

**Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski; mgr inż. Paweł Pieško**

Katedra Podstaw inżynierii Produkcji  
Politechnika Lubelska  
Ul. Nadbystrzycka 36D; 20-618 Lublin, Polska  
e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl; p.piesko@pollub.pl

## **Zużycie ostrzy frezów podczas obróbki wysokokrzemowego, odlewniczego stopu aluminium AlSi21CuNi**

**Słowa kluczowe:** *siluminy, zużycie narzędzi, trwałość narzędzi, siły skrawania, chropowatość*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań zużycia ostrzy narzędzi frezarskich podczas obróbki wysokokrzemowych siluminów. Jako przedstawiciela tego rodzaju materiałów wybrano stop EN AC- $\text{AlSi21CuNi}$ . Stopy aluminium o zawartości Si  $> 12\%$  określane są jako trudnoskrawalne, ze względu na zwiększone zużycie ściernie ostrzy, wywołane oddziaływaniem wydzieleni krzemu. Ma to niekorzystny wpływ na proces skrawania, pogarsza jakość i dokładność wykonywanych elementów. Istotne jest więc aby określić trwałość ostrza narzędzi i w momencie jego nadmiernego zużycia przerwać proces skrawania.

### **1. Wstęp**

Stopy aluminium charakteryzują się dobrą skrawalnością, trudno ją jednak porównywać ze skrawalnością innych metali. Wynika to z właściwości stopów aluminium, takich jak duży współczynnik rozszerzalności liniowej oraz relatywnie mały współczynnik sprężystości liniowej [6, 11].

Istnieje bardzo wiele gatunków stopów aluminium, dlatego dla ułatwienia doboru warunków obróbki, podzielono je na grupy. Głównymi kryteriami podziału jest zawartość krzemu, rodzaj przeprowadzonej obróbki cieplnej (obrabiane cieplnie i umacniane zgniotem) oraz przeznaczenie stopów (do przeróbki plastycznej i odlewnicze) [6, 11, 12]. Wyróżnia się następujące grupy stopów aluminium:

- grupa I — stopy o zawartości Si  $\leq 2\%$ ,
- grupa II — stopy o zawartości  $2\% < \text{Si} \leq 12\%$ ,
- grupa III — stopy o zawartości Si  $> 12\%$ .

Stopy z grupy II są bardzo dobrze skrawalne i nie sprawiają większych trudności w obróbce. Natomiast stopy z grupy I i III charakteryzują się gorszą skrawalnością. Pierwsze z nich ze względu na dużą plastyczność oraz skłonność do tworzenia narostu, czy wręcz „zalepiania” rowków wiórowych narzędzi obrotowych. Natomiast podczas obróbki stopów z grupy III, wydzielenia krzemu o wysokich właściwościach ściernych, powodują zwiększone zużycie narzędzi [2, 9, 11]. Stopy te posiadają jednak wiele korzystnych właściwości eksploatacyjnych takich jak wysoka wytrzymałość, odporność na korozję i zużycie ściernie oraz mała rozszerzalność cieplna. Charakteryzują się ponadto doskonałą lejnością. Wszystkie te cechy sprawiają, że znalazły one zastosowanie głównie w produkcji części silników spalinowych oraz sprężarek, pomp i elementów układów hamulcowych [5, 7, 9, 11].

W celu określenia wartości zużycia stosuje się tzw. wskaźniki zużycia, które za pomocą wielkości geometrycznych opisują zużycie ostrza na powierzchniach przyłożenia i

natarcia (rys. 1). Rozróżnia się następujące wskaźniki zużycia powierzchni przyłożenia [3, 13]:

$VB_B$  - średnia szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia;

$VB_{Bmax}$  - największa szerokość pasma zużycia powierzchni przyłożenia;

$VB_C$  - szerokość pasma zużycia naroża;

$VBA$  - szerokość pasma zużycia w strefie A;

$VB_N$  - szerokość zużycia wrębowego.

Natomiast wskaźniki zużycia powierzchni natarcia to [3, 13]:

$KT$  - głębokość żłobka (największa głębokość żłobka na powierzchni natarcia);

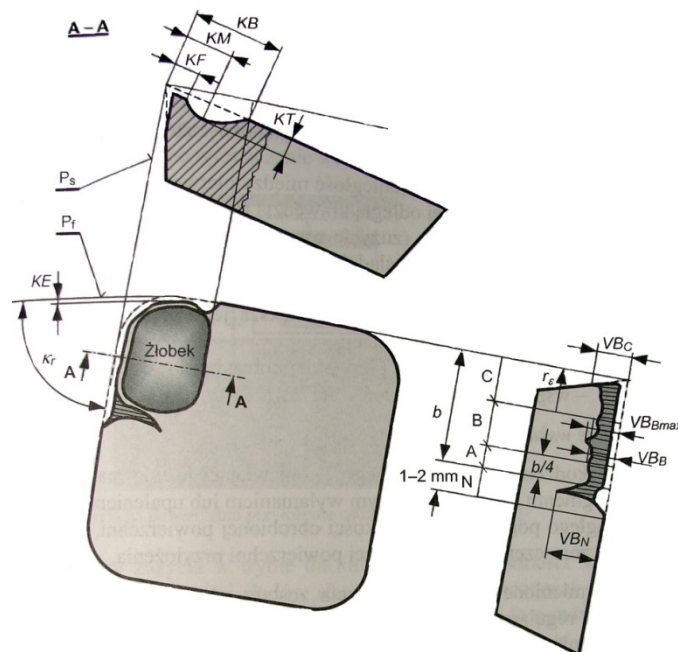
$KB$  - szerokość żłobka (odległość między pierwotną krawędzią skrawającą a najbardziej odległą krawędzią rowka na powierzchni natarcia);

$KE$  - cofnięcie naroża (zużycie promieniowe) określane w płaszczyźnie podstawowej  $P_r$  na śladzie przecięcia z płaszczyzną tylną  $P_p$ ;

$KM$  - odległość środka żłobka określona wymiarem między pierwotną krawędzią skrawającą a największą jego głębokością, prostopadłe do krawędzi skrawającej;

$KF$  - odległość żłobka od pierwotnej krawędzi skrawającej;

$K$  - współczynnik żłobka  $K = KT/KM$ .



Rys. 1. Wskaźniki zużycia [1]

Oprócz wyżej opisanych wskaźników stosuje się tzw. wskaźniki pośrednie, które dzieli się na fizyczne i technologiczne. Do fizycznych wskaźników zużycia można zaliczyć [3]:

- drgania, w tym emisję akustyczną (amplituda, częstość),
- składowe siły, momenty i moc skrawania,
- temperaturę skrawania,
- barwę wióra,
- postać i kształt wióra.

Do wskaźników technologicznych należą [3]:

- dokładność wymiarowo-kształtowa,
- jakość warstwy wierzchniej, w tym głównie chropowatość powierzchni itp.

W pracy przedstawiono wyniki badań zużycia ostrzy wybranych narzędzi frezarskich przy obróbce odlewniczych wysokokrzemowych stopów aluminium. Jako kryterium zużycia narzędzia, oprócz geometrycznych wskaźników zużycia, zastosowano wskaźniki pośrednie w postaci pomiaru sił skrawania i chropowatości powierzchni obrabianej. Zwiększone zużycie narzędzi, jakie występuje w trakcie obróbki tego rodzaju stopów, zwiększa siły skrawania co ma niekorzystny wpływ na warunki eksploatacji obrabiarek [1, 4, 8, 9]. Zaobserwować można również spadek jakości powierzchni [1], co z kolei niekorzystnie wpływa na właściwości użytkowe wykonywanych elementów - wady powierzchni są przyczyną zmniejszonej wytrzymałości, gdyż to głównie w warstwie wierzchniej jest inicjowana większość pęknięć.

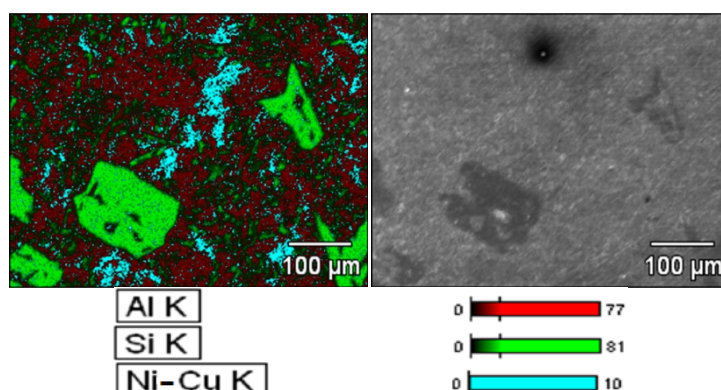
Do obróbki nadeutektycznych stopów Al-Si zaleca się wykorzystywanie narzędzi posiadających ostrza z PKD lub narzędzi z węglików spiekanych z powłokami PKD. Narzędzia tego typu charakteryzują się wysoką trwałością, ponadto ich zastosowanie zmniejsza wartości sił skrawania oraz polepsza jakość otrzymywanych powierzchni [1, 2, 8, 10, 16, 18]. Są one jednak bardzo drogie. Ich stosowanie zwiększa koszty wytwarzania, dlatego w niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania narzędzi z HSS, niepowlekanymi węglików i frezów z wymiennymi płytkami, dla których główną przeszkodą w obróbce wysokokrzemowych stopów Al-Si jest ich trwałość.

## 2. Opis i wyniki badań

W badaniach, jako przedstawiciel grupy siluminów wysokokrzemowych, zastosowano stop EN AC- $\text{AlSi21CuNi}$ , którego skład chemiczny oraz właściwości fizyczne i mechaniczne przedstawiono w tabeli 1. Stop ten wykorzystywany jest głównie na odlewy wysoko obciążonych tłoków silników spalinowych i charakteryzuje się dobrymi właściwościami wytrzymałościowym w podwyższonych temperaturach, małym współczynnikiem tarcia, dużą odpornością na korozję i ścieranie oraz dobrą lejnią.

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości stopu  $\text{AlSi21CuNi}$  [5, 13]

Oznaczenie i skład chemiczny	PN-EN1780-2	Cecha	Si	Cu	Ni	Mg	Mn	Cr	Fe	Ti	Zn
		EN AC- $\text{AlSi21CuNi}$	AK20	20-22	1,4-1,5	1,4-1,6	0,4-0,6	0,4-0,6	$\leq 0,7$	$\leq 0,7$	$\leq 0,2$
Właściwości fizyczne i mechaniczne	Gęstość	Twardość	Ścieralność w odniesieniu do Al-Cu		Wytrzymałość $R_m$		Moduł Younga		Liczba Poissona		
	$2700 \text{ kg/m}^3$	85-110 HB	0,65		150-190 MPa		82000 MPa		0,26		



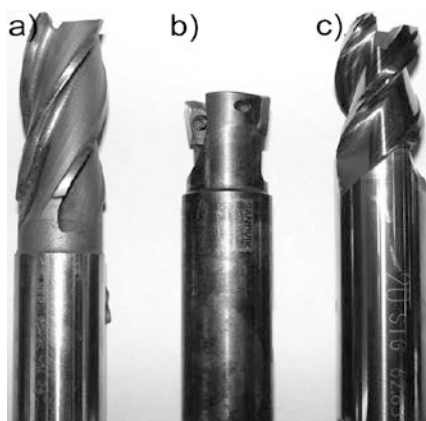
Rys. 2. Obraz powierzchni stopu  $\text{AlSi21CuNi}$  otrzymany na mikroskopie SEM oraz mapa rozkładu pierwiastków chemicznych dla tego stopu

Na rys. 2 przedstawiono obraz powierzchni stopu z mikroskopu elektronowego (SEM) oraz mapę rozkładu pierwiastków chemicznych otrzymaną przy użyciu sondy EDS. Na mapie

tej kolorem zielonym zaznaczono wydzielenia krzemu, kolorem jasno-niebieskim fazę Ni-Cu natomiast kolor czerwony odpowiada aluminium. Wyraźnie widoczne są wydzielenia krzemu, które charakteryzują się dużą twardością i ścieralnością, przez co zwiększają zużycie ostrzy.

Wykorzystano trzy frezy o średnicy 20 mm, wykonane z różnych materiałów (rys. 3):

- frez monolityczny ze stali szybko tnącej NFPa  $\Phi 20$  z=4,
- frez składany R390-020B20-11L z płytkami R390-11 T308E-ML,
- frez monolityczny węglkowy bez powłoki E5423200.



Rys. 3. Narzędzia zastosowane do obróbki: a) NFPa, b) R390-020B20-11L, c) E5423200

Dla poszczególnych narzędzi stosowano odmienne parametry skrawania (tabela 2), dobrane na podstawie literatury lub wytycznych producentów [14, 15, 17].

Próby skrawania polegały na obróbce rowka o szerokości 20 mm (obróbka pełną średnicą narzędzia) i głębokości 6mm. Łączna długość frezowanych rowków, dla każdego z narzędzi, wyniosła ok. 3,6 m.

Tabela 2. Zestawienia parametrów dla poszczególnych narzędzi [14, 15, 17]

Rodzaj narzędzia	Frez trzpieniowy walcowo-czołowy	Frez składany, trzpieniowy walcowo-czołowy	Frez węglkowy, trzpieniowy walcowo-czołowy, bez powłoki
Nr parametru	P1	P2	P3
Oznaczenie narzędzia	NFPa $\phi 20$	R390-020B20-11L	E5423200
Materiał części roboczej	HSS	R390-11 T308E-ML	H10F
Liczba ostrzy z	4	2	3
Prędkość skrawania $v_c$	75 m/min	300 m/min	500 m/min
Prędkość obrotowa n	1194 obr/min	4777 obr/min	7962 obr/min
Posuw na ostrze $f_z$	0,1 mm/ostrze	0,1 mm/ostrze	0,1 mm/ostrze
Prędkość posuwu $v_f$	478 mm/min	955 mm/min	2389 mm/min
Głębokość skrawania $a_p$	6 mm	6 mm	6 mm
Szerokość frezowania $a_e$	20 mm	20 mm	20 mm

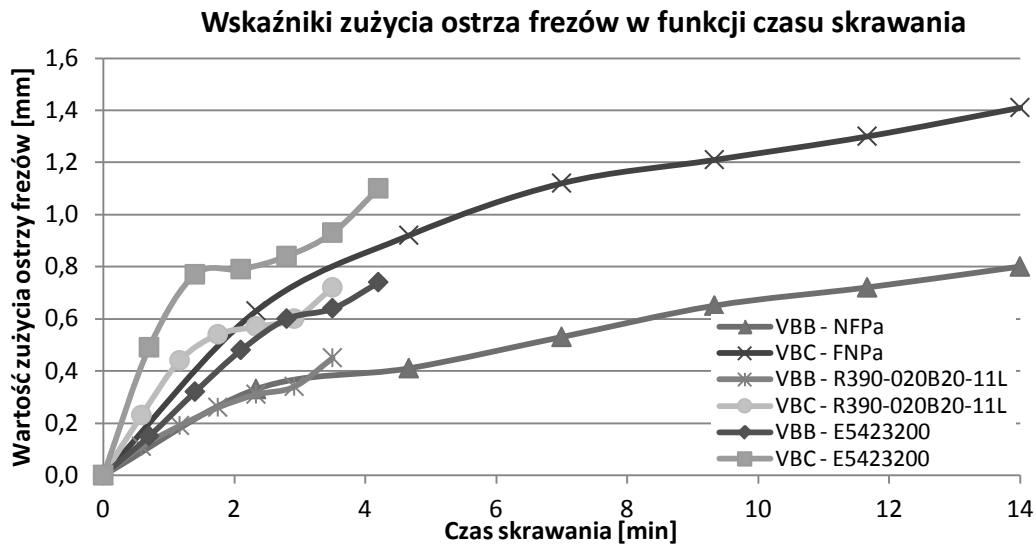
Parametry obróbki dla frezów NFPa  $\phi 20$ , R390-020B20-11L i E5423200 oznaczono w tabeli 2 odpowiednio symbolami P1, P2, P3. Różnią się one dla poszczególnych narzędzi wartościami prędkości skrawania, która została dobrana w zależności od zastosowanego materiału narzędziowego.

## 2.1. Zużycie ostrzy narzędzi

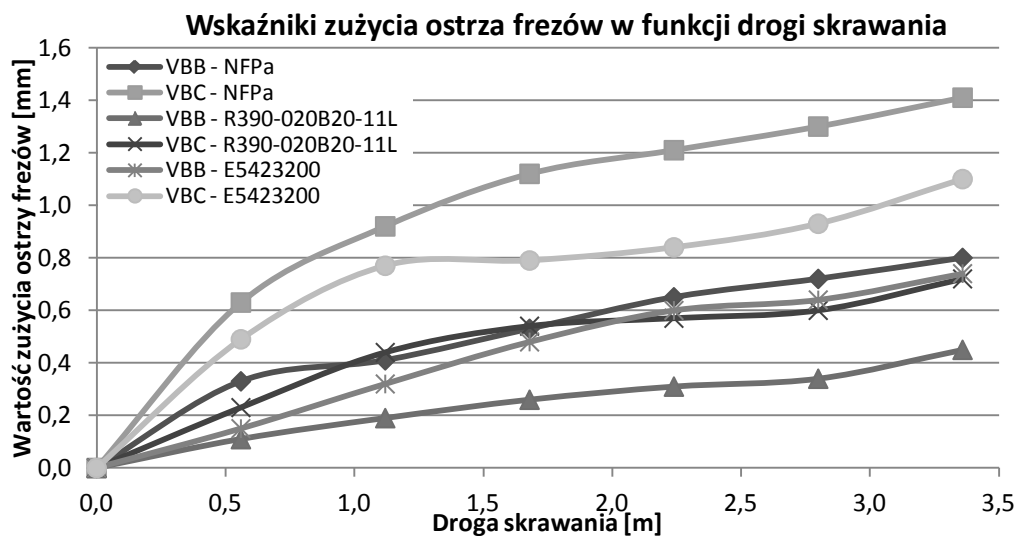
Podczas skrawania stopów aluminium występuje przede wszystkim zużycie ostrza w wyniku starcia na powierzchni przyłożenia [3], dlatego do oceny zużycia przyjęto dwa wskaźniki:

- średnią szerokość pasma zużycia  $VB_B$ ,
- szerokość pasma zużycia naroża  $VB_C$ .

W trakcie prób analizowano przebieg zużycia poszczególnych narzędzi zarówno w funkcji czasu skrawania (rys. 4), jak i drogi frezowania (rys. 5).



Rys. 4. Zużycie ostrza narzędzi w funkcji czasu skrawania (parametry obróbki dla frezów: NFPa – P1; R390-020B20-11L – P2; E5423200 – P3 zgodnie z tabelą 2)



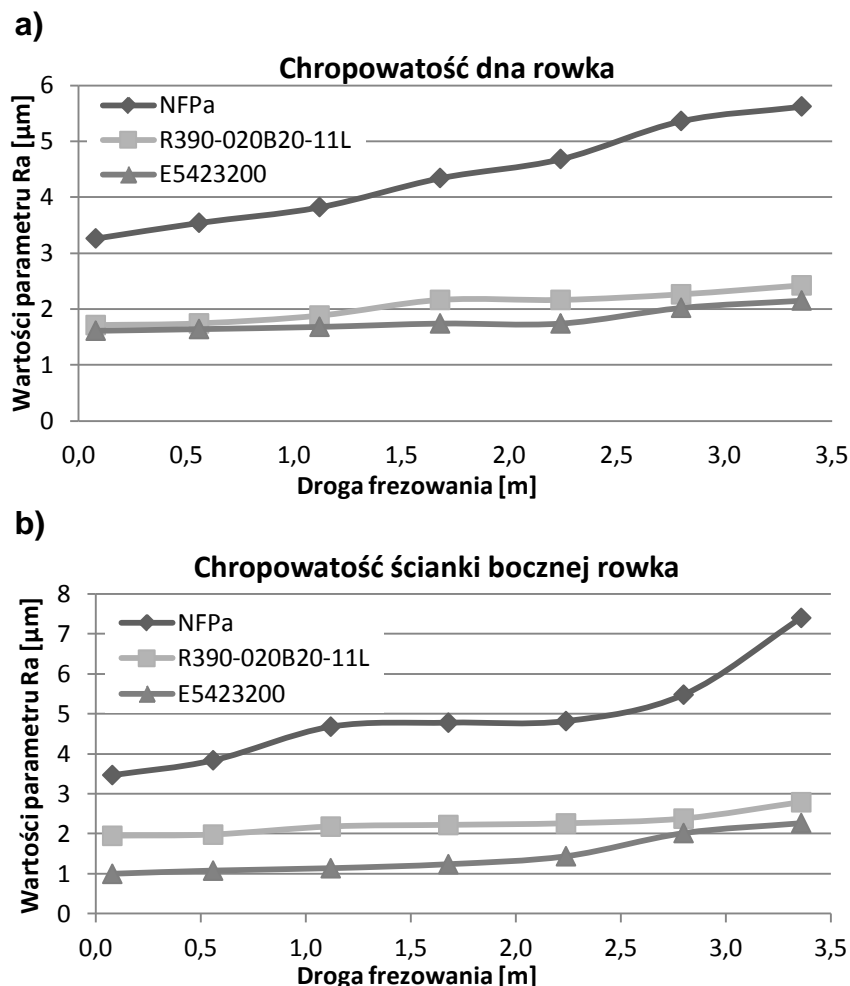
Rys. 5. Zużycie ostrza narzędzi w funkcji drogi skrawania (parametry obróbki dla frezów: NFPa – P1; R390-020B20-11L – P2; E5423200 – P3 zgodnie z tabelą 2)

Największe zużycie zaobserwowano dla frezu NFPa, mniejsze, ale również znaczące, występuje dla narzędzia węglkowego E5423200. Wynika to z zastosowanej wysokiej prędkości skrawania oraz braku pokrycia. Dla frezu R390-020B20-11L, prędkość skrawania jest niższa niż dla frezu węglkowego, zużycie jest najmniejsze. Mniejsze zużycie narzędzia jest również wynikiem zastosowania płytki wieloostrowej z powłoką, która zmniejsza

zużycie ściernie. Jest to szczególnie istotne w przypadku siluminów nadeutektycznych przy obróbce, których wydzielenia krzemu przyspieszają ten rodzaj zużycia. Badania te potwierdzają wysoką „ścierność” tego stopu czyniąc go trudnoobrabialnym.

## 2.2. Jakość powierzchni

Na chropowatość powierzchni wpływa wiele czynników, m.in. materiał, jakość wykonania oraz geometria ostrza, właściwości materiału obrabianego, stosowane parametry technologiczne i inne. Z parametrów technologicznych, najistotniejszy wpływ na jakość powierzchni ma posuw na ostrze  $f_z$ . W mniejszym stopniu wpływa na nią prędkość skrawania  $v_c$ . W trakcie badań przeprowadzono pomiary chropowatości dna frezowanego rowka (rys. 6a) i jego powierzchni bocznej (rys. 6b). Jakość powierzchni, zgodnie z przewidywaniami, pogarsza się wraz ze zużyciem ostrzy narzędzi. Najgorszą jakość powierzchni, uzyskano dla frezu NFPa ze stali szybko tnącej. Dla frezów składanego i węglkowego, w przypadku pomiarów na dnie rowka, jakość powierzchni jest zbliżona. Dla powierzchni bocznej rowka najmniejszą chropowatość uzyskano podczas obróbki narzędziem węglkowym.

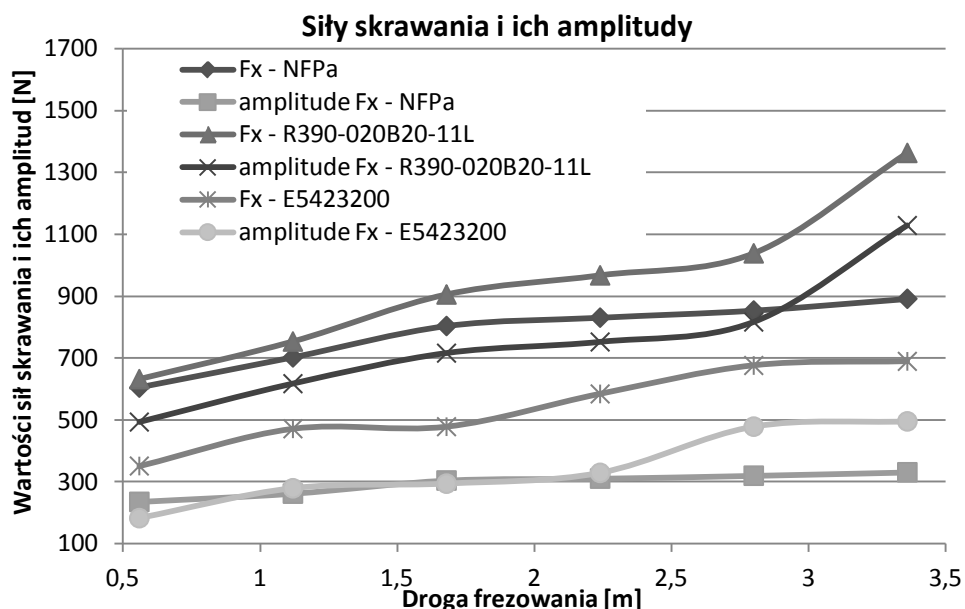


Rys. 6. Chropowatość powierzchni: a) dna rowka, b) powierzchni bocznej rowka (parametry obróbki dla frezów: NFPa – P1; R390-020B20-11L – P2; E5423200 – P3 zgodnie z tabelą 2)

Należy jednak podkreślić, że pomimo znacznego poziomu zużycia ostrzy narzędzi, określonego wskaźnikami  $VB_B$  i  $VB_C$ , chropowatość powierzchni w funkcji drogi skrawania, dla frezów R390-020B20-11L oraz E5423200, zmienia się nieznacznie. Zmiany te kształtują się na poziomie  $1\mu\text{m}$ . Jednak dla frezu NFPa zmiana wartości parametru  $R_a$  wynosi około  $3\mu\text{m}$ .

### 2.3. Siły skrawania

Wartości oraz amplitudy sił skrawania wpływają na dokładność oraz jakość wykonywanych elementów. Duże siły skrawania powodują przyspieszone zużycie narzędzi oraz układów roboczych obrabiarek. Największa wartość sił skrawania wystąpiła dla narzędzia składanego (frez R390-020B20-11L), natomiast najmniejsza dla frezu E5423200 (rys. 7).



Rys. 7. Wartości maksymalne i amplitudy składowych sił skrawania dla różnych narzędzi (parametry obróbki dla frezów: NFPa – P1; R390-020B20-11L – P2; E5423200 – P3 zgodnie z tabelą 2)

Zmniejszone siły skrawania dla narzędzia węglkowego, są wynikiem mniejszych oporów skrawania dzięki „ostrej” geometrii narzędzia oraz wysokiej prędkości skrawania (wzrost prędkości skrawania powoduje, po przekroczeniu pewnej wartości  $v_c$ , spadek sił skrawania). Dla narzędzia składanego siły skrawania są zbliżone do sił dla frezu ze stali szybkoobrotowej. Jednak amplitudy sił, które są wskaźnikiem stabilności procesu, dla tego narzędzia są największe i przekraczają znacznie wartości dla dwu pozostałych frezów (dla składowych Fx i Fy ok. 40%). Wpływa na to przede wszystkim geometria ostrzy narzędzia. W szczególności mniejsza liczba ostrzy niż dla dwu pozostałych narzędzi (tabela 2), małe kąty natarcia oraz pochylenia linii śrubowej  $\lambda_s=5^0$ . Takie parametry narzędzia niekorzystnie wpływają na stabilność jego pracy, co przejawia się wzrostem amplitud sił skrawania [12].

### 3. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone prace studialne oraz badania eksperymentalne pozwoliły na sformułowanie następujących, ważniejszych wniosków:

- Narzędzia wykonane ze stali szybkoobrotowej nie powinny być stosowane w obróbce wysokokrzemowych siluminów.
- Podczas obróbki narzędziem składanym zaobserwowano największy wzrost sił skrawania oraz ich amplitudy, jest to niekorzystne ze względu na trwałość narzędzia, obrabiarki oraz jakość obrobionych powierzchni.
- Badania wykazały, że spośród analizowanych narzędzi najlepsze efekty uzyskano dla frezu węglkowego.

- Wartość parametru Ra jest porównywalna dla frezów węglkowego i składanego, wybór właściwego narzędzia powinien być efektem analizy ekonomicznej dla każdej sytuacji technologicznej.
- Amplitudy sił skrawania, będące ważnym wskaźnikiem dynamiki procesu skrawania, są największe dla narzędzia składanego, informacja ta powinna być uwzględniona przy wyborze narzędzia w konkretnych zastosowaniach.
- Pomimo istotnego zużycia ostrzy narzędzi, uzyskanego w procesie obróbki, zmiana parametru Ra jest stosunkowo niewielka, porównując początek i koniec obróbki. Jest to istotne z punktu widzenia jakości obróbki.

Uzyskane doświadczenia praktyczne wskazują, że w przypadku obróbki wysokokrzemowych siluminów istotna jest trwałość narzędzi, dotyczy to zwłaszcza obróbki zautomatyzowanej na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Częsta wymiana narzędzi, ze względu na zużycie, może być w tych przypadkach przyczyną problemów związanych ze sterowaniem maszyny technologicznej jak i jakością obrobionych elementów.

## Literatura

1. Arumugam P.U., Malshe A.P., Batzer S.A.: Dry machining of aluminum–silicon alloy using polished CVD diamond-coated cutting tools inserts. *Surface and Coatings Technology* 2006; 11: 3399-3403.
2. Burek J., Płodzień, M.: Wysokowydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach. *Mechanik* 2012; 7: 542-549.
3. Cichosz P.: *Narzędzia skrawające*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2007.
4. Davima J.P., Baptista A.M.: Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium. *Journal of Materials Processing Technology* 2000; 103: 417-423.
5. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2007.
6. Feld M.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1984.
7. Haque M. M., Khan A. A., Ismail A.A.: Investigation on tool wear rate for modified and unmodified aluminium-silicon casting alloy. *International Journal of Modern Physics B* 2009; Vol. 23, Nos. 6 & 7: 826–831.
8. Hu J., Chou Y.K., Thompson R.G.: Nanocrystalline diamond coating tools for machining high - strength Al alloys. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2008; 26: 135–144.



9. Liu J., Chou K.Y.: On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2007; 3-4: 635-645.
10. Martini C., Morri A.: Face milling of the EN AB-43300 aluminum alloy by PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2011; 29: 662–673.
11. Oczóś K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
12. Pieśko P., Kuczmaszewski J.: *Analiza wpływu czynnej długości krawędzi skrawającej na wartość i przebieg sił skrawania*. Łódź: IV Szkoła Obróbki Skrawaniem, 2010.
13. Polskie Normy: PN-EN 573:3 2005; PN-EN 1780-2:2004; PN-ISO 3685:1996.
14. *Poradnik CoroGuide*. Szwecja: AB Sandvik Coromant, 2007.
15. *Poradnik Obróbki Skrawaniem*. Szwecja: AB Sandvik Coromant, 2010.
16. Roy P., Sarangi S.K., Ghosh A., Chattopadhyay A.K.: Machinability study of pure aluminium and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 2009; 27: 535–544.
17. Wołk R.: *Normowanie obróbki skrawaniem*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwa Techniczne, 1972.
18. Yoshikawa H., Nishiyama A.: CVD diamond coated insert for machining high silicon aluminum alloys. *Diamond and Related Materials* 1999; 8: 1527–1530.

Praca realizowana w ramach projektu Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

