

Wpływ posuwu wierszowania na topografię powierzchni po nagniataniu stopu aluminium

Effect of stepover on a surface topography of aluminium alloy after burnishing

JANUSZ KALISZ*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.1.5

Przedstawiono wyniki badań wpływu posuwu wierszowania na topografię powierzchni elementów ze stopu aluminium po nagniataniu kulką ceramiczną. Analizowano parametry struktury geometrycznej powierzchni nagniatanej po frezowaniu. Otrzymane rezultaty wskazują na możliwość obniżenia wartości chropowatości powierzchni po nagniataniu i uzyskania korzystnego udziału materiałowego – znaczący wpływ na te efekty ma przyjęta w procesie obróbki nagniataniem wartość posuwu wierszowania. **SŁOWA KLUCZOWE:** nagniatanie toczne, frezowanie, struktura geometryczna powierzchni, stop aluminium

The results of investigations aiming for the determination of the effect of a stepover on the surface topography obtained after burnishing of aluminium alloy parts using a ceramic ball are presented. Geometric structure parameters of the burnished surface after milling are analysed. The obtained results indicate the possibility of gaining very low values of the surface roughness parameters and a beneficial material ratio after burnishing, depending on the values of the stepover that was applied in the burnishing process.

KEYWORDS: ball burnishing, milling, surface topography, aluminium alloy

Intensywność zużywania się części maszyn i innych wyrobów jest zazwyczaj determinowana właściwościami ich warstwy wierzchniej, a zwłaszcza strukturą geometryczną powierzchni, twardością materiału i stanem naprężeń własnych pozostałych po obróbkach. Właściwości warstwy wierzchniej części maszyn mogą być kształtowane m.in. za pomocą obróbki wykończeniowej nagniataniem, polegającej na miejscowym odkształcaniu plastycznym na zimno przedmiotu poprzez siłowe i kinetyczne współdziałanie gładkiego narzędzia z powierzchnią obrabianą. Uzyskane w tym procesie przemieszczenie nierówności i zgniot powierzchni powodują zmniejszenie chropowatości powierzchni i zwiększenie udziału materiałowego jej profilu, a także umocnienie warstwy wierzchniej materiału i uzyskanie w niej korzystnego stanu naprężeń (naprężeń ściskających). To z kolei przekłada się na wzrost odporności powierzchni na ścieranie, poprawienie trwałości pasowania współpracujących części, umożliwienie przenoszenia większych nacisków powierzchniowych oraz zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej części. Nagniatanie jest obróbką bez wiórów i pyłów, o małej emisji hałasu i niskiej energochłonności, a zatem – ekologiczną [1].

Cel i metodyka badań

W IZTW badano wpływ posuwu wierszowania na topografię powierzchni elementów ze stopu aluminium po nagniataniu kulką ceramiczną. Próbom nagniatania poddano krzywoliniowe wypukłe powierzchnie próbek ze stopu EN AW-AlCu4MgSi(A) o twardości 110 HB, w stanie utwardzenia T451. Próbkę miały wymiary 80×20 mm i stały promień krzywizny 250 mm [2].

Powierzchnie próbek frezowano kształtując frezem kulistym (VHM) o średnicy 8 mm, metodą wierszowania, ze stałym odchyleniem frezu od normalnej do powierzchni o kąt $\psi = 7,5^\circ$. Natomiast nagniatanie prowadzono w kierunku prostopadłym do kierunku frezowania. Programy sterujące obrabiarką – tak dla frezowania, jak i nagniatania – opracowano w systemie NX CAM.

Aby zmniejszyć tarcie i zwiększyć trwałość narzędzi, w procesie nagniatania jako środek smarujący stosowano olej maszynowy. Proces realizowano w jednym przejściu z wykorzystaniem wykonanego w IZTW nagniataka tocznego z ceramicznym elementem nagniatającym (Si_3N_4) w kształcie kulki o promieniu 4 mm. Próby nagniatania przeprowadzono:

- ze stałym dosunięciem 0,3 mm (ugięciem sprężyny nagniataka po zetknięciu się jego elementu roboczego z powierzchnią obrabianą),
- z posuwem roboczym $f_t = 8000$ mm/min,
- z siłą nagniatania $F_n = 50$ N,
- z posuwem wierszowania $f_{wn} = (0,02; 0,04; 0,06; 0,08)$ mm.

Frezowanie i nagniatanie przeprowadzono w jednym zamocowaniu na 5-osiowym centrum frezarskim DMC 75V Linear [3, 4].

Chropowatość powierzchni po frezowaniu i nagniataniu mierzono stykowym profilometrem TOPO 01P (konstrukcji IZTW). Przyrząd wyposażony był w głowicę pomiarową o zakresie 1 mm, z końcówką diamentową o promieniu 2 μm oraz kącie stożka 60° . Pomiar przeprowadzono z prędkością przesuwu 0,5 mm/s. Dobrano odstępy próbkowania:

- 0,2 μm dla powierzchni nagniatanych,
- 1 μm dla powierzchni frezowanych w kierunku pomiaru,
- 50 μm dla powierzchni frezowanych w kierunku prostopadłym do pomiaru.

Zmierzone powierzchnie poddano analizie z zastosowaniem filtracji Gaussa z długością fali *cut-off* wynoszącą 2,5 mm dla powierzchni frezowanych oraz 0,25 mm i 0,8 mm dla powierzchni nagniatanych.

Stan geometryczny warstwy wierzchniej określono przez pomiar parametrów struktury geometrycznej powierzchni

* Mgr inż. Janusz Kalisz (ios@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

TABLICA. Uśrednione wyniki badań nagniatania tocznego przy ustalonej sile nagniatania $F_n = 50$ N

Oznaczenie powierzchni	Posuw wierszowania f_{wn} mm	Parametry chropowatości										K_{Sa}
		Sa μm	Sq μm	Sz μm	Sp μm	Sv μm	Sk μm	Spk μm	Svk μm	Sku	Ssk	
F	–	2,696	3,306	12,367	8,517	3,850	4,921	6,045	0,158	2,853	1,159	–
N1	0,02	0,019	0,025	0,259	0,127	0,132	0,058	0,023	0,026	3,570	-1,020	143,1
N2	0,04	0,017	0,022	0,284	0,114	0,171	0,054	0,023	0,025	4,478	-0,144	159,9
N3	0,06	0,029	0,035	0,281	0,126	0,155	0,101	0,028	0,024	2,562	0,204	93,0
N4	0,08	0,076	0,090	0,754	0,327	0,427	0,246	0,072	0,048	2,300	0,234	35,5

Objaśnienia (wg PN-EN ISO 25178-2:2012): Sa – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni, Sq – średnia kwadratowa wysokość powierzchni, Sz – największa wysokość powierzchni, Sp – wysokość najwyższego wierzchołka powierzchni, Sv – głębokość najniższego dołu powierzchni, Sk – wysokość rdzenia, Spk – zredukowana wysokość wierzchołków, Svk – zredukowana głębokość wgłębień, Sku – współczynnik nachylenia powierzchni, Ssk – współczynnik asymetrii powierzchni

w układzie 2D i 3D. Oprócz wielkości zmierzonych bezpośrednio określono również współczynniki zmniejszenia chropowatości K_{Sa} :

$$K_{Sa} = \frac{Sa'}{Sa}$$

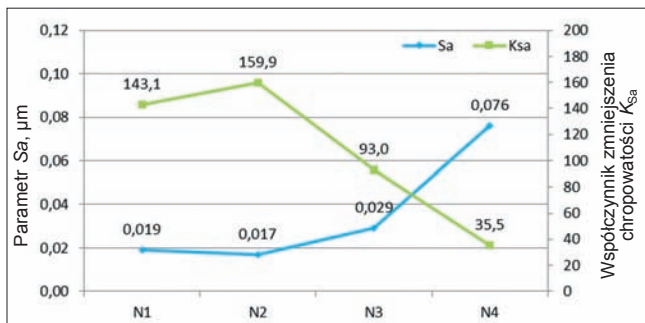
gdzie:

Sa' – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni (wg PN-EN ISO 25178-2:2012); wartości przed nagniataniem,
 Sa – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni; wartości po nagniataniu.

Wyniki badań

W tabelicy przedstawiono wartości parametrów chropowatości powierzchni po frezowaniu (F) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu (N1, N2, N3, N4).

Zależności parametru chropowatości powierzchni Sa oraz współczynnika zmniejszenia chropowatości K_{Sa} od posuwu wierszowania f_{wn} dla badanego stopu aluminium przedstawio-



Rys. 1. Zależność współczynnika zmniejszenia chropowatości K_{Sa} oraz parametru chropowatości Sa od posuwu wierszowania (N1: $f_{wn} = 0,02$ mm; N2: $f_{wn} = 0,04$ mm; N3: $f_{wn} = 0,06$ mm; N4: $f_{wn} = 0,08$ mm). Siła nagniatania $F_n = 50$ N

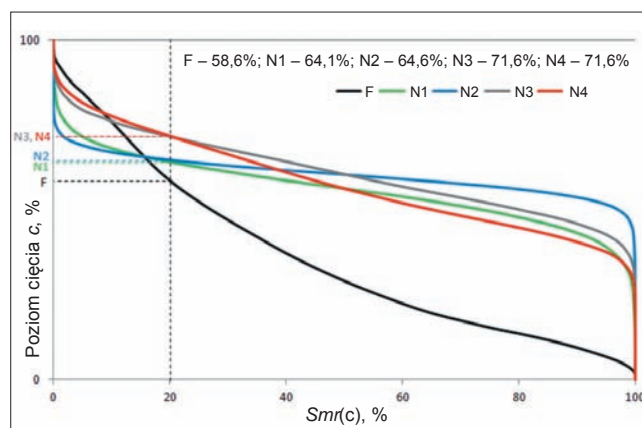


Rys. 2. Zależność parametru chropowatości $Sz = (Sp + Sv)$ od posuwu wierszowania (N1: $f_{wn} = 0,02$ mm; N2: $f_{wn} = 0,04$ mm; N3: $f_{wn} = 0,06$ mm; N4: $f_{wn} = 0,08$ mm). Siła nagniatania $F_n = 50$ N

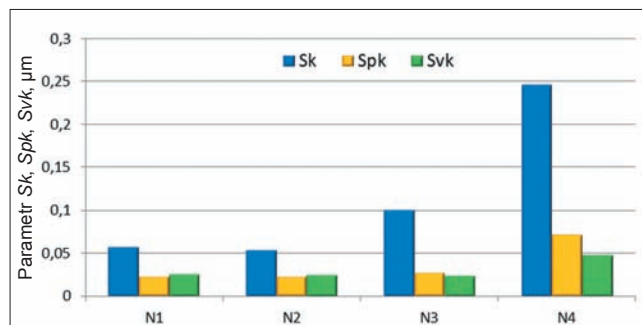
no na rys. 1. Najmniejszą wartość parametru $Sa = 0,017$ μm i największą wartość współczynnika $K_{Sa} = 159,9$ uzyskano dla $f_{wn} = 0,04$ mm.

Na rys. 2 przedstawiono zależność parametru Sz ($Sp + Sv$) od posuwu wierszowania f_{wn} . Najmniejszą wartość parametru $Sz = 0,259$ mm uzyskano dla $f_{wn} = 0,02$ mm.

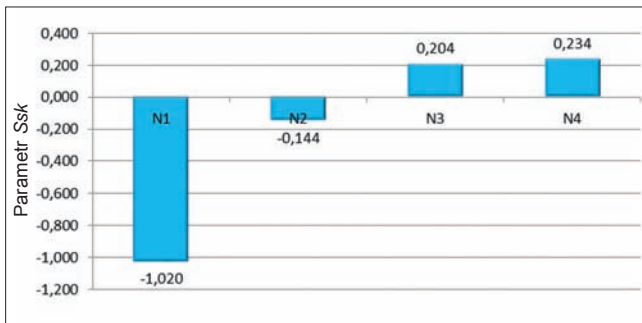
Powierzchnie po frezowaniu mają profile o niedostatecznych właściwościach nośnych w stosunku do stawianych im coraz większych wymagań, z krzywymi udziału materiałowego typu degresywnego z bardzo wysoką wartością parametru $Spk = 6,05$ μm . Po nagniataniu natomiast następuje korzystna zmiana kształtu krzywych udziału materiałowego – z niewielką częścią o charakterze degresywnym i większą częścią o charakterze progresywnym, a parametr Spk zostaje zredukowany do $0,023 \pm 0,072$ μm . Na podstawie wartości udziału materiałowego na głębokości 20% ($Smr(20)$) można zauważyć, że efektem nagniatania jest zwiększenie wartości



Rys. 3. Porównanie krzywych udziału materiałowego po frezowaniu (F) oraz sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu, przy różnych posuwach wierszowania (N1: $f_{wn} = 0,02$ mm; N2: $f_{wn} = 0,04$ mm; N3: $f_{wn} = 0,06$ mm; N4: $f_{wn} = 0,08$ mm). Siła nagniatania $F_n = 50$ N



Rys. 4. Parametry krzywej udziału materiałowego Sk , Spk i Svk po sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu z różnymi posuwami wierszowania (N1: $f_{wn} = 0,02$ mm; N2: $f_{wn} = 0,04$ mm; N3: $f_{wn} = 0,06$ mm; N4: $f_{wn} = 0,08$ mm). Siła nagniatania $F_n = 50$ N

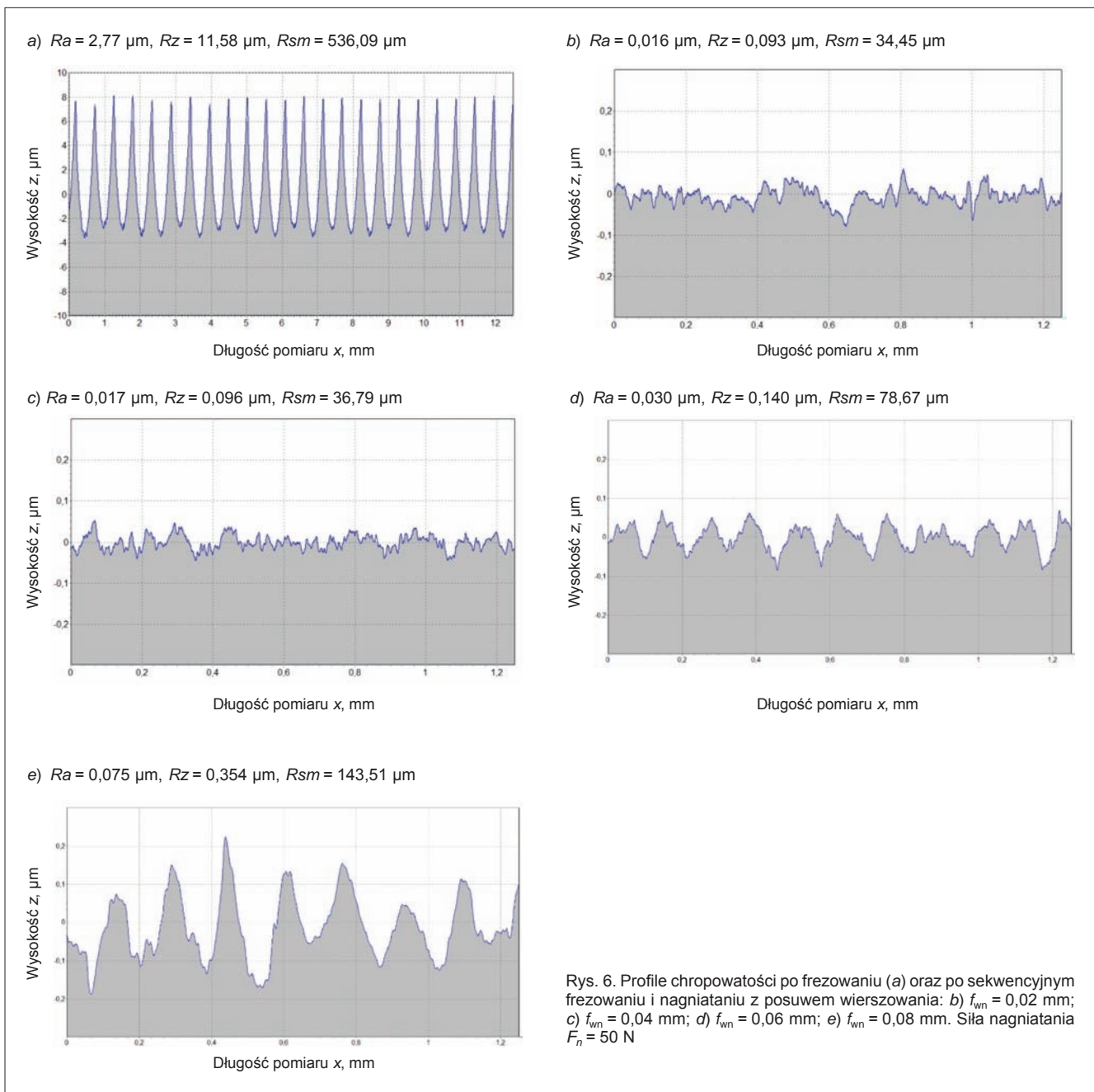


Rys. 5. Parametr asymetrii powierzchni Ssk po sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu z różnymi posuwami wierszowania (N1: $f_{wn} = 0,02$ mm; N2: $f_{wn} = 0,04$ mm; N3: $f_{wn} = 0,06$ mm; N4: $f_{wn} = 0,08$ mm). Siła nagniatania $F_n = 50$ N

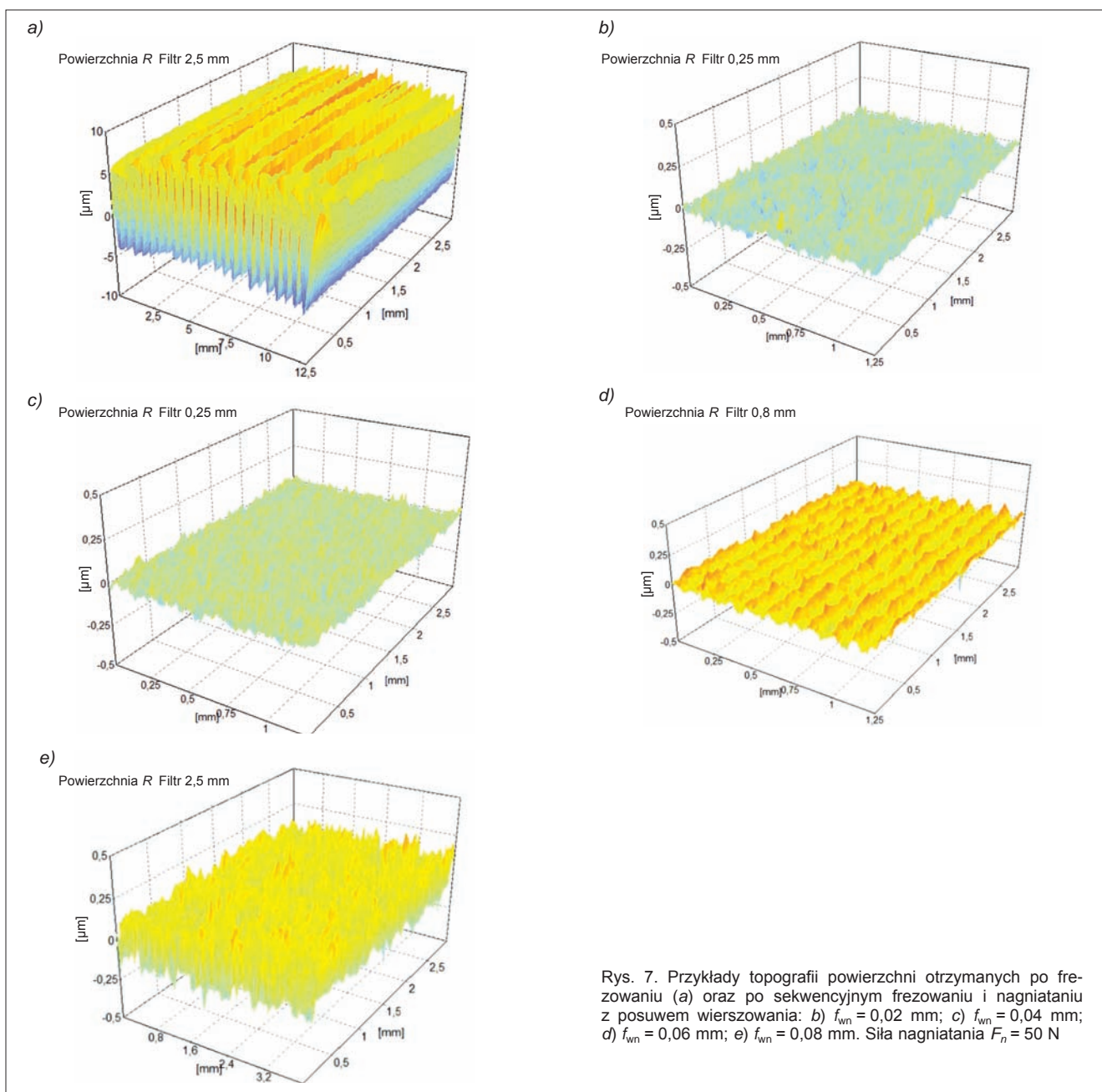
udziału materiałowego z 58,6% do 71,6% na górnej granicy rdzenia dla $f_{wn} = 0,06$ mm (N3) i $f_{wn} = 0,08$ mm (N4). Znaczne różnice w wartościach Smr można uzyskać na poziomach krzywych udziału materiałowego w obrębie wgłębień (rys. 3).

W zależności od posuwu wierszowania właściwości powierzchni mogą być zróżnicowane, co potwierdzają uzyskane wartości parametrów krzywej udziału materiałowego Sk , Spk i Svk (rys. 4) i wartości asymetrii (skośności) rozkładu rzędnych powierzchni Ssk (rys. 5). Parametr Ssk dla nagniatania z posuwem wierszowania $f_{wn} = 0,02$ mm (N1) i $f_{wn} = 0,04$ mm (N2) ma ujemne wartości. Dla pozostałych powierzchni po nagniataniu (N3, N4) generowane są krzywe udziału materiałowego, w których wartość Ssk jest dodatnia, co może świadczyć o większej sztywności stykowej tych powierzchni.

Efekt nagniatania widać na rys. 6, przedstawiającym porównanie profili powierzchni, a także na rys. 7, pokazującym topografię 3D po frezowaniu oraz po sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu. W wyniku nagniatania wszystkie ostre wierzchołki profilu powierzchni frezowanej zostały całkowicie zdeformowane, a wygenerowany profil jest gładki. Najmniejsze wartości parametrów Ra i Rz uzyskano dla posuwu wierszowania $f_{wn} = 0,02$ mm. Dla tego samego posuwu uzyskano najmniejszą wartość średniej szerokości elementów profilu (Rsm).



Rys. 6. Profile chropowatości po frezowaniu (a) oraz po sekwencyjnym frezowaniu i nagniataniu z posuwem wierszowania: b) $f_{wn} = 0,02$ mm; c) $f_{wn} = 0,04$ mm; d) $f_{wn} = 0,06$ mm; e) $f_{wn} = 0,08$ mm. Siła nagniatania $F_n = 50$ N



Podsumowanie

Analiza wyników badań wykazuje, że za pomocą posuwu wierszowania w procesie nagniatania można wpływać na osiąganą wartość parametrów wysokościowych chropowatości powierzchni (np. R_a w układzie 2D oraz S_a w układzie 3D) i współczynnik zmniejszenia chropowatości K_{Sa} . Równocześnie posuw wierszowania wpływa na kształt krzywej udziału materiałowego po nagniataniu – w zależności od wartości tego posuwu możliwe jest określenie najkorzystniejszego kształtu krzywej, wpływającego z kolei korzystnie na właściwości współpracujących powierzchni, takie jak np. odporność na ścieranie, przenoszenie nacisków, trwałość pasowania.

Na podstawie parametru S_{sk} dla wygenerowanych krzywych udziału materiałowego można oszacować sztywność stykową powierzchni. Właściwości nośne powierzchni mogą być oceniane za pomocą rozkładu parametrów przestrzennych: zredukowanej wysokości wzniesień Sp_k , zredukowanej wysokości rdzenia Sk i zredukowanej głębokości wgłębień Svk . Im mniejsza wartość parametru Sp_k , tym mniejszy nadatek powinien być przewidziany w eksploatacji na docieranie; świadczy to także o lepszych właściwościach tribo-

logicznych powierzchni. Natomiast większa głębokość wgłębień (Svk) niż wzniesień (Sp_k) oznacza z kolei polepszenie retencji i zdolności gromadzenia płynu w pustkach wgłębień.

Dla badanego stopu aluminium najmniejszą wartość parametru chropowatości powierzchni $S_{a,min} = 0,017$ μm oraz największy współczynnik zmniejszenia chropowatości uzyskano przy posuwie wierszowania $f_{wn} = 0,04$ mm. Największy udział materiałowy $S_{mr}(20) = 71,6\%$ uzyskano przy posuwie wierszowania $f_{wn} = 0,06$ mm i $f_{wn} = 0,08$ mm.

LITERATURA

1. Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne, 1987.
2. Czechowski K., Kalisz J. „Wybrane aspekty procesu nagniatania”. *Mechanik*. Nr 5–6 (2015): s. 452–455.
3. Kalisz J., Łętocha A., Grzesik W., Czechowski K. „Wpływ frezowania na topografię powierzchni krzywoliniowej po nagniataniu stopu aluminium”. *Mechanik*. Nr 8–9 (2015): s. 755–763.
4. 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): pp. 71–80.