

Mgr inż. Janusz KALISZ (Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania),  
mgr inż. Aneta ŁĘTOCHA (Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania),  
prof. dr hab. inż. Wit GRZESIK (Politechnika Opolska),  
dr inż. Kazimierz CZECHOWSKI (Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania):

## WPLYW FREZOWANIA NA TOPOGRAFIĘ POWIERZCHNI KRZYWOLINIOWEJ PO NAGNIATANIU STOPU ALUMINIUM

### Streszczenie

Zamieszczono wyniki badań dotyczące nagniatania tocznego stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A). Analizie poddano znormalizowane parametry wysokościowe, amplitudowe oraz odległościowe chropowatości powierzchni w zależności od stanu powierzchni po obróbce frezowaniem, poprzedzającej nagniatanie. Oceniano stan powierzchni nagniatanej badanego stopu aluminium po frezowaniu frezem ze stali szybko tnącej HSS-E i węgla spiekane VHМ. Wyniki badań wskazują na możliwość uzyskania – po sekwencyjnej obróbce stopu aluminium obejmującej kształtujące frezowanie i wykończeniowe nagniatanie – powierzchni o bardzo małej chropowatości, a ponadto, że końcowy efekt zależy od sposobu przygotowania powierzchni pod nagniatanie.

**Słowa kluczowe:** *frezowanie, nagniatanie toczne, aluminium, topografia powierzchni*

## THE EFFECT OF MILLING ON THE CURVILINEAR TOPOGRAPHY OF A BURNISHED ALUMINIUM ALLOY SURFACE

### Abstract

The results of roller burnishing of the aluminium alloy EN AW-AlCu4MgSi(A) are presented. Analyses are for normalized parameters of height, amplitude and distance of surface roughness, dependent on the milled surface state prior to burnishing. The analyses relate to the burnished milled alloy surface after milling by high-speed steel HSS-E and cemented carbide VHМ cutters, respectively. The results indicate the possibility, after sequential initial milling and final burnishing, of obtaining a surface of very low roughness in this alloy. The end result depends on the method of surface preparation for burnishing.

**Keywords:** *milling, ball burnishing, aluminium, surface topography.*

# WPLYW FREZOWANIA NA TOPOGRAFIĘ POWIERZCHNI KRZYWOLINIOWEJ PO NAGNIATANIU STOPU ALUMINIUM

Janusz KALISZ<sup>1</sup>, Aneta LĘTOCHA<sup>1</sup>, Wit GRZESIK<sup>2</sup>, Kazimierz CZECHOWSKI<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

W przemyśle coraz powszechniej stosuje się obróbkę sekwencyjną składającą się z obróbki wiórowej i następującej po niej wykończeniowej obróbki powierzchniowej zgniotem prowadzącej do zmniejszenia chropowatości powierzchni. Obróbka sekwencyjna obejmująca kolejne operacje frezowania i nagniatania realizowana na obrabiarzach sterowanych numerycznie może być stosowana również do złożonych powierzchni przestrzennych [6].

Nagniatanie, jako wykończeniowa obróbka powierzchni, zmienia nie tylko profil chropowatości/topografię powierzchni, ale także silnie oddziałuje na utwardzenie, redystrybucję stanu naprężeń i modyfikację struktury warstwy wierzchniej. W porównaniu do szlifowania nagniatanie jest obróbką bardziej ekologiczną, ponieważ nie wytwarza pyłów i iskier oraz ogranicza emisję hałasu i zmniejsza energochłonność. Dostępne narzędzia do nagniatania umożliwiają skoncentrowanie zabiegów dla obróbki kształtującej i wykończeniowej na jednym stanowisku roboczym, co zmniejsza koszty i czas wytwarzania. Szczególne znaczenie ma to w przypadku sekwencyjnej obróbki obejmującej frezowanie i nagniatanie powierzchni złożonych [3,6].

Efekt nagniatania zależy od wielu czynników, m. in.: twardości i rodzaju materiału obrabianego, siły nagniatania, kształtu i wielkości elementu nagniatanego, strategii nagniatania oraz posuwu wierszowania [2]. O jakości powierzchni po nagniataniu w dużym stopniu decyduje jej stan po wstępnym frezowaniu. Mając zatem na uwadze końcowy efekt sekwencyjnej obróbki – frezowania i nagniatania – należy tak przeprowadzić frezowanie, aby uzyskać wysoką jakość powierzchni wyrobu [7].

---

<sup>1</sup> Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, 30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37a

<sup>2</sup> Politechnika Opolska, 45-271 Opole, ul. Mikołajczyka 5

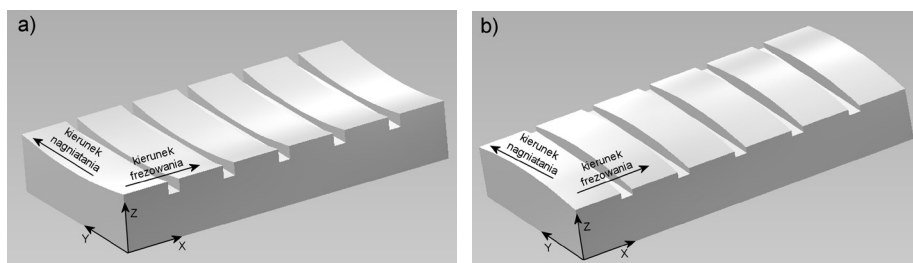
## 2. CEL I METODYKA BADAŃ

W ramach prac własnych przeprowadzono badania w celu określenia w jakim stopniu struktura geometryczna powierzchni po kształtującym frezowaniu wpływa na topografię powierzchni po wykończeniowym nagniataniu kulką ceramiczną elementów ze stopu aluminium.

Próbnom nagniatania poddano krzywoliniowe, wklęsłe i wypukłe, powierzchnie próbek ze stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A) o twardości 110 HB. Do badań wykonano próbki o wymiarach 80x20 mm o stałym promieniu krzywizny 250 mm, podzielone równomiernie na 6 obszarów (rys. 1).

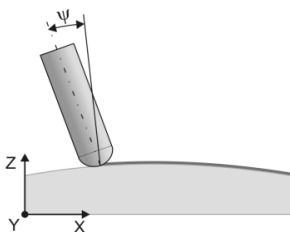
Frezowanie, poprzedzające nagniatanie, przeprowadzono frezem kulistym o średnicy  $\phi = 8$  mm w dwóch wariantach:

- wariant 1 (W1), frezowanie frezem HSS-E, parametry skrawania:  $a_p = 0,5$  mm,  $f_z = 0,05$  mm/ostrze,  $f_{wf} = 0,5$  mm,  $v_c = 350$  m/min,
- wariant 2 (W2), frezowanie frezem VHM, parametry skrawania:  $a_p = 0.5$  mm,  $f_z = 0.04$  mm/ostrze,  $f_{wf} = 0.53$  mm,  $v_c = 530$  m/min.



Rys. 1. Widok próbek wykorzystanych w badaniach z zaznaczonym kierunkiem frezowania i nagniatania: a) wklęsłej, b) wypukłej

Frezowanie (rys. 2) przeprowadzono metodą wierszowania w kierunku prostym do osi Y, ze stałym odchyleniem frezu od normalnej do powierzchni o kąt  $\psi = 15^\circ$  (W1) oraz  $\psi = 7,5^\circ$  (W2), natomiast nagniatanie w kierunku prostym do kierunku frezowania [4,5]. Programy sterujące obrabiarką, tak dla frezowania, jak i nagniatania opracowano w systemie NX CAM. W celu zmniejszenia tarcia i zwiększenia trwałości narzędzi w procesie nagniatania jako środek smarujący stosowano olej maszynowy. Proces nagniatania realizowano w jednym przejściu stosując wykonany w IZTW nagniatnik toczny z ceramicznym elementem nagniatającym ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) w kształcie kulki o promieniu 4 mm [1]. Próby nagniatania przeprowadzono ze stałym dosunięciem 0,3 mm (ugięciem sprężyny nagniatnika po zetknięciu się jego elementu roboczego z powierzchnią obrabianą), posuwem roboczym  $f_t = 8000$  mm/min, siłą nagniatania  $F_n = 50$  N i posuwem wierszowania  $f_{wn} = (0,02; 0,04; 0,06; 0,08)$  mm. Frezowanie i nagniatanie przeprowadzono w jednym zamocowaniu na pięcioosiowym centrum frezarskim DMC 75V Linear.



Rys. 2. Schemat frezowania z kątem odchylenia ( $\psi$ ) frezu od normalnej do powierzchni

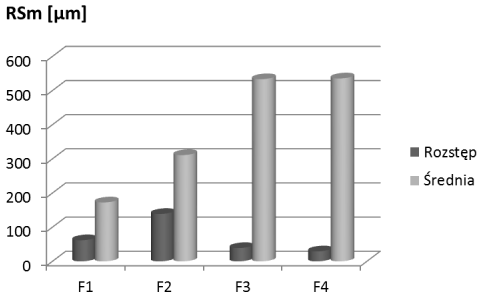
Chropowatość powierzchni po frezowaniu i nagniataniu mierzono na stykowym profilometrze TOPO 01P (konstrukcji IZTW). Przyrząd wyposażono w głowicę pomiarową o zakresie 1 mm, zakończoną końcówką diamentową o promieniu 2  $\mu\text{m}$  oraz kącie stożka 60°. Pomiary przeprowadzono z prędkością 0,5 mm/s. Dobrano odstępy próbkowania: 0,2  $\mu\text{m}$  dla powierzchni nagniatanych i 1  $\mu\text{m}$  dla powierzchni frezowanych w kierunku pomiaru oraz 50  $\mu\text{m}$  w kierunku prostopadłym do pomiaru. Zmierzone powierzchnie poddano analizie w programie TOPOGRAFIA przystosowanym do możliwości metrologicznych przyrządu pomiarowego. Zastosowano filtrację Gaussa z długością fali *cut-off* wynoszącą 2,5 mm dla powierzchni frezowanych oraz 0,25 mm i 0,8 mm dla powierzchni nagniatanych. Wyznaczono parametry wysokościowe i amplitudowe -  $S_a$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_z$  oraz odległościowe -  $RSm$  chropowatości powierzchni.

### 3. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów chropowatości dla powierzchni frezowanych. Rysunek 3 przedstawia wyniki pomiarów (średnie i rozstęp) parametru  $RSm$ . Wartości rozstępu dla powierzchni frezowanych w wariancie 2 (W2) są mniejsze niż dla powierzchni frezowanych w wariancie 1 (W1) oraz stanowią mniejszą część wartości średniej parametru, zarówno dla powierzchni wklęsłych, jak i wypukłych. Rozstęp parametru  $RSm$  uzyskany po frezowaniu (W1) stanowi nawet połowę wartości średniej. Oznacza to, że powierzchnia po frezowaniu (W2) jest bardziej periodyczna, co powinno korzystnie wpłynąć na wyniki parametrów chropowatości po nagniataniu.

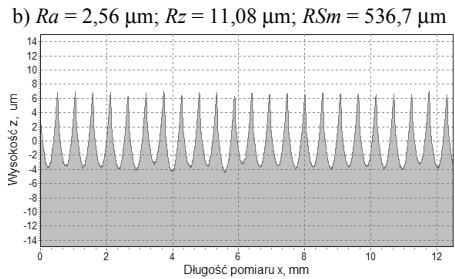
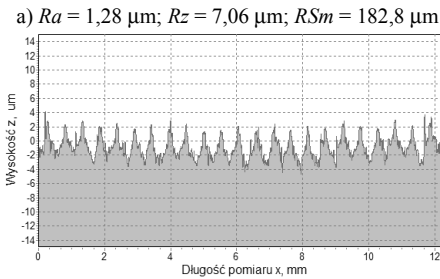
Tabela 1. Uśrednione wartości parametrów chropowatości powierzchni frezowanych

Oznaczenie	Wariant frezowania	Kształt powierzchni	$RSm$ Średnia $\mu\text{m}$	$RSm$ Rozstęp $\mu\text{m}$	$S_a$ $\mu\text{m}$	$S_p$ $\mu\text{m}$	$S_v$ $\mu\text{m}$	$S_z$ $\mu\text{m}$
F1	W1	wklęsłe	172,53	61,81	1,42	9,25	6,16	15,41
F2	W1	wypukłe	311,11	138,78	1,82	9,21	4,56	13,77
F3	W2	wklęsłe	533,40	38,96	2,67	7,60	4,74	12,35
F4	W2	wypukłe	535,58	29,18	2,74	8,78	4,12	12,90



Rys. 3. Porównanie wartości parametru  $RSm$  po frezowaniu powierzchni:  
 F1 – wklęsłych, wariant 1  
 F2 – wypukłych, wariant 1  
 F3 – wklęsłych, wariant 2  
 F4 – wypukłych, wariant 2

Rysunki 4÷6 przedstawiają przykładowe profile chropowatości po frezowaniu (rys. 4) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu (rys. 5 i rys. 6). Mikronierówności po frezowaniu W1 (rys. 4a) nie mają kształtu charakterystycznego dla tego rodzaju obróbki. Wzniesienia nie są zakończone pojedynczym ostrym wierzchołkiem, a profil bardziej przypomina powierzchnie po szlifowaniu. Natomiast powierzchnie uzyskane po frezowaniu w wariacie (W2) są okresowe, o ostrych wierzchołkach (rys. 4 b).

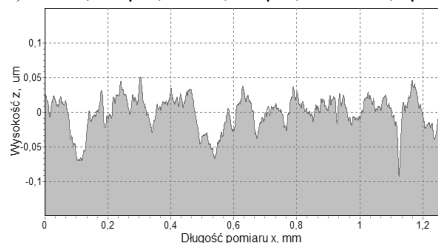


Rys. 4. Przykładowe profile chropowatości po frezowaniu: a) wariant 1 (W1), b) wariant 2 (W2)

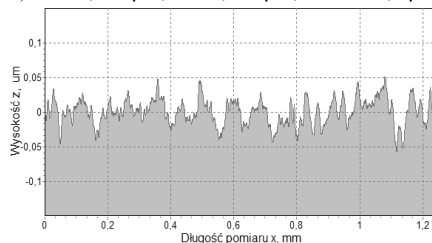
Można zauważyć, że profile powierzchni po frezowaniu (W2) i nagniataniu zarówno powierzchni wklęsłych (rys. 5b), jak i wypukłych (rys. 6b) są symetryczne względem linii średniej. Natomiast w profilach po frezowaniu w wariacie (W1) przeważają głębokie wgłębienia. Skutkiem są różnice w rozkładzie udziału materiałowego.

Analizując mapy warstwicowe powierzchni po sekwencyjnej obróbce frezowaniem i nagniataniem (rys. 7) zauważyć można różnicę w jakości powierzchni w zależności od sposobu poprzedzającego frezowania. Na mapie warstwicowej powierzchni po frezowaniu (W1) można zauważyć kilka obszarów o dużym zagęszczeniu warstwic (rys. 7a), co świadczy o występowaniu losowych, bardzo głębokich wgłębien, natomiast po frezowaniu (W2) warstwicę układają się równomiernie w całym zmierzonym obszarze (rys. 7b).

a)  $Ra = 0,019 \mu\text{m}$ ;  $Rz = 0,103 \mu\text{m}$ ;  $RSm = 54,3 \mu\text{m}$

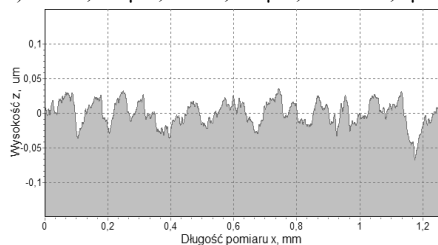


b)  $Ra = 0,015 \mu\text{m}$ ;  $Rz = 0,085 \mu\text{m}$ ;  $RSm = 35,8 \mu\text{m}$

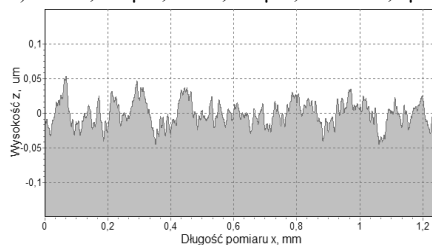


Rys. 5. Przykładowe profile chropowatości powierzchni po sekwencyjnej obróbce: a) frezowanie (W1) i nagniatanie, b) frezowanie (W2) i nagniatanie. Powierzchnia wklęsła, siła nagniatania  $F_n = 50 \text{ N}$ , posuw wierszowania  $f_{wn} = 0,04 \text{ mm}$

a)  $Ra = 0,016 \mu\text{m}$ ;  $Rz = 0,092 \mu\text{m}$ ;  $RSm = 52,6 \mu\text{m}$

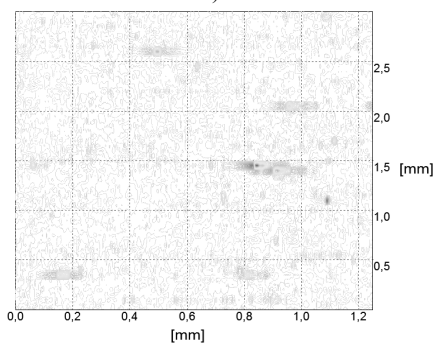


b)  $Ra = 0,014 \mu\text{m}$ ;  $Rz = 0,077 \mu\text{m}$ ;  $RSm = 36,5 \mu\text{m}$



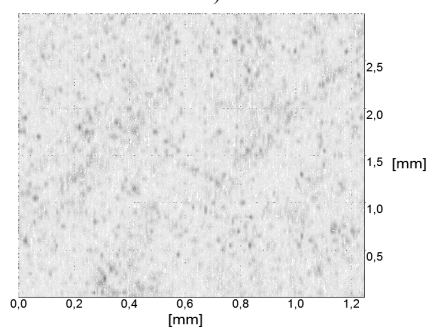
Rys. 6. Przykładowe profile chropowatości powierzchni po sekwencyjnej obróbce: a) frezowanie (W1) i nagniatanie, b) frezowanie (W2) i nagniatanie. Powierzchnia wypukła, siła nagniatania  $F_n = 50 \text{ N}$ , posuw wierszowania  $f_{wn} = 0,04 \text{ mm}$

a)



0.77	0.74	0.72	0.7	0.67	0.65	0.63	0.61	0.58	0.56	0.54	0.51	0.49
0.47	0.45	0.42	0.4	0.38	0.36	0.33	0.31	0.29	0.26	0.24	0.22	0.2
0.17	0.15	0.13	0.1	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.03	0.06	0.08	0.1
0.12	0.15	0.17	0.18	0.21	0.24	0.26	0.27	0.31	0.33	0.35	0.37	0.4
0.42	0.44	0.47	0.49	0.51	0.53	0.56	0.58	0.6	0.63	0.65	0.67	0.69
0.72	0.74	0.76	0.78	0.81	0.83	0.85	0.88	0.9	0.92	0.94	0.97	0.99
-1.01	-1.04	-1.06	-1.08	-1.1	-1.13	-1.15	-1.17	-1.2	-1.22	-1.24	-1.26	-1.29
-1.31	-1.33	-1.35	-1.38	-1.4	-1.42	-1.45	-1.47	-1.49				

b)



0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
0	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03
-0.03	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06
-0.06	-0.06	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.09	-0.09
-0.09	-0.09	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.11	-0.11	-0.11	-0.11	-0.12	-0.12
-0.12	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14		

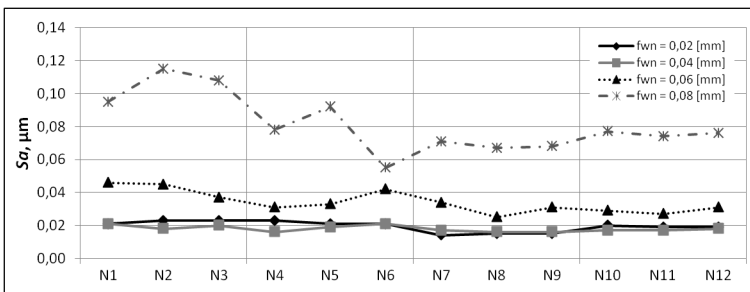
Rys. 7. Przykładowe mapy warstwicowe powierzchni: a) frezowanej (W1) i nagniatanej, b) frezowanej (W2) i nagniatanej. Powierzchnie wklęsłe, siła nagniatania  $F_n = 50 \text{ N}$ , posuw wierszowania  $f_{wn} = 0,04 \text{ mm}$

Tabela 2 przedstawia uśrednione wartości parametrów chropowatości powierzchni nagniatanych po przednim frezowaniu w obu wariantach.

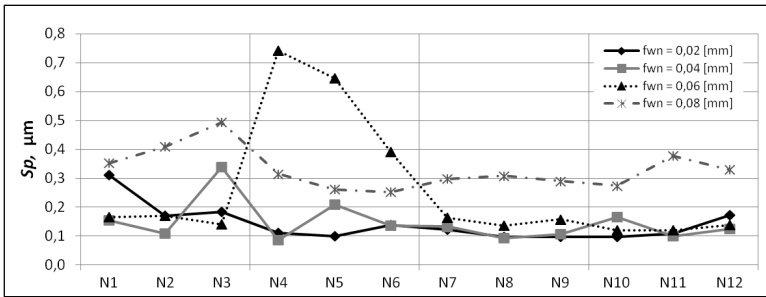
Tabela 2. Uśrednione wartości parametrów chropowatości powierzchni nagniatanych po frezowaniu frezem HSS-E (W1) i VHM (W2); siła nagniatania  $F_n = 50$  N

$f_{wn}$ mm	Wariant frezowania	Kształt próbki	$Sa$ $\mu\text{m}$	$Sp$ $\mu\text{m}$	$Sv$ $\mu\text{m}$	$Sz$ $\mu\text{m}$
0,02	W1	wkłęśła	0,022	0,223	0,314	0,537
		wypukła	0,022	0,116	0,210	0,327
	W2	wkłęśła	0,015	0,106	0,150	0,256
		wypukła	0,019	0,127	0,132	0,259
0,04	W1	wkłęśła	0,020	0,201	0,414	0,615
		wypukła	0,019	0,144	0,184	0,327
	W2	wkłęśła	0,016	0,111	0,138	0,249
		wypukła	0,017	0,131	0,197	0,328
0,06	W1	wkłęśła	0,043	0,159	0,373	0,531
		wypukła	0,035	0,593	0,743	1,337
	W2	wkłęśła	0,030	0,152	0,175	0,328
		wypukła	0,029	0,126	0,155	0,281
0,08	W1	wkłęśła	0,106	0,419	0,869	1,288
		wypukła	0,075	0,276	0,674	0,949
	W2	wkłęśła	0,069	0,298	0,328	0,627
		wypukła	0,076	0,327	0,364	0,691

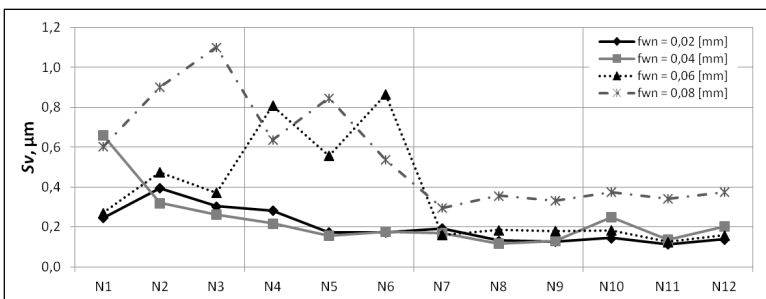
Rysunki 8 ÷ 11 przedstawiają kolejno wartości parametrów chropowatości powierzchni:  $Sa$ ,  $Sz$  oraz jej składowych  $Sp$  i  $Sv$  w zależności wartości posuwu wierszowania. Najlepsze wyniki z punktu widzenia zmniejszenia chropowatości powierzchni uzyskano po frezowaniu (W2) i nagniataniu z posuwem  $f_{wn} = 0,02$  mm i 0,04 mm. Charakterystyczne dla tego procesu są małe rozrzuty wartości zmierzonych parametrów chropowatości, co może świadczyć o tym, że powierzchnia jest jednorodna. Najmniej korzystne wyniki uzyskano po frezowaniu (W1) i nagniataniu z posuwem wierszowania  $f_{wn} = 0,08$  mm.



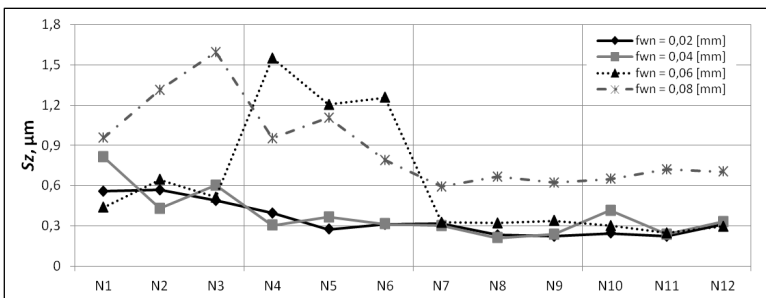
Rys. 8. Wyniki pomiaru parametru chropowatości  $Sa$  dla powierzchni nagniatanych: N1–N3 – wkłęśłe, po frezowaniu (W1); N4–N6 – wypukłe, po frezowaniu (W1); N7–N9 – wkłęśłe, po frezowaniu (W2); N10–N12 – wypukłe, po frezowaniu (W2)



Rys. 9. Wyniki pomiaru parametru chropowości  $S_p$  dla powierzchni nagniatanych: N1–N3 – wklęsłe, po frezowaniu (W1); N4–N6 – wypukłe, po frezowaniu (W1); N7–N9 – wklęsłe, po frezowaniu (W2); N10–N12 – wypukłe, po frezowaniu (W2)



Rys. 10. Wyniki pomiaru parametru chropowości  $S_v$  dla powierzchni nagniatanych: N1–N3 – wklęsłe, po frezowaniu (W1); N4–N6 – wypukłe, po frezowaniu (W1); N7–N9 – wklęsłe, po frezowaniu (W2); N10–N12 – wypukłe, po frezowaniu (W2)



Rys. 11. Wyniki pomiaru parametru chropowości  $S_z$  dla powierzchni nagniatanych: N1–N3 – wklęsłe, po frezowaniu (W1); N4–N6 – wypukłe, po frezowaniu (W1); N7–N9 – wklęsłe, po frezowaniu (W2); N10–N12 – wypukłe, po frezowaniu (W2)

Wszystkie wartości poddanych analizie parametrów chropowości powierzchni nagniatanych po uprzednim frezowaniu (W1) mają duże rozrzuty, co świadczy o dużej niejednorodności powierzchni. Rozstępy parametrów chropowości powierzchni po



sekwencyjnej obróbce frezowaniem (W2) i nagniataniu są znacząco mniejsze. Wyjątek stanowi parametr  $Sa$ , którego wartości i rozstęp są podobne po frezowaniu w obu wariantach i nagniataniu. Świadczy to o tym, że parametr  $Sa$  nie odzwierciedla wiarygodnie stanu mierzonej powierzchni nagniatanej.

#### 4. PODSUMOWANIE

Nagniatanie po frezowaniu jest procesem złożonym, a końcowy efekt zależy od sposobu przygotowania powierzchni do nagniatania. Dlatego też operację składającą się z tych dwóch zabiegów technologicznych należy traktować całościowo.

Wyniki badań wskazują na możliwość uzyskania po sekwencyjnej obróbce stopu aluminium obejmującej kształtujące frezowanie i wykończeniowe nagniatanie powierzchni o bardzo małej chropowatości. Uzyskano powierzchnie o parametrach chropowatości  $Sa$  i  $Ra$  poniżej  $0,02 \mu\text{m}$ . W analizie topografii powierzchni po nagniataniu nie można ograniczyć się wyłącznie do parametru amplitudowego  $Sa$  lub  $Ra$ , z powodu niepełnej informacji o izotropowości powierzchni.

#### LITERATURA

- [1] CZECHOWSKI K., POŁOWSKI W., KALISZ J., JANCZEWSKI Ł., TOBOŁA D., WSZOŁEK J., *Zestaw narzędzi do obróbki nagniataniem na obrabiarkach sterowanych numerycznie*. Innovative Manufacturing Technology 2, Kraków, 2012, 77-100,
- [2] GROCHAŁA D., CHMIELEWSKI K., OLSZAK W., *Badania wpływu technologicznych parametrów frezowania i nagniatania na topografię powierzchni*. XII Konferencja Naukowa Technologia obróbki przez nagniatanie. Dysk CD, Mechanik, 2014 R. 87, nr 11, , 90-99
- [3] KALISZ J., ŻAK K., GRZESIK W., CZECHOWSKI K., *Characteristics of surface topography after rolling burnishing of EN AW-ALCU4MGSi(A) aluminium alloy*. Journal of Machine Engineering Vol 15, No. 1, 2015, 71-80
- [4] KALISZ J., CZERWIŃSKI A., JANCZEWSKI Ł., CZECHOWSKI K., POŁOWSKI W., TOBOŁA D., *Wybrane aspekty modyfikacji struktury geometrycznej powierzchni po frezowaniu za pomocą nagniatania tocznego i ślizgowego*. Obróbka skrawaniem interakcja proces-obrabiarka, VII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Mierzęcin, 2013, 201-208. Dysk CD: Mechanik, 2013, 8-9.
- [5] KALISZ J., JANCZEWSKI Ł., CZECHOWSKI K., POŁOWSKI W., *Wybrane aspekty nagniatania tocznego powierzchni frezowanych*. Innovative Manufacturing Technology 2013, Kraków, 2013, 201-212.
- [6] PRZYBYLSKI W., *Technologia obróbki nagniataniem*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987.
- [7] SOSNOWSKI M., GROCHAŁA D.: „*Problemy technologii nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych*”. Mechanik, 2011, 1, 14-18.