gatunku 1025 (węgiel spiekany pokryty cienką warstwą TiAlN z użyciem metody PVD). Geometria narzędzia była następująca:  $\kappa_r = 90^\circ$ ,  $\gamma_o = 5^\circ$ ,  $\alpha_o = 6^\circ$ . Do przeprowadzenia pomiarów użyto urządzenia pomiarowego wraz czujnikami opisanego w [4]. Najważniejsze elementy składowe toru pomiarowego przedstawiono na rys. 1, w jego skład wchodził dynamometr płytowy, akcelerometr, czujnik przemieszczeń oraz przetwornik obrotowo-impulsowy. Sygnały rejestrowano za pomocą karty pomiarowej NI USB-6259 z częstotliwością 40kS/s na każdym kanale.

Do przeprowadzenia eksperymentu wybrano następujące parametry skrawania:

- $a_p=2,5\text{mm}$ ;
- $f=0,08\text{mm/obr}$ ;
- $v_c=20,40,60,80,100,120,140,160,180,200,220,240,260\text{m/min}$ .

Podczas pierwszej serii pomiarów użyto nowej krawędzi skrawającej, natomiast w drugiej serii pomiarów użyto identycznej płytki skrawającej, którą wcześniej skrawano ten sam wałek, przy głębokości skrawania 2,5mm, z posuwem 0,13mm/obr i prędkością 205m/min, aż do uzyskania zużycia wskaźnika  $VB_{Bmax}=0,34\text{mm}$ .



Rys. 2. Zdjęcie nowej krawędzi skrawającej oraz z zużyciem  $VB_{Bmax}=0,34\text{mm}$

### 3. WYNIKI BADAŃ

Do analizy użyto modelu siły skrawania [2] w którym rozdzielony jest wpływ grubości warstwy skrawanej  $h$  oraz prędkości drgań  $r_t'$  na siłę posuwową za pomocą prostego równania regresji.

$$F_r = b(F_0 + k_{rd} h) + b c_{rd} r_t' = F_{rk} + F_{rc} \quad (1)$$

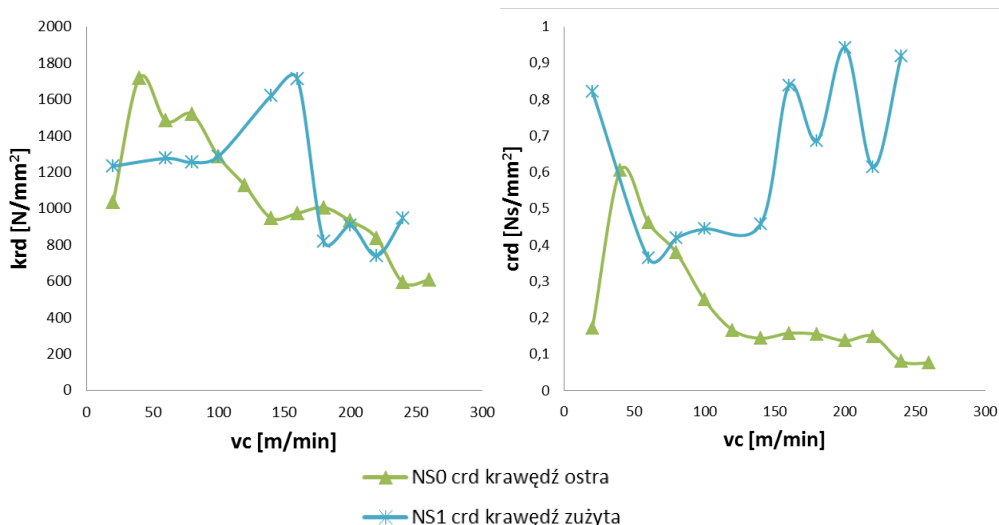
gdzie  $F_r$  – siła skrawania działająca na kierunku  $r$  posuwu;  $h$  i  $b$  – odpowiednio grubość i szerokość warstwy skrawanej,  $F_0$ ,  $k_{rd}$ ,  $c_{rd}$  – współczynniki sił skrawania,  $F_{rk}$  – składowa siły skrawania zależna od przemieszczeń względnych między narzędziem a przedmiotem obrabianym,  $F_{rc}$  – składowa siły skrawania zależąca od prędkości względnych drgań układu narzędzie-przedmiot obrabiany  $r_t'$ .

W tabeli 1 zebrano dla których prędkości skrawania wystąpiły drgania samowzbudne i oznaczono je literą (D), a dla których drgania nie wystąpiły (N).

Tabela 1. Zestawienie występowania drgań samowzbudnych (D) lub wymuszonych za pomocą młotka modalnego (N)

vc	m/min	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
$VB_{Bmax} = 0,00\text{mm}$		N	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
$VB_{Bmax} = 0,34\text{mm}$		N	D	D	D	D	N	N	N	N	N	N	N	N

Na rys. 3 przedstawiono uzyskane uśrednione wyniki dynamicznych współczynników sił skrawania, obliczonych dla kierunku posuwu  $r$ . Z wykresu współczynnika zależnego od sztywności można odczytać, że poza obszarem prędkości skrawania 120 – 160m/min wyniki są dość zbliżone dla krawędzi nowej i stępionej. We wspomnianym zakresie prędkości dla zużytego narzędzia przestały występować drgania samowzbudne, co ma właśnie swoje odzwierciedlenie w uzyskanych wynikach współczynnika sztywności.



Rys. 3. Wartości średnie dynamicznych współczynników sztywności  $k_{rd}$  oraz tłumienia  $c_{rd}$  wyznaczone podczas skrawania nieswobodnego, dla siły Fr

Ale drgania samowzbudne nie wystąpiły również dla prędkości powyżej 160m/min. W tym miejscu warto przeskoczyć na wykres współczynnika tłumienia, dla którego widoczny jest wyraźny przyrost wartości właśnie dla prędkości skrawania

powyżej 160m/min. Zjawisko to w ogóle nie występowało dla nowej krawędzi skrawającej, drgania samowzbudne występowały dla całego przyjętego spektrum prędkości skrawania, a więc zmianę wartości tych współczynników należy uznać za zależną od stanu zużycia ostrza.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W przedstawionych wynikach badań jednoznacznie wykazano, że charakter sił skrawania jest zależny od stanu krawędzi skrawającej. Dla zastosowanej metody badawczej i przyjętych parametrów skrawania drgania samowzbudne występowały prawie dla wszystkich parametrów skrawania podczas toczenia nożem z nową krawędzią skrawającą. Natomiast dla płytki ze zużyciem na powierzchni przyłożenia około 0,34mm, dla prędkości skrawania powyżej 100m/min proces stabilizował się. Znane jest powszechnie zjawisko stabilizacji procesu skrawania wraz ze zmniejszaniem prędkości obrotowej [7]. W przeprowadzonym eksperymencie należało zejść z prędkością skrawania do około 20m/min, aby uzyskać stabilne parametry obróbki lub dla narzędzia zużytego podnieść tę prędkość do ponad 120m/min, bo dla wyższych prędkości proces również się stabilizował. Wykazano zatem ponad wszelką wątpliwość, że wpływ na charakter siły skrawania ma bezpośrednio stopień zużycia płytki, a pośrednio geometria ostrza. Fakt ten ma swoje odzwierciedlenie w przyjętym modelu matematycznym dynamicznej charakterystyki procesu skrawania, który należy bezsprzecznie uzależnić od współczynnika tłumienia. Ponadto po raz kolejny wykazano, że dla przyjętej metody badawczej [4] opracowano możliwość pomiaru dynamicznych współczynników sił skrawania.

#### 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

#### LITERATURA

- [1] ALTINTAS, Y., *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press, 2000.
- [2] BUDAK, E., ALTINTAS, Y., ARMAREGO, E.J.A, *Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118:216-224.
- [3] JEMIELNIAK, K., *Modelling of Dynamic Cutting Coefficients in Three - Dimensional Cutting*, Int. J. Mach. Tools Manufact, 1992, 32/4:509-519.
- [4] JEMIELNIAK, K., NEJMAN, M., ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA, D., WYPYSIŃSKI, R., Device for dynamic components of cutting force measurement, Patent P-398818, April 15, 2012,.
- [5] JEMIELNIAK K., NEJMAN M., ŚNIEGULSKA-GRĄDZKA D., Wypysiński R.; *Wyznaczanie dynamicznych współczynników sił skrawania metodą doświadczalną*, Mechanik, 2013, ISSN 0025-6552, pp. 708, 563-570.

- [6] 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, 1:159-166.
- [7] KEGG, R.L., *Chatter Behavior at Low Cutting Speeds*, CIRP Annals, 1969, 17:97-106.
- [8] KURATA, Y., MERDOL, S.D., ALTINTAS, Y., SUZUKI, N., SHAMOTO, E., *Chatter Stability in Turning with In Process Identified Process Damping*, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2010, 4/6:1107-1118.
- [9] SELLMEIER, V., DENKENA, B., *High speed process damping in milling*, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2012, 5:8–19.
- [10] TUNC, L.T., BUDAK, E., *Effect of cutting conditions and tool geometry on process damping in machining*, International Journal of Machine Tools&Manufacture, 2012, 57:10–19.