

Mgr inż. Emilia BACHTIAK-RADKA, dr inż. Daniel GROCHAŁA,
dr inż. Krzysztof CHMIELEWSKI, prof. dr inż. Wiesław OLSZAK
(Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny):

BADANIA IZOTROPII POWIERZCHNI FREZOWANEJ I NAGNIATANEJ NA TWARDO ZE STALI X160CRMOV121

Streszczenie

Nagniatanie staje się coraz popularniejszą obróbką wykończeniową powierzchni przedmiotów o złożonym przestrzennie kształcie. Coraz częściej jest stosowana w produkcji form wtryskowych, matryc i tłoczników, a więc w przypadkach, gdy oprócz wymaganej dokładności geometrycznej duży nacisk kładzie się na stan warstwy wierzchniej. Integrowanie nagniatania z obróbką frezowaniem pozwala na uzyskanie powierzchni, których struktura geometryczna zależy od parametrów technologicznych obu zabiegów. Obecnie trudnością, na którą napotyka technolog, jest określenie takiego stanu powierzchni frezowanej, dla którego uzyska się zadowalające efekty wykończeniowego nagniatania. W artykule przedstawiono wyniki badań, w których do określenia efektywności parametrów technologicznych stosowanych w obu rodzajach obróbki użyto – oprócz parametrów struktury geometrycznej – parametrów izotropii powierzchni.

Słowa kluczowe: *izotropia powierzchni, frezowanie, nagniatanie*

THE ISOTROPY TESTS OF A MILLED AND HARD-BURNISHED SURFACE OF THE X160CRMOV121 STEEL

Abstract

Burnishing becomes an increasingly popular surface finishing treatment method of objects with a spatially complex shape. It is used increasingly more often in production of injection moulds, matrixes and dies, i.e. in cases when, apart from the required geometrical accuracy, much emphasis is placed on the condition of the outer layer. Integration of burnishing with milling allows obtaining of surfaces with a geometrical structure depending on the technological parameters of both techniques. Currently, a difficulty encountered by technologists is determination of such a milled surface condition for which satisfactory effects of finishing burnishing will be obtained. The article presents the results of tests in which, apart from the geometrical structure parameters, the surface isotropy parameters were used to determine the efficiency of the technological parameters used in both machining types.

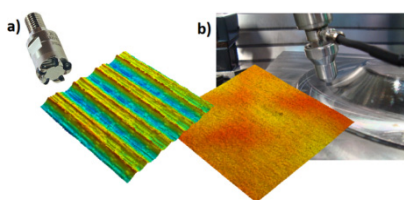
Keywords: *surface isotropy, milling, burnishing*

BADANIA IZOTROPII POWIERZCHNI FREZOWANEJ I NAGNIATANEJ NA TWARDO ZE STALI X160CrMoV121

Emilia BACHTIAK–RADKA¹, Daniel GROCHAŁA¹, Krzysztof CHMIELEWSKI¹,
Wiesław OLSZAK¹

1. FREZOWANIE I NAGNIATANIE NA TWARDO

Do największych problemów we współczesnych technikach wytwarzania należy zaliczyć możliwość świadomego kształtowania warstwy wierzchniej części dostosowanej do warunków w jakich będzie eksploatowana [1-11]. Skala problemu rośnie wraz ze wzrostem wymagań funkcjonalnych stawianych wytwarzanym przedmiotom oraz ze stopniem skomplikowania opracowanej technologii. Najczęściej technolog do wytworzenia powierzchni funkcjonalnych łączy w jednej operacji różne zabiegi obróbkowe [1-11, 13-18]. Za wartości pionowych i poziomych parametrów otrzymanej struktury geometrycznej powierzchni w dużej mierze odpowiedzialne są parametry technologiczne zrealizowanych zabiegów [1-3, 5-11, 15-18]. Jednak za końcową teksturę powierzchni oprócz parametrów technologicznych w dużej mierze odpowiada strategia prowadzenia narzędzi i oraz warunki kinematyczno- geometryczne ich pracy [1, 10] – rys. 1.

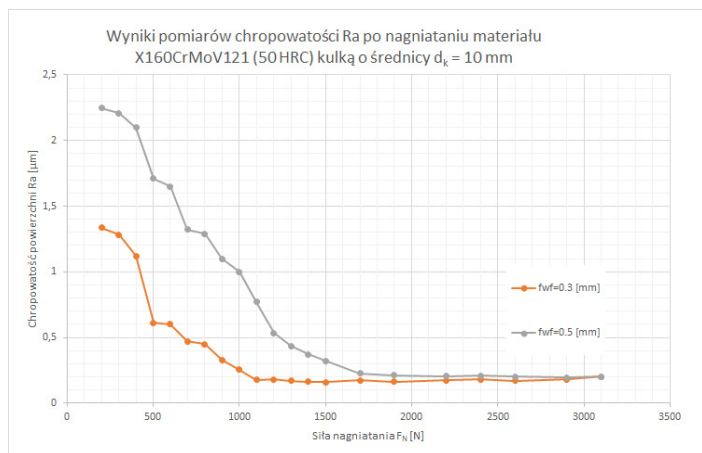


Rysunek 1. Widok powierzchni wytworzonej podczas: a) operacji frezowania; b) operacji łączącej zabieg kształtującego frezowania z wykończeniowym nagniataniem

W artykule opisano wyniki badań wpływu strategii prowadzenia freza podczas kształtującego frezowania i nagniatania w czasie wykończeniowego nagniatania przy obróbce na twar-do przedmiotów wykonanych ze stali X160CeMoV121 ulepszonej cieplnie do twardo-ści 52 ± 2 HRC – materiału powszechnie używa-nego w konstrukcji tłoczników.

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Technologii Mechanicznej, ul. Piastów 19, 70-310 Szczecin

Nagniatanie polega na siłowym oddziaływaniu twardym narzędziem na chropowatą powierzchnię przedmiotu obrabianego. Ze względu na twardość przedmiotu obrabianego problematyczne staje się dobranie odpowiedniej siły nagniatania F_N . Wcześniejsze prace prowadzone w Instytucie Technologii Mechanicznej ZUT w Szczecinie dowodzą, że użycie odpowiednio dużej siły nagniatania F_N umożliwia usunięcie dowolnie dużej pierwotnej chropowatości pozostawionej po frezowaniu – rys.2.



Rysunek 2. Wykres przebiegu parametru Ra w funkcji siły nagniatania F_N po nagniataniu materiału X160CrMoV121 (52HRC) kulka o średnicy $d_k=10$ mm po frezowaniu z wierszowaniem $f_w=0.3$ mm i $f_w=0.5$ mm

Łączone w jednej operacji zabiegi frezowania i nagniatania oprócz optymalizacji pod kątem wartości wysokościowych

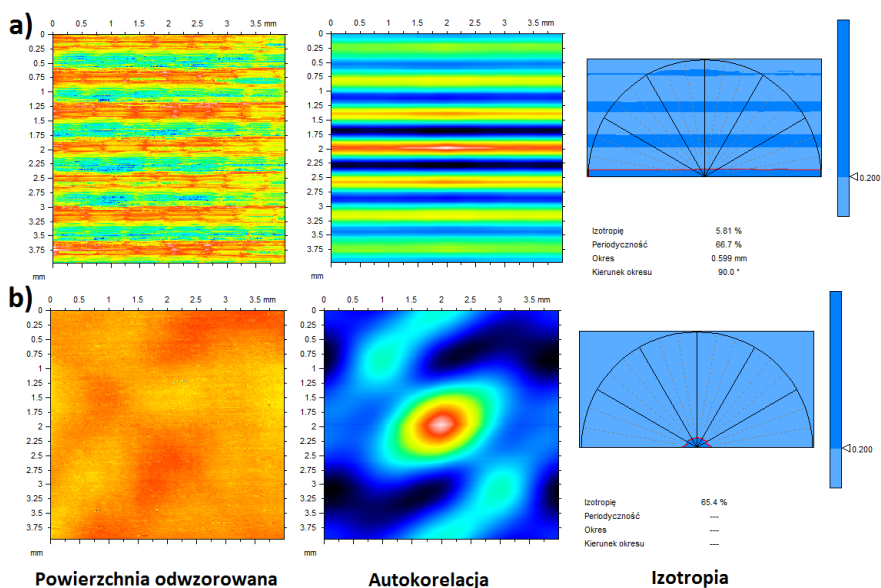
parametrów chropowatości należy również łączyć w sposób dający odpowiednio długi okres trwałości pracy narzędzi podczas skrawania i nagniatania [1,2]. Nadmierne wartości siły nagniatania F_N (rys. 2) mogą być niebezpieczne bo oprócz skrócenia okresu pracy ceramicznych (ZrO_2) elementów nagniatających prowadzić mogą do wytworzenia potencjalnie niebezpiecznego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej (pękanie i łuszczenie się powierzchni nagniatanej podczas eksploatacji części).

Podobnie jak przy obróbce materiałów miękkich również przy frezowaniu i nagniataniu na twardo można osiągnąć dobre efekty gładkościowe nawet przy znacznie obniżonych wartościach siły nagniatania F_N . Podstawowym warunkiem jest poprowadzenie obróbki w kilku przejściach i przy odpowiedniej trajektorii narzędzia nagniatającego w stosunku do śladów pozostawionych przez frez [1,10, 15]. Dodatkowym warunkiem oceny wytworzonej w takich warunkach powierzchni oprócz wartości wysokościowych parametrów SGP powinna być jej izotropowość.

2. IZOTROPIA POWIERZCHNI

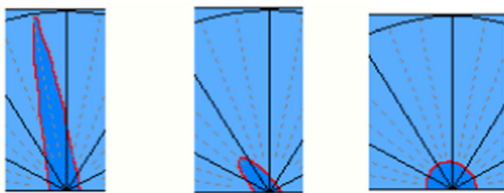
Sposób rozmieszczenia charakterystycznych śladów pozostawionych na powierzchni w skutek zastosowanej obróbki (narzędzi i parametrów technologicznych) nazywany stopniem izotropowości struktury. Powierzchnie, które są obrabiane skrawaniem a następnie poddawane nagniataniu mają istotną składową zdeteminowaną,

która wynika z odwzorowania kształtu ostrzy, posuwu na ostrze f_r i posuwu wierszowania f_{wf} freza, a później ze średnicy d_k i zastosowanego wierszowania f_{wn} podczas pracy narzędzia nagniatającego. Na tak ukształtowanej powierzchni, oprócz składowej zdeterminowanej zaobserwować można również nierówności o charakterze losowym. Udział w ogólnej wysokości chropowatości nierówności będących efektem frezowania i nagniatania może się bardzo różnić, w głównej mierze różnice te zależne są od przyjętej strategii pracy freza i nagniataka. Izotropowość SGP oznacza jednakową strukturę powierzchni we wszystkich kierunkach. Jednocześnie jest to struktura idealnie symetryczna względem wszystkich możliwych osi symetrii [19]. Istnieją różne możliwości określenia stopnia izotropowości struktury geometrycznej powierzchni. Najpowszechniejszym sposobem wyznaczenia stopnia izotropowości SGP jest analiza funkcji autokorelacji przy poziomie autokorelacji wynoszącym 0.2 [19]. Powierzchnie anizotropowe mają kształt funkcji autokorelacji asymetryczny, wydłużony oraz smukły w jednym kierunku – rys.3a, natomiast w przypadku powierzchni izotropowych kształt ten jest bardziej owalny, czasami okrągły i symetryczny – rys. 3b.



Rysunek 3. Określenie stopnia izotropowości a) anizotropowa powierzchnia frezowana z $f_{wr}=0.3\text{ mm}$ - 5.81 %, b) izotropowa - 65.4% powierzchnia po nagniataniu z posuwem wierszowania $f_{wn}=0.02\text{ mm}$

Izotropię wyraża się w procentach w przedziale od 0% do 100 %. Umownie przyjmuje się, że powierzchnie anizotropowe odznaczają się stopniem izotropowości mniejszym od 20%. Natomiast powierzchnie izotropowe mają stopień izotropowości wyższy od 80% - rys.4.



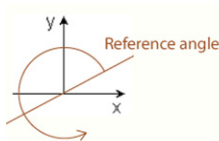
Powierzchnia anizotropowa ←-----→ powierzchnia izotropowa

Rysunek 4. Zmiana stopnia izotropii powierzchni

Prawidłowo zrealizowany proces obróbki łączący kształtujące frezowanie z wykończeniowym nagniataniem oprócz zmniejszenia wysokościowych parametrów SGP powinien prowadzić do zmiany otrzymanej tekstury powierzchni z tekstury typowej dla powierzchni anizotropowych (równoległa kierunkowość) do tekstury powierzchni

izotropowej (struktura bezkierunkowa). Stosowanie nadmiernej siły podczas nagniatania F_N owocować będzie ponownym przejściem od tekstury izotropowej do anizotropowej przy zmniejszeniu nierówności powierzchni pozostaną widoczne głębokie bruzdy powstałe w wyniku odtaczania się w dwóch kolejnych równoległych przejściach kulki nagniatającej. W analizie topografii powierzchni parametry przestrzenne opisujące cechy związane ze stopniem izotropii (tabela 1) wyznaczone są w oparciu o analizę spektralną informacji zawartych w rzędnych powierzchni na kierunkach zgodnych z kierunkiem osi X i Y analizowanej powierzchni.

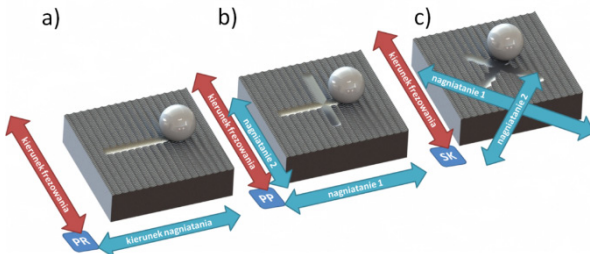
Tabela 1. Parametry topograficzne wykorzystywane w opisie izotropii powierzchni [19]

	<i>Nazwa parametru</i>	<i>Opis</i>
<i>Sal</i>	<i>Długość autokorelacji powierzchni</i>	Odległość pozioma funkcji autokorelacji (t_x, t_y), jej rozkład zależy od wartości, przy czym $0 < s < 1$. Domyślna wartość S wynosi 0,2. Parametr ten wyraża obecność długich i regularnych fal na powierzchni. Wysoka wartość tego parametru wskazuje na to, że w powierzchni obecne są regularne fale o niskich częstotliwościach. (1)
<i>Str</i>	<i>Wzdłużna struktura powierzchni</i>	Jest to stosunek najkrótszego spadku długości fal powierzchni przy autokorelacji 0,2 do fal o największej długości. Wartość tego parametru mieści się w przedziale między 0 i 1. Jeśli wartość jest bliska 0, można powiedzieć, że powierzchnia jest anizotropowa. Natomiast przy wartościach bliskich 1 mamy do czynienia z powierzchniami izotropowymi
<i>Std</i>	<i>Kierunkowość struktury powierzchni</i>	Parametr ten oblicza główny kąt tekstury powierzchni na podstawie widma polarnego rzędnych powierzchni. Parametr określany jest dla powierzchni anizotropowych w sytuacji gdy wartość parametru Str jest niższa od 0,5. Kierunkowość struktury podana jest w mierze kątowej w przedziale od do , w kierunku przeciwnym do osi odniesienia. 

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

3.1. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ

W Instytucie Technologii Mechanicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie przeprowadzono serię badań, których celem było określenie wpływu wzajemnej trajektorii kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania na izotropię powierzchni. Do analizy włączono również wybrane wysokościowe parametry struktury geometrycznej powierzchni 3D. Przygotowano próbki o wymiarach 100x100x20mm z materiału X160CrMoV121, które następnie ulepszone cieplnie do twardości 52±2 HRC. Pierwszą częścią pracy było frezowanie próbek na centrum frezarskim DMG DMU-60 MONOBLOK. Głowicę torusową (WNT R1000G.42.6.M16.IK) z sześcioma płytkami skrawającymi o średnicy $d_p=10$ mm (RD.X1003 MOT – WTN1205) ustawiono pod kątem 15° w stosunku do osi maszyny. Nagniatanie prowadzono na centrum frezarskim MIKRON VCE 500. W badaniach stosowano wykonany w ITM ZUT nagniatnik hydrostatyczny z siłownikiem miechowym i z ceramiczną kulką nagniatającą o średnicy $d_k=10$ mm (ZrO₂). Do badań wytypowano trzy strategie nagniatania – rys. 5.



Rysunek 5. Strategie nagniatania, a) ortogonalna - z jednym przejściem nagniatającym PR; b) podwójnie ortogonalna z dwoma przejściami nagniatającymi PP, c) krzyżowo skośna z dwoma przejściami nagniatającymi SK

Wartość siły nagniatania $F_N=800$ N przyjęto w taki sposób aby był widoczny znaczny spadek wysokości nierówności powierzchni frezowanej (o około 50% - rys.1), przy którym nie dojdzie jeszcze do całkowitej deformacji plastycznej nierówności powierzchni po frezowaniu. Pozostałe parametry technologiczne obróbki użyte podczas kształtującego frezowania i wykończeniowego nagniatania zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie technologicznych parametrów frezowania i nagniatania podczas badań wpływu strategii na izotropię powierzchni nagniatanej

Strategia	Nazwa param.	prędkość skrawania	głębokość warstwy skrawanej	posuw na obrót	posuw poprzeczny frezowania (wierszowanie)		posuw poprzeczny przy nagniataniu	prędkość nagniatania	siła nagniatania	średnica kulki nagn.
	symbol	v_c	a_p	f_r	f_{wf}		f_{wn}	v_b	F_N	d_k
	jedn.	m/min	mm	mm/obr.	mm		mm	mm/min	N	mm
PR	110	0.5	0.6	A=0.3	B=0.5	0.02; 0.08; 0.14; 0.2	8000	800	10	
PP	110	0.5	0.6	A=0.3	B=0.5	0.02; 0.08; 0.14; 0.2	8000	800	10	
SK	110	0.5	0.6	A=0.3	B=0.5	0.02; 0.08; 0.14; 0.2	8000	800	10	

Dla każdej z trzech badanych strategii przygotowano próbki zawierające po dwa warianty powierzchni frezowanej z wierszowaniem f_{wf} A=0.3 mm i B=0.5 mm, na każdym z otrzymanych pól przeprowadzono nagniatanie z czterema wytypowanymi posuwami wierszowania f_{wn} =0.02mm; 0.08 mm; 0.14 mm oraz 0.2 mm, co dało łącznie 24 pola pomiarowe. Przygotowano również jedną próbkę referencyjną, której nie poddano nagniataniu, pozostałe dwa pola pomiarowe służyły ocenie topografii powierzchni frezowanej na twardo.

3.2. POMIARY IZOTROPII POWIERZCHNI

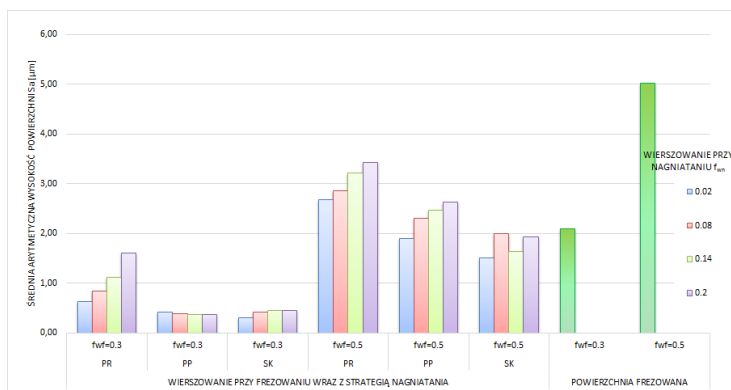
Pomiary SGP prowadzono z wykorzystaniem multisensorycznej maszyny do badań topografii powierzchni AltiSurf A520, firmy Altimet uzbrojonej w chromatyczny sensor konfokalny CL1 [12] o zakresie pracy do 130 μ m i rozdzielczości pionowej 8 nm. Pomiary wykonano na polach o wymiarach 3,0 x 3,0 mm. Eksperymentalnie ustalono rozdzielczość skanowania wzdłuż osi X na 0.47 μ m i 5 μ m wzdłuż osi Y co dało 6303 punktów w 601 liniach. Pomiar prawie 3.8 mln punktów dla każdej z powierzchni trwał średnio 1.5 h. Analizę zebranych danych i opracowanie topografii powierzchni (zgodnie z normą ISO 25178) prowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Alti-Map PREMIUM 6.2. Każdorazowo dla zarejestrowanej chmury punktów mierzonej powierzchni stosowano metodykę analizy topografii powierzchni, która obejmowała wyznaczenie wartości progowej celem usunięcia błędnie zebranych punktów powierzchni (punkty usuwane ustawiono jako wartości niemierzone). Następnie powierzchnię poziomowano (płaszczyznę średnią aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów LS). Na koniec wyznaczono parametry topograficzne wykorzystywane w opisie izotropii oraz wybrane wartości stereometrycznych parametrów chropowatości wg ISO 25178 – tabela 3.

Tabela 3. Wartości wybranych parametrów wysokości SGP i izotropowości zarejestrowane podczas badań

Nazwa parametru [jednostka] opis parametru	Wierszowanie przy nagniataniu	Frezowanie i nagniatanie wg przyjętej strategii						Frezowanie	
		PR	PP	SK	PR	PP	SK		
		$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.5$	$f_{wf}=0.5$	$f_{wf}=0.5$	$f_{wf}=0.3$	$f_{wf}=0.5$
Izotropia powierzchni [%]	0.02	8,935	23,811	26,964	14,578	14,746	16,213	8,07	13,3
	0.08	8,589	10,789	9,553	14,522	14,727	14,906		
	0.14	8,397	16,506	9,416	14,417	14,548	14,933		
	0.2	8,066	10,961	9,981	14,758	14,501	14,696		
SaI [mm] Długość korelacji powierzchni	0.02	0,135	0,360	0,280	0,221	0,224	0,246	0,122	0,2
	0.08	0,129	0,162	0,144	0,220	0,223	0,226		
	0.14	0,127	0,248	0,142	0,219	0,221	0,227		
	0.2	0,121	0,165	0,150	0,224	0,220	0,223		
Str Wydłużenie struktury powierzchni	0.02	0,089	0,238	0,270	0,146	0,147	0,162	0,0807	0,133
	0.08	0,086	0,108	0,096	0,145	0,147	0,149		
	0.14	0,084	0,165	0,094	0,144	0,145	0,149		

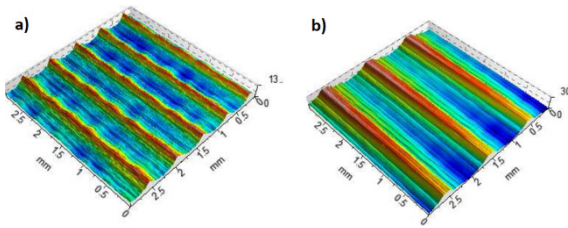
	0.2	0,081	0,110	0,100	0,148	0,145	0,147		
Std Kierunkowość struktury powierzchni	0.02	90,252	90,249	90,023	90,269	90,030	90,016	90	90
	0.08	90,042	90,252	90,020	90,245	90,242	90,018		
	0.14	90,044	90,028	90,028	90,275	90,029	90,002		
	0.2	90,252	90,034	90,011	90,249	90,037	90,006		
Sa [µm] Średnia arytmetyczna wysokość powierzchni	0.02	0,635	0,421	0,307	2,679	1,891	1,510	2,1	5,02
	0.08	0,832	0,389	0,423	2,851	2,298	1,999		
	0.14	1,116	0,362	0,453	3,222	2,471	1,641		
	0.2	1,608	0,363	0,443	3,422	2,635	1,926		
Sq [µm] Wysokość średniokwadratowa powierzchni	0.02	0,756	0,521	0,382	3,014	2,143	1,772	2,48	5,94
	0.08	0,989	0,484	0,507	3,203	2,606	2,321		
	0.14	1,323	0,442	0,543	3,600	2,771	1,906		
	0.2	1,962	0,448	0,540	3,861	2,967	2,219		
Sp [µm] Maksymalna wysokość piku powierzchni	0.02	3,543	3,102	3,400	5,964	11,273	5,964	6,43	13,7
	0.08	3,585	2,022	3,374	7,435	12,616	7,191		
	0.14	4,409	2,359	3,581	7,548	5,544	4,265		
	0.2	4,341	2,584	3,738	9,747	18,845	6,270		
Sv [µm] Maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni	0.02	3,301	2,760	2,588	7,017	4,670	5,248	4,93	9,21
	0.08	3,762	2,196	3,133	7,301	5,865	6,089		
	0.14	4,926	2,306	2,568	8,046	6,091	4,927		
	0.2	6,282	3,185	3,567	8,940	5,827	6,848		

W każdym przypadku obróbki znacząco zmalała wartość pozostawionej po frezowaniu chropowatości powierzchni (rys.6) średnio o około 70% dla powierzchni frezowanych z posuwem $f_{wf}=0.3$. Nagniatanie powierzchni frezowanych z wartością posuwu wierszowania $f_{wf}=0.5$ było mniej efektywne, dla tego przypadku średni poziom redukcji chropowatości osiągnął blisko 50%. Najlepszą strategią do nagniatania wysokich nierówności po frezowaniu ($f_{wf}=0.5$) była strategia krzyżowo skośna z dwoma przejściami nagniatającymi SK – dla niej zarejestrowano redukcję wysokościowych parametrów chropowatości na średnim poziomie 65%.



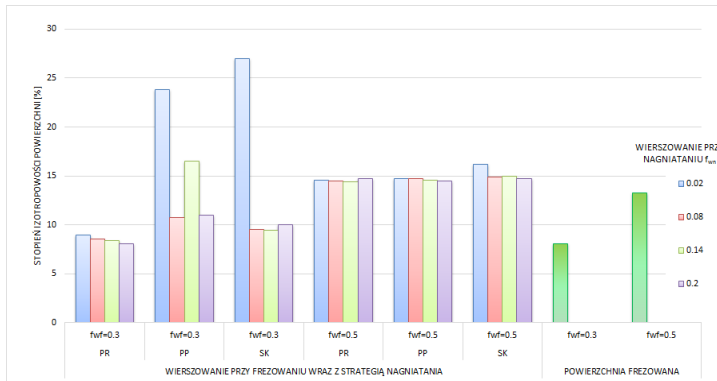
Rysunek 6. Zależność parametru Sa powierzchni w funkcji wierszowania i strategii nagniatania

Powierzchnie otrzymane po frezowaniu narzędziem torusowym przedstawiono na rysunku 7.

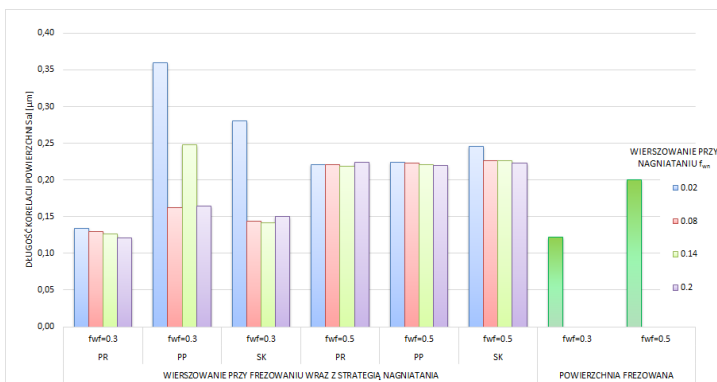


Rysunek 7. Anizotropowe powierzchnie próbek po: a) frezowaniu z posuwem wierszowania $f_{wf}=0.3$ mm, $S_a=2.1$ μ m i izotropia=8.07 %; b) frezowaniu z posuwem wierszowania $f_{wf}=0.5$ mm, $S_a=5.02$ μ m izotropia=13.3 %

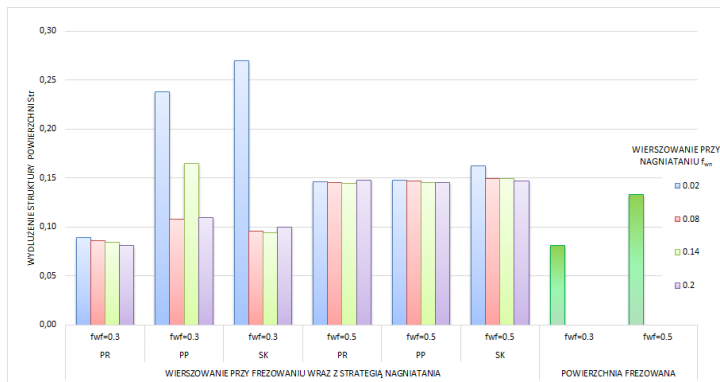
Stopień izotropowości powierzchni otrzymany po nagniataniu (rys.8) wzrósł w nieznacznym stopniu w stosunku do powierzchni frezowanej. Zarejestrowany średni wzrost stopnia izotropowości wynosi około 50% dla powierzchni frezowanych z posuwem wierszowania $f_{wf}=0.3$ oraz około 15% dla pól frezowanych z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$. W żadnym ze zrealizowanych przypadków obróbki nie udało się przekroczyć stopnia izotropowości powyżej 50%. Podobne zachowanie do stopnia izotropowości wykazują wartości parametrów długość korelacji powierzchni S_{al} (rys.9) oraz wydłużenie struktury powierzchni Str (rys.10).



Rysunek 8. Zależność stopnia izotropowości powierzchni w funkcji wierszowania przy frezowaniu i strategii nagniatania



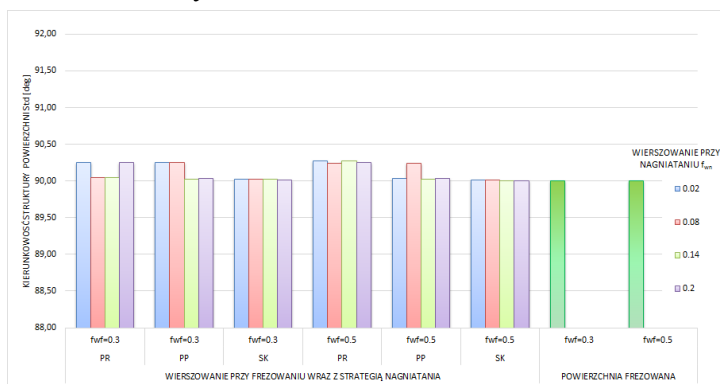
Rysunek 9. Zależność parametru S_{al} powierzchni w funkcji wierszowania przy frezowaniu i strategii nagniatania



Rysunek 10. Zależność parametru Str powierzchni w funkcji wierszowania przy frezowaniu i strategii nagniatania

Najwyższą poprawę parametrów związa-

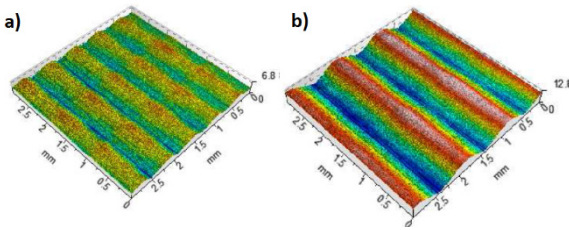
nych z izotropią powierzchni (przejście z okresowej struktury anizotropowej do bezkierunkowej struktury izotropowej) zapewniła strategia obróbki krzyżowo skośna SK i strategia podwójnie ortogonalna PP z dwoma przejściami nagniatającymi podczas nagniatania z najmniejszą wartością posuwu wierszowania $f_{wn}=0.02$ mm. Dla tych warunków nagniatania zanotowano wzrost parametrów wyższy o około 55% w stosunku do nagniatania z pozostałymi wartościami wierszowania f_{wn} . Pomimo znacznej redukcji wysokościowych parametrów SGP wciąż na powierzchni dominuje kierunkowość otrzymana w skutek zastosowanego wierszowania przy frezowaniu f_{wf} . Doskonale obrazuje to parametr mówiący o kierunkowości struktury Std (kąt pomiędzy długimi regularnymi nierównościami, mierzony w stosunku do osi X próbki). W żadnym z przypadków zrealizowanego nagniatania nie udało się zmienić kąta kierunkowości struktury, którego wartość podczas badań cały czas oscylowała wokół wartości 90° – rys.11.



Rysunek 11. Zależność parametru Std powierzchni w funkcji wierszowania przy frezowaniu i strategii nagniatania

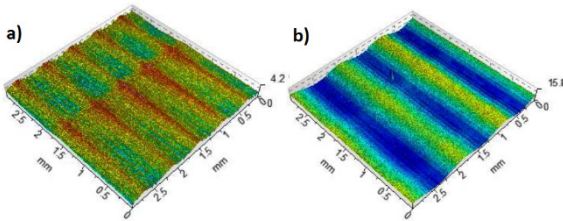
Widok powierzchni otrzymanej po frezo-

waniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i nagniataniu według strategii ortogonalnej PR z jednym przejściem nagniatającym z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm przedstawiono na rysunku 12a, rysunek 12b przedstawia powierzchnię frezowaną z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$ mm poddaną nagniataniu z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$.



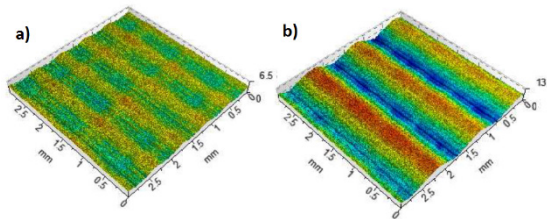
Rysunek 12. Efekty obróbki według strategii ortogonalnej z jednym przejściem nagniatającym PR z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm po uprzednim frezowaniu z posuwem wierszowania: a) $f_{wf}=0.3$ mm, b) $f_{wf}=0.5$ mm

Na rysunku 13a przedstawiono widok powierzchni otrzymanej po frezowaniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i nagniataniu według strategii podwójnie ortogonalnej PP z dwoma przejściami nagniatającymi z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm, rysunek 13b przedstawia powierzchnię frezowaną z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$ mm poddaną nagniataniu z tą samą strategią PP z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$



Rysunek 13. Efekty obróbki według strategii podwójnie ortogonalnej z dwoma przejściami nagniatającymi PP z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm po uprzednim frezowaniu z posuwem wierszowania: a) $f_{wf}=0.3$ mm, b) $f_{wf}=0.5$ mm

Rysunek 14a przedstawia widok powierzchni otrzymanej po frezowaniu z wierszowaniem $f_{wf}=0.3$ mm i nagniataniu według strategii krzyżowo skośnej SK z dwoma przejściami nagniatającymi z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm, rysunek 14b przedstawia powierzchnię frezowaną z wierszowaniem $f_{wf}=0.5$ mm poddaną nagniataniu z tą samą strategią SK przy wierszowaniu nagniatania $f_{wn}=0.02$



Rysunek 14. Efekty obróbki według strategii krzyżowo skośnej z dwoma przejściami nagniatającymi SK z wierszowaniem $f_{wn}=0.02$ mm po uprzednim frezowaniu z posuwem wierszowania: a) $f_{wf}=0.3$ mm, b) $f_{wf}=0.5$ mm

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wykorzystanie parametrów izotropowości powierzchni do opisu efektywności obróbki - zmiany tekstury powierzchni regularnej, okresowej - na strukturę bezkierunkową (anizotropowej na izotropową) jest bardzo wygodne dla technologa. W ten sposób unika się subiektywnej oceny wytworzonej powierzchni (zależnej od wiedzy i praktyki zdobytej przez technologa). Dodatkowe kryterium izotropowości połączone z wartościami wysokościowych parametrów SGP pozwala na bardziej wydajny dobór

technologicznych parametrów obróbki często różnych zabiegów obróbkowych łączonych w jednej operacji technologicznej.

W trakcie przeprowadzonych badań najkorzystniejszą spośród badanych strategii okazała się strategia SK z dwoma skrzyżowanymi przejściami nagniatającymi zorientowanymi skośnie w stosunku do śladów pozostawionych przez frez. Również dobre efekty pozwala osiągnąć strategia podwójnie ortogonalna z dwoma przejściami nagniatającymi w tym przypadku warunkiem gwarantującym sukces jest użycie małej wartości posuwu wierszowania przy nagniataniu f_{wn} . Najslabiej podczas badań wypadła strategia ortogonalna podczas, której zrealizowano tylko jedno przejście nagniatania, prostopadłe do śladów pozostawionych przez frez.

Analizując jedynie redukcję wysokościowych parametrów SGP można by uznać, że dokonano istotnej modyfikacji plastycznej (zmiany wysokości, kształtu i przebiegu krzywej Abbota) nierówności powstałych w skutek frezowania. Jednak podczas badań nie udało się przejść od stanu anizotropowej powierzchni frezowanej do izotropowego efektu po nagniataniu (stopień izotropowości wyższy od 80%), jest to spowodowane zbyt małą wartością przyjętej siły nagniatania ($F_N=800N$) i stosunkowo niewielkimi odkształceniami plastycznymi stali X160CrMoV121. Przeprowadzoną serię badań należy powtórzyć realizując nagniatanie przy znacznie wyższej wartości siły F_N .

Istnieje duże prawdopodobieństwo, że wytworzona SGP narzędzia (tłoczniaka lub matrycy) w początkowym okresie eksploatacji będzie przenoszona na powierzchnię wytwarzanych wyrobów powodując ich zmatowienie.

LITERATURA

- [1] Grochała D.: „Nagniatanie narzędziami hyrostatycznymi powierzchni przestrzennych złożonych na frezarkach CNC”. Rozprawa doktorska ITM ZUT w Szczecinie 2012.
- [2] Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z.: „Stress In the surface layer of objects burnished after milling”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology ISSN 0268-3768 2014r., volume 71, nr 9-12,
- [3] Grochała D., Sosnowski M.: „Problemy technologii nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych”. Miesięcznik naukowo – techniczny MECHANIK 1/2011 s.14-18.
- [4] Gubała R., Grochała D., Olszak W.: „Mikrohydrauliczne narzędzie do nagniatania złożonych powierzchni przestrzennych” Miesięcznik naukowo – techniczny MECHANIK 1/2014 s.22-23.
- [5] Grzesik W., Żak K.: „Investigation of technological effects of ball burnishing after cryogenic turning of hard steel”. Advances in Manufacturing Science And Technology, vol 38, Nr 1/2014 s.37-52
- [6] Kalisz J., Żak K., Grzesik W., Czechowski K.: „Characteristics of surface topography after rolling burnishing of EM AW-AlCu4MgSi(A) Aluminum alloy”. Journal of Machine Engineering, No.1 2015, Vol. 15 s. 71-80
- [7] Kukiełka L., Kułakowska A., Patyk R.: Numerical Analysis and Experimental Researches of Burnishing Rolling Process of Workpieces with Real Surface. The 13th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Floryda, 2009, pp. 63-68

- [8] Kułakowska A., Kukielka L.: „Numerical Analysis of influence of surface geometrical structure prepared under burnishing rolling onto the state of strains and stress in product surface layer”. *Computer Methods in Materials Science*, Kraków 2009, str.66-71
- [9] Kwaczyński W., Chmielewski K., Grochała D.: „Programowanie frezowania i nagniatania złożonych powierzchni przestrzennych na centrach frezarskich ze sterowaniem wieloosiowym”. *Współczesne problemy technologii obróbki przez nagniatanie Tom III – Monografia pod red. prof.W. Przybylskiego – Politechnika Gdańska – Wydział Mechaniczny – Gdańsk 2011- ISBN 978838857957-8, s.179-191*
- [10] Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Munoa J., Sanchez J.A.: „Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2005r., nr 45, s.1659-1668.
- [11] Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Sanchez J.A., Arana J.L.: „The effect of ballburnishing on heat-treated steel and inconel 718 milled surfaces”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007r., nr 32, s.958-968.
- [12] Mathia T., Pawlus P., Wieczorowski M.: „Recent trends in surfacemetrology”. 2011 *Wear* 271, s.494–508.
- [13] Patyk R., Kukielka L.: Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing, The 12 th International Conference Metalforming 2008, AGH Kraków 21 – 24 September 2008. *Steel Research International Special Edition Volume 2 2008, Publishing Company VerlagStahleisen GmbH ISBN 978 – 3 –514 – 00745 –3, s. 642 - 647*
- [14] Polowski W., Czechowski K., Tobała D., Rusek P., Kalisz J., Janczewski Ł.: „Wybrane aspekty obróbki wiórowej jako obróbki poprzedzającej nagniatanie” *Monografia VI Szkoły Obróbki Skrawaniem - Obróbka Skrawaniem Efektywne Wytwarzanie, Wrocław 2012 ISBN978-83-91-917677-7-1, s.503-512*
- [15] Rodríguez A., López de Lacalle L.N., Celaya A., Lamikiz A., Albizuri J. : „Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique”. *Surface & Coatings Technology* 2012r., nr 206, s.2817–2824
- [16] Shiou F.J., Chen C.H.: „Determination of Optimal Ball-Burnishing Parameters for Plastic injection Moulding Steel”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2003r., nr 3, s.177-185.
- [17] Shiou F.J., Chen C.H.: „Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes”. *Journal of Materials Processing Technology* 2008r., nr 201, s.554-559.
- [18] Shiou F.J., Chuang C.H.: „Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell”. *Precision Engineering* 2010r., nr 34, s.76-84.
- [19] ISO 25178-2, Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters