

*Zużycie frezów, pomiary drgań, funkcja obwiedni.
Cutter wear, vibration measurements, envelope function.*

Piotr WOLSZCZAK ¹
Stanisław PŁASKA ²
Tomasz KORBIEL ³
Daniel STACHOWICZ ⁴

XXXIX. MONITOROWANIE POCZĄTKOWEGO ZUŻYCIA FREZÓW WĘGLIKOWYCH O OSTRYCH KRAWĘDZIACH SKRAWAJĄCYCH

W artykule przedstawiono wyniki monitorowania zużycia nowych narzędzi, którymi były frezy z węglików spiekanych. Testowano przydatność par materiałów pochodzących od różnych producentów o zawartości kobaltu 10 % i 12 %. Obserwację prowadzono z użyciem czujników drgań umieszczonych na głowicy frezarki sterowanej numerycznie. Zaobserwowano przyspieszone zużycie narzędzi na początku ich pracy

INITIAL WEAR MONITORING OF SHARP CARBIDE CUTTING TOOLS

The article presents the monitoring results of the wear of new tools, which were cemented carbide cutters. There are tested suitability of pairs of materials derived from different manufacturers with a cobalt content of 10 % and 12 %. Observation was carried out using vibration sensors placed on the head of numerically controlled milling machine. Tool wearing was observed at the beginning of their work.

1. WSTĘP

Jednym ze sposobów zużycia narzędzi skrawających są wykruszenia i wyszczerbienia krawędzi ostrzy skrawających. Powstają one na skutek działania sił skrawania na powierzchnię natarcia [1, 2]. W trakcie odrywania warstwy materiału powstają drgania o charakterze samowzbudnym [3]. Kumulujące się drgania przyczyniają się do wykruszania ostrzy poprzez zmianę charakteru i zwiększenie wartości sił skrawania, które pozostają nierozproszone oraz poprzez zmęczenie materiału. W przypadku materiałów węglkowych sposób początkowego docierania narzędzi może być znaczący dla dalszej przydatności narzędzia [4].

¹ Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny; 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36.
tel: + 48 81 5384 267, e-mail: p.wolszczak@pollub.pl

² Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny; 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, e-mail: automat@pollub.pl

³ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tomasz.korbiel@agh.edu.pl

⁴ J.G. Service, ul. Kuźnicza 4, 21-040 Świdnik, tel. +48 81 468 00 30, fax. +48 81 746 57 88, info@jgservice.pl

W warunkach warsztatowych początkowe zużycie obserwowane jest za pomocą słuchu operatora maszyny oraz na podstawie oględzin narzędzi i obrobionej powierzchni po wykonaniu kilku pierwszych przejść.

Coraz częściej w warunkach warsztatowych wykorzystywane są przyrządy stosowane dotychczas podczas badań laboratoryjnych [5]. Producenci narzędzi skrawających stosują przyrządy elektroniczne do określania charakterystyk pracy ich produktów oraz doboru optymalnych parametrów pracy [6].

Do pomiaru sił powstających w strefie skrawania wykorzystuje się czujniki drgań połączone z systemem rejestracji, przetwarzania i wizualizacji [7]. W przypadku narzędzi obrotowych czujniki umieszczone są na elementach maszyny lub materiale. Na podstawie wartości zarejestrowanych przyspieszeń wnioskuje się o zmienności sił oddziałujących na narzędzie.

Stosowanie takiej formy monitorowania wiąże się z koniecznością opracowania metody pomiaru i procedur pomiarowych w celu uniknięcia różnego rodzaju błędów systematycznych, związanych np. ze zmianą lokalizacji czujników.

Autorzy tekstu prowadzili badania porównawcze grup narzędzi o jednakowej geometrii wykonanych z materiałów pochodzących od różnych producentów, o jednakowej zawartości kobaltu 10 % i 12 %. Były to cztery grupy frezów o średnicy 6 mm wykonanych z materiałów pochodzących od dwóch producentów (A10, A12, B10 i B12).

Celem testu było sprawdzenie, czy wprowadzenie nowego materiału nie wpłynie niekorzystnie na pracę narzędzi oraz zweryfikowanie przydatności układu pomiarowego z czujnikami drgań.

Kolejnym celem testu była obserwacja zachowania narzędzi surowych, niepoddanych stopniowi krawędzi ostrzy skrawających. Takie ostrza podatne są na wykruszenia.

2. METODYKA

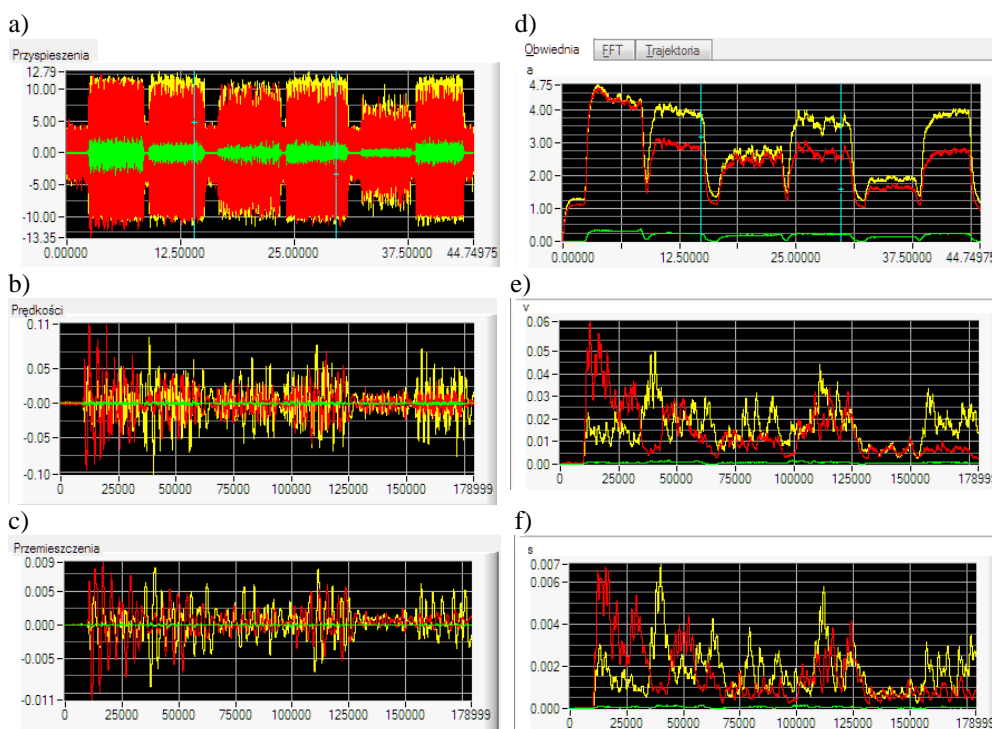
Podczas obserwacji zastosowano system pomiarowy zbudowany w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki AGH w Krakowie. Głównym założeniem projektowanego systemu pomiarowego była możliwość obserwacji parametrów skorelowanych ze stanem narzędzia skrawającego. Ze względu na możliwości pomiarowe, dostępność układów sensorycznych oraz zawartość informacyjną sygnału pomiarowego zrealizowany system opiera się na pomiarze przyspieszenia czujnika umieszczonego w pobliżu narzędzia skrawającego. Zastosowano układ pomiarowy z trzema czujnikami akcelerometrycznymi. Ze względu na charakter źródła drgań, zastosowane czujniki powinny charakteryzować się odpowiednio szerokim pasmem pomiarowym. Duża dynamika sygnału oraz przemysłowe warunki wymagają odpowiednio dobranych torów pomiarowych. Do badań użyto czujników Hansford Sensor typu HS-102 o zakresie pomiarowym do 16kHz i czułości 100mV/g. Do akwizycji danych zastosowano kartę pomiarową firmy National Instruments typu NI-USB6341 wyposażoną w dodatkowe zasilacze czujników. Karta ta charakteryzuje się 16-bitowym przetwarzaniem multipleksowym o prędkości 500kS/s. Parametry te odpowiadają wymaganiom pomiarowym. Aplikacja sterująca oraz analizy danych pomiarowych zrealizowana została w środowisku LabView z zastosowaniem struktury wielowątkowej.

Rejestrowany sygnał przyspieszenia jest całkowany w celu wyznaczenia przebiegów zmian prędkości i przemieszczenia. Scałkowane sygnały są filtrowane, za pomocą górno-przepustowego filtra Butterworth'a, w celu uzyskania zerowej wartości średniej sygnałów.

W ostatniej fazie algorytmu usuwane są początkowe próbki sygnałów, w celu odrzucenia niestabilnych wartości wynikających z filtracji.

Za pomocą tak przygotowanego oprogramowania badania stanowiskowe są powtarzalne, a stosowanie procedur pomiarowych eliminuje błędy systematyczne. Po uruchomieniu systemu pomiarowego oraz stanowiska badawczego umieszcza się czujniki w punktach pomiarowych. Montaż czujników przeprowadza się za pomocą specjalnych magnesów.

W trakcie testów czujniki zamocowano na wrzecionie obrabiarki sterowanej numerycznie w kierunkach X i Y. Trzeci czujnik przymocowano do materiału w kierunku X.



Rys. 1. Przykład zarejestrowanego sygnału przyspieszeń (a), po scałkowaniu przebiegów prędkości (b) i przemieszczeń (c) oraz odpowiadających im przebiegów przekształconych za pomocą funkcji obwiedni(d, e, f), obejmującego 6 przejść narzędzia [wyniki własne]

Pracujący system wyświetla aktualny sygnał, bez jego akwizycji i umożliwia weryfikację prawidłowości połączeń oraz rozmieszczenia czujników. Po rozpoczęciu pomiarów następuje akwizycja danych, rozpoczyna się proces obróbki. Po zakończeniu programu frezarki należy zatrzymać akwizycję sygnału. Wówczas wyświetlany jest cały zmierzony sygnał. Zarejestrowany sygnał zapisywany jest do pliku w celu prowadzenia dalszych analiz numerycznych.

Dalsze przetwarzanie przebiegów prowadzono z wykorzystaniem programu przygotowanego w środowisku LabWindows CVI w Katedrze Automatykacji PL. Przykład zarejestrowanego sygnału przedstawiono na rysunku 1.

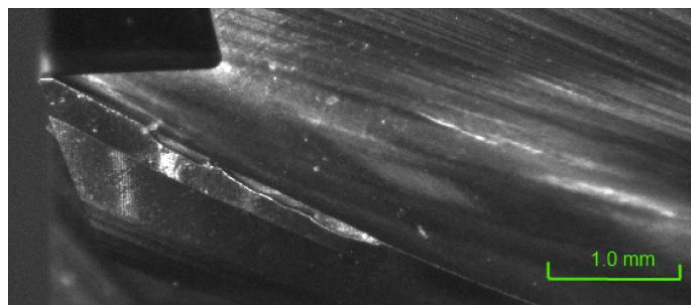
W celu poprawienia czytelności przebiegów zastosowano metodę filtracji rejestrowanych sygnałów za pomocą tzw. funkcji obwiedni (ang. envelope), której przykład działania przedstawiono na rysunku 1d.

Materiał badawczy stanowiły nowe frezy o średnicy 6 mm i 4 ostrzach. Frezy wykonano z materiałów węglkowych. Obrabiany element wykonany był ze stali 40HM. Wykonywano przejścia w obu kierunkach usuwając warstwę materiału o szerokości 1 mm i wysokości 3 mm.

W pierwszym etapie testu dokonano doboru parametrów skrawania. Dla grup narzędzi wykonanych z materiału o zawartości kobaltu 10% (grupy A10 i B10) przyjęto prędkość średnią skrawania $v_c = 0,04 \text{ m/min}$. Natomiast dla narzędzi o zawartości Co 12%, $v_c = 0,025 \text{ m/min}$.

Prędkość skrawania modyfikowano pomiędzy kolejnymi przejściami zwiększając i zmniejszając o $0,005 \text{ m/min}$ w celu zweryfikowania wstępnie dobranych parametrów skrawania.

Po zakończeniu testów obróbki przeprowadzono makroskopowe obserwacje ostrzy frezów i wykonano pomiary długości wykruszeń. Przykładowy obraz użycia przedstawiono na rysunku 2.



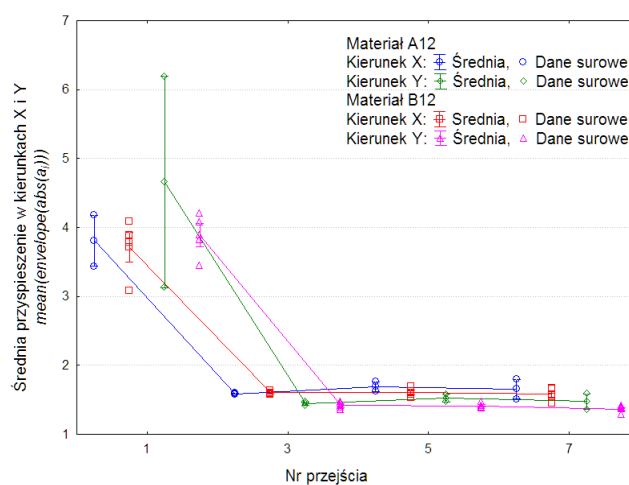
Rys. 2. Przykład pomiaru długości wykruszeń na ostrzu freza [wyniki własne]

Analiza wyników polegała porównaniu uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń po zastosowaniu filtracji funkcją obwiedni. Do analizy użyto fragmentów zapisów z wyłączeniem fazy wejścia i wyjścia narzędzia w materiał.

Funkcja obwiedni zastosowana w badaniu oparta została na filtrze średniej ruchomej (ang. moving average) wykonanej na szeregu wartości absolutnych zarejestrowanych przyspieszeń $|x|$ [8, 9]. Przy czym waga, z jaką włączenia wartości historycznych x_{i-1} do kolejnych wartości szeregu x_i wynosiła 0,99. Zaletą stosowania średniej ruchomej jest filtrowanie błędów przypadkowych i wibracji o wysokiej częstotliwości. Przetworzenie sygnału wiąże się ze stratą części zwartych w nim informacji, ale znacząco poprawia czytelność wykresu przebiegu i prognozowanie rezultatów w trakcie wykonywania testów. Szczególnie w przypadku wizualizacji na jednym wykresie sygnałów pochodzących z kilku czujników drgań.

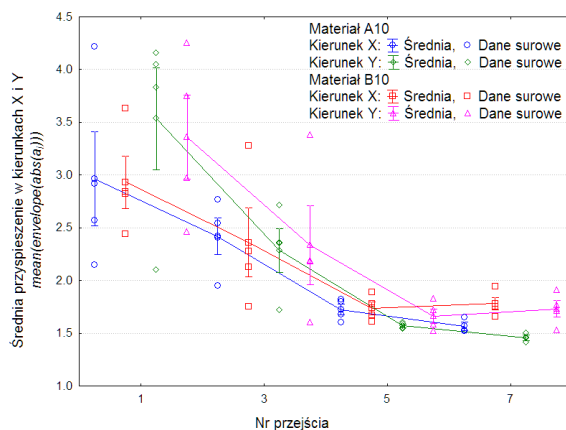
3. WYNIKI

Obserwując średnie wartości amplitud przyspieszeń (po zastosowaniu opisanej wyżej filtracji) zauważyć można gwałtowny ich spadek w trakcie obróbki współbieżnej (przejście początkowe wykonywano w tym kierunku). Spadek ten oznaczający przyspieszone zużycie w początkowym okresie używania narzędzi zaobserwowano w przypadku narzędzi wykonanych z materiału o zawartości 12 % Co (rys. 3) oraz 10 % Co (rys. 4).



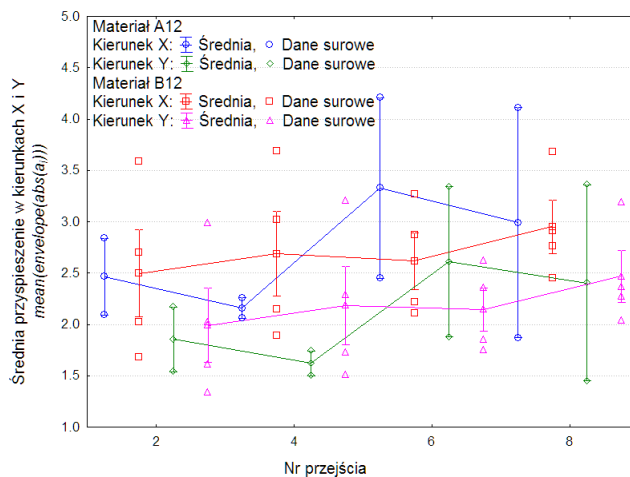
Rys. 3. Wykres średnich wartości amplitud przyspieszeń zarejestrowanych w kierunkach X i Y w trakcie frezowania współbieżnego narzędziami o zawartości Co 12%. Wąsy – przedziały ufności. Punkty – dane surowe [wyniki własne]

Porównując wyniki uzyskane dla obydwu rodzajów materiałów zauważyć można niższe o około 25% wartości średnich amplitud podczas pierwszego przejścia w przypadku materiałów o niższej zawartości kobaltu (rys. 4) zarejestrowanych w obu kierunkach (X i Y) niż w przypadku Co 12% (rys. 3).

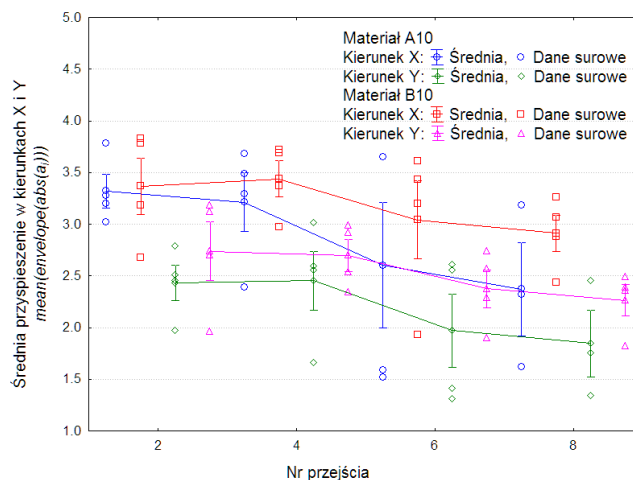


Rys. 4. Wykres średnich wartości amplitud przyspieszeń zarejestrowanych w kierunkach X i Y w trakcie frezowania współbieżnego narzędziami o zawartości Co 10%. Wąsy – błąd standardowy. Punkty – dane surowe [wyniki własne]

W przypadku wyników zarejestrowanych w trakcie frezowania przeciwbieżnego, które wykonywane były po pierwszym przejściu współbieżnym również zaobserwowano podobną zależność średnich wartości amplitud od zawartości kobaltu (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Wykres średnich wartości amplitud przyspieszeń zarejestrowanych w kierunkach X i Y w trakcie frezowania przeciwbieżnego narzędziami o zawartości Co 12%. Wąsy – przedziały ufności. Punkty – dane surowe [wyniki własne]



Rys. 6. Wykres średnich wartości amplitud przyspieszeń zarejestrowanych w kierunkach X i Y w trakcie frezowania przeciwbieżnego narzędziami o zawartości Co 12%. Wąsy – przedziały ufności. Punkty – dane surowe [wyniki własne]

W przypadku grup próbek o zawartościach 10 i 12% Co uzyskano podobne wyniki dla materiałów pochodzących od różnych producentów. Przeprowadzona analiza wariancji nie wykazała związku pomiędzy amplitudami zarejestrowanymi w poszczególnych przejściach a źródłem pochodzenia materiałów obu grup materiałowych.

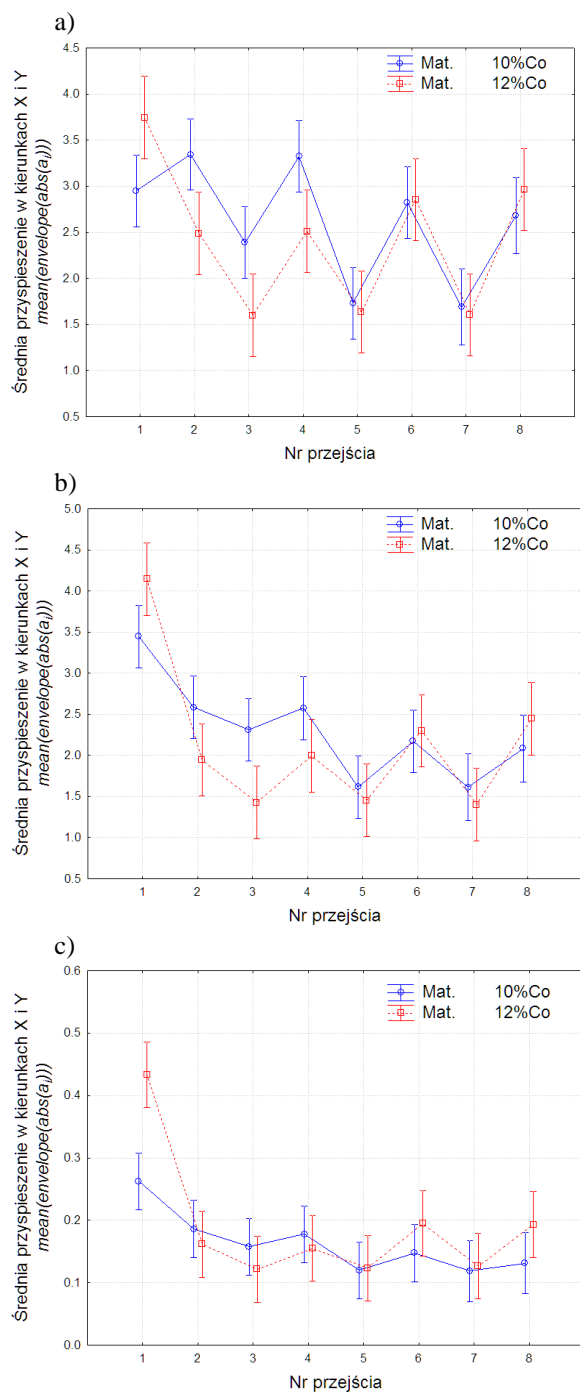
Natomiast podczas analizy ANOVA wykazano istotne różnice pomiędzy: amplitudami $|a_{sr}|$ zarejestrowanymi w poszczególnych przejściach (wpływ docierania), lokalizacją czujników (kierunki czujników to X i Y, a kierunek posuwu to Y) (tab. 1).

Tab. 1. Jednowymiarowe testy istotności średnich wartości absolutnych amplitud zarejestrowanych za pomocą czujników umieszczonych na wrzecionie w kierunku X i Y oraz na materiale w kierunku X , poziom istotności przyjęto z $p < 0,05$ (wyniki własne); SS - suma kwadratów odchyłeń od średniej; df - liczba stopni swobody, MS - średnie kwadraty ANOVA, F - test dwu wariancji

		SS	df	MS	F	p
X (wrzeciono)	Wyraz wolny	687	1	687	2261	0.00
	Nr Przejścia	40	7	5.64	18.6	0.00
	Materiał	0.99	1	0.99	3.26	0.07
	NrP*Mat.	8.38	7	1.20	3.94	0.00
	Błąd	29	94	0.30		
Y (wrzeciono)	Wyraz wolny	533	1	533	1797	0.00
	Nr Przejścia	48.91	7	6.99	23.57	0.00
	Materiał	0.70	1	0.70	2.37	0.13
	NrP*Mat.	6.90	7	0.99	3.32	0.00
	Błąd	27.86	94	0.30		
X (materiał)	Wyraz wolny	3.34	1	3.34	789	0.00
	Nr Przejścia	0.50	7	0.072	17.05	0.00
	Materiał	0.02	1	0.018	4.35	0.04
	NrP*Mat.	0.11	7	0.016	3.73	0.00
	Błąd	0.40	94	0.004		

Zaobserwowana w trakcie analizy statystycznej jednoczesna zgodność wyników w grupach próbek materiałowych i różnice wynikające z lokalizacji czujników, kierunku obróbki i numeru przejścia, pozwalają przypuszczać, że przyjęta metoda i procedura pomiarowa są wystarczające do monitorowania zużycia frezów w fazie docierania.

Na rysunku 7 przedstawiono średnie $|a_{i(10)}|$ i $|a_{i(20)}|$ obliczone z fragmentów przebiegów obejmujących frezowanie bez wejścia i wyjścia narzędzia z materiału, które poddano filtracji funkcją obwiedni. Średnie obliczono dla grup różniących się zawartością kobaltu łącząc wyniki próbek pochodzących od różnych producentów (A10 z B10 oraz A12 z B12).

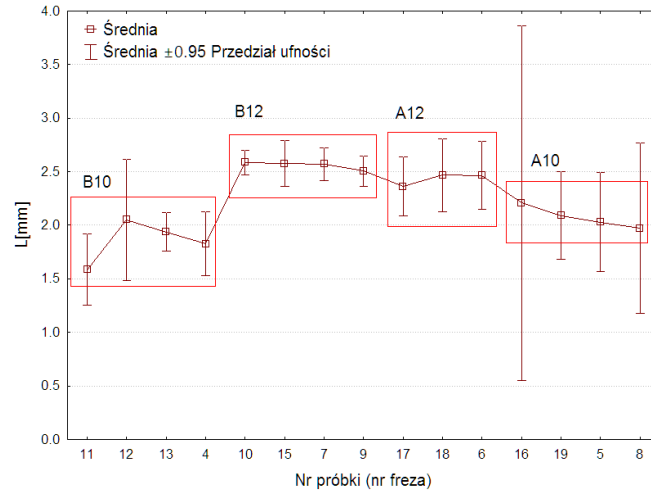


Rys. 7. Wartości średnich absolutnych amplitud zarejestrowanych za pomocą czujnika umieszczonego na wrzecionie w kierunku X(a), Y (b) oraz na materiale w kierunku X (c) w grupach materiałowych o zawartości 10 i 12% Co, pionowe słupki oznaczają 0,95 przedziały ufności:

a) efekt $F(7,94)=3,94$,
 $p=0,0008$,

b) efekt $F(7,94)=3,32$,
 $p=0,00331$,

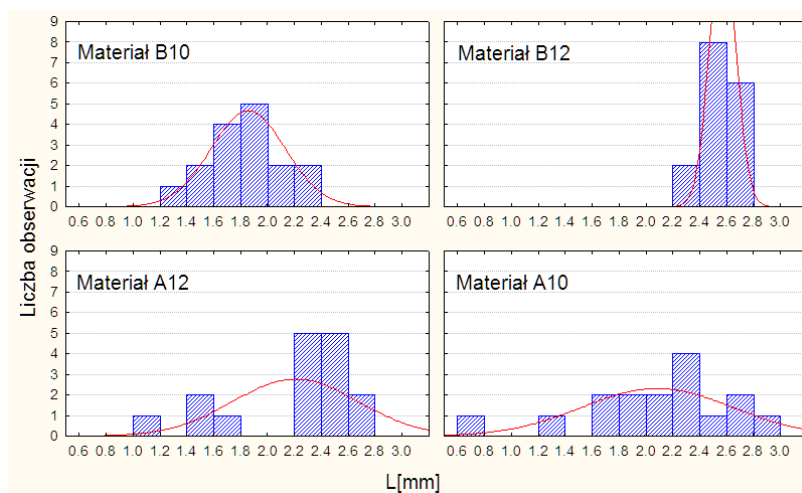
c) efekt $F(7,94)=3,73$,
 $p=0,00132$ [wyniki własne]



Rys. 8. Zgrupowane wg rodzaju materiału średnie długości L [mm] (oś pionowa) wykruszeń wzdłuż krawędzi ostrzy poszczególnych frezów (oś pozioma) [wyniki własne]

Wyniki uzyskane podczas pomiaru długości krawędzi wykruszonej L przedstawiono na rysunku 8. Wartości uśredniono dla każdego freza (4 ostrza) i zgrupowano według rodzaju materiału. Uzyskane wyniki tworzą wyraźne grupy zależne od producenta materiału oraz zależne od grupy materiałowej. W jednym przypadku, frez nr 16 z grupy A10, zaobserwowano duże różnice pomiędzy rozpatrywanymi długościami L . Trzy ostrza posiadały wykruszenia na długości bliskiej głębokości skrawania, a jedna krawędź ostrza została tylko nieznacznie uszkodzona. Porównując grupy frezów według zawartości kobaltu zauważyć można większy stopień zużycia w przypadku frezów o zawartości Co 12%. Interpretując tę sytuację zachować należy ostrożność, bo mimo, że narzędzia pracowały na jednolitej drodze, to pamiętać należy, że w przypadku obu grup materiałów dobrano różne parametry skrawania.

Na rysunku 9 zaprezentowano rozkłady długości wykruszeń L [mm] w poszczególnych grupach materiałowych. Narzędzia wykonane z materiałów B10 i B12 charakteryzują się powtarzalnością (rozkład posiadają pojedyncze mody, kształty rozkładów są zbliżone do krzywej rozkładu normalnego). Natomiast próbki frezów wykonanych z materiałów K10F oraz CKi12 charakteryzują się większym rozrzutem, a uzyskane rozkłady są wyraźnie niekompletne (występują odstępy pomiędzy kategoriami). Oznaczać to może niższą jakość narzędzi wykonanych z materiałów dotychczas stosowanych w Zakładzie Producenta w porównaniu do materiałów nowych, a obniżenie jakości spowodowane może być przez co najmniej kilka przyczyn będących źródłem błędów systematycznych. Powodem tego może być także wzrost zmienności wynikający z błędu przypadkowego.



Rys. 9. Rozkłady długości wykruszeń mierzonych wzdłuż krawędzi frezów o średnicy 6 mm wykonanych z różnych materiałów [wyniki własne]

4. WNIOSKI

Monitorowanie zużycia obrotowych narzędzi skrawających może być prowadzone z użyciem czujników drgań. Nie można jednak założyć, że jest to metoda wystarczająca. W określonych przypadkach konieczne może być zastosowanie dodatkowo innych metod (pomiar temperatury, dźwięku, wizyjne pomiary geometryczne) [1]. Potwierdza to uzyskanie powtarzalnych początkowych fragmentów krzywej zużycia Lorentza.

Zmiany położenia czujników powodować mogą powstawanie błędy systematycznego. Zastosowanie czujników drgań wydaje się wygodną metodą monitorowania pracy narzędzi, konieczne jest jednak wypracowanie stosowanej metodyki eliminującej błędy związane z lokalizacją czujników. Dla takich potrzeb rozpoczęte zostały badania porównawcze w celu uzyskania powtarzalnych wyników. Zaproponowana metoda i procedura pomiarowa mogą być stosowane w Zakładzie Producenta narzędzi. Metoda ta w wygodny sposób dostarcza wyniki, które można interpretować w warunkach warsztatowych.

Testy porównawcze narzędzi wykonanych z materiałów nowych i dotychczas stosowanych w Zakładzie Producenta umożliwiły podjęcie decyzji o ich zastosowaniu w procesie produkcji. Nowe materiały narzędziowe, charakteryzujące się wyższą powtarzalnością mogą zastąpić dotychczas stosowane surowce. Informacje uzyskane podczas testów wykorzystane mogą być podczas doboru rozwiązań do specjalnych wymagań klientów.

Ostrza frezów węglkowych powinny być wstępnie lekko „stępiane”, aby podnieść ich trwałość, ponieważ wykonane są one z kruchego materiału i ulegają wykruszeniom, co przyczynia się do przyspieszonego całkowitego zniszczenia narzędzia. Innym sposobem zapobiegania termu rodzajowi zużycia jest stosowanie węglków spiekanych o niewielkiej ziarnistości (1 – 4 μm).

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Sarhan A. i in.: *Interrelationships between cutting force variation and tool wear in end-milling*. Journal of Materials Processing Technology. s. 229-235, 2001, Tom 109, 3.
- [2] Choudhury S.K., Rath S.: *In-process tool wear estimation in milling using cutting force model*. Journal of Materials Processing Technology. s. 113-119, 2000, Tom 99, 1-3.
- [3] Marchelek K.: *Dynamika Obrabiarek*. Warszawa, WNT, 1974.
- [4] Kupczyk M. J.: *Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwzuzyciowymi*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2009.
- [5] Dimla E., Dimla Snr.: *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. s. 1073-1098, 2000, Tom 40, 8.
- [6] Ghani J.A. i in.: *Monitoring online cutting tool wear using low-cost technique and user-friendly GUI*. Wear. s. 2619-2624, 2011, Tom 271, 9-10.
- [7] Kucharski T.: *System pomiaru drgań mechanicznych*. Warszawa, WNT, 2002.
- [8] Smith S. W.: *Digital Signal Processing*. Burlington, MA, USA: Newnes, 2003.
- [9] Shao H., Wang H.L., Zhao X.M.: *A cutting power model for tool wear monitoring in milling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. s.1503-1509, 2004, Tom 44, 14.