

*frezowanie walcowe, posuw, chropowatość powierzchni
plain milling, feed rate, roughness of surface*

Edward MIKO¹
Łukasz NOWAKOWSKI²

WPLYW POSUWU NA OSTRZE NA PARAMETRY CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI FREZOWANYCH WALCOWO

Proces powstawania struktury geometrycznej powierzchni (SPG) jest bardzo złożony i wpływa na niego wiele czynników. Strukturę geometryczną powierzchni opisuje zbiór wszystkich nierówności powierzchni rzeczywistej tj., odchyłki kształtu, falistości, chropowatości. Podjęto próbę określenia wpływu posuwu na chropowatość powierzchni frezowanych walcowo. Przeprowadzono badania laboratoryjne frezowania walcowego frezem trzpieniowym.

THE INFLUENCE OF FEED RATE PARAMETER ON THE SURFACE ROUGHNESS FORMED BY PLAIN MILLING

The process of surface generation is complex and depends on numerous factors. The geometry of a surface is described by the sum of all irregularities of the actual surface, i.e. Deviations in form, waviness and roughness. This study focuses on determining the influence of feed rate parameter on the surface roughness formed by plain milling. The laboratory plain milling tests were conducted using a end mill.

1. WSTĘP

Frezowanie walcowe jest często stosowaną operacją obróbki konturu za pomocą frezu trzpieniowego, zwykle jest to obróbka ostateczna i uzyskana w jej wyniku obrobiona powierzchnia nie podlega już żadnym procesom wykończeniowym [3, 4, 5, 7]. W związku z powyższym przeprowadzono badania, które miały na celu, określenie wpływu wybranych czynników obróbki na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni (SGP) podczas frezowania walcowego fezem trzpieniowym próbek wykonanych ze stali C45. Próby skrawania przeprowadzono bez płynu chłodząco smarującego [9, 10] na pionowym centrum obróbkowym DMU50 [18] zgodnie z parametrami zamieszczonymi w tabeli 1. Proces frezowania walcowego wykonano frezem trzpieniowym firmy Horex [17].

W pracy przedstawiono wyniki badań, analizy wpływu posuwu na ostrze na wybrane parametry chropowatości powierzchni frezowanych walcowo. Wynikiem przeprowadzonych analiz było określenie optymalnego posuwu na ostrze przy którym analizowane parametry chropowatości powierzchni Sa, Ra, RSm, Rdq, [13, 14] osiągały najmniejsze wartości.

2. METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań, było określenie wpływu posuwu na ostrze na chropowatość powierzchni uzyskanych podczas frezowania walcowego stali C45.

W pracy badawczej wykorzystano program statyczny zdeterminowany selekcyjny jednoczynnikowy PS/DS-U [1, 11]. Parametrem, który ulegał zmianie był posuw na ostrze f_z . Parametry obróbkowe dobrano zgodnie z zaleceniami producenta, biorąc pod uwagę obrabiany materiał. Zestawienie parametrów skrawania zostało przedstawione w tabeli 1. Próby skrawania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego bez płynu chłodząco smarującego na pionowym centrum obróbkowym DMU50 [16, 18]. Narzędziem wykorzystanym podczas obróbki był frez trzpieniowy o średnicy 16 mm wyposażony w 8 ostrzy skrawających firmy Horex (rys. 1) [17]. Frez trzpieniowy wykonany został z drobno ziarnistego węgla spiekanego. Jest to wysokowydajny frez wieloostrowy do skrawania w zakresie obróbki HPC (High Performance Cutting). Kąt pochylenia linii śrubowej wynosi 50°, frez przeznaczony jest do wykończeniowego frezowania obwodowego, dopuszczalnie jest płytkie frezowanie czołowe [17].

¹ Łukasz Nowakowski, dr inż. Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25314 Kielce, e-mail: lukasn@tu.kielce.pl

² Edward Miko, dr hab. inż. prof. PŚk. – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25314 Kielce, e-mail: emiko@tu.kielce.pl



Rys. 1. Frez trzpieniowy [17]

Tab. 1. Warunki frezowania frezem trzpieniowym badanych próbek

Parametry skrawania próbek			
$a_p = 0,5$ [mm]		$v_c = 150$ [m/min]	
1	f_z [mm/ostrze]	n [obr/min]	v_t [mm/min]
2	0,005	2986	120
3	0,01	2986	239
4	0,015	2986	259
5	0,02	2986	478
6	0,025	2986	597
7	0,03	2986	717
8	0,035	2986	836
9	0,04	2986	955
10	0,045	2986	1075
11	0,05	2986	1194
12	0,055	2986	1313

Widok ogólny



Rozwiązanie konstrukcyjne



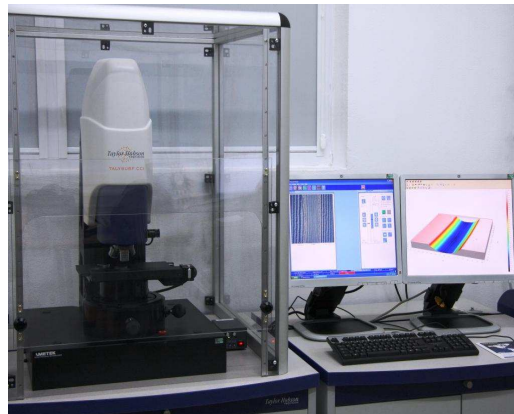
Stół		Przesuw		Wrzeciono		Dokładność	
powierzchnia	1000 × 540 mm	X - wzdłużny stołu	800 mm	końcówka wrzeciona	ISO 40	dokładność pozycjonowania	+/- 0,01 μm
max. obciążenie stołu	750 kg	Y - poprzeczny sań	540 mm	max. obroty wrzeciona	10000obr/min		
		Z - pionowy wrzeciennika	620 mm	moc napędu głównego	9 / 13 kW		

Rys. 2. Budowa i możliwości technologiczne pionowego centrum obróbkowego DMG DMU 50

Uniwersalna frezarka sterowana numerycznie DMU 50 (rys. 2) posiada sterowany NC stół uchylny-obrotowy z napędami cyfrowymi, co umożliwia kompleksową obróbkę przedmiotów w maksymalnie dwóch zamocowaniach. Hydrauliczny zacisk stołu jest zawarty w stole uchylny-obrotowym, a bardzo duży zakres obrotów do 115° ($-5^\circ / +110^\circ$) umożliwia podcinanie pod kątem do 20° . Magazyn o pojemności 16 narzędzi umożliwia realizację różnorodnych zadań frezarskich. Maksimum stabilności zagwarantowane jest dzięki nowoczesnej budowie suportu krzyżowego ze sztywnym żeliwnym korpusem, który zapewnia dużą dokładność i wysoką jakość obrabianych powierzchni [16, 18].

3. ANALIZA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI

Uzyskane w wyniku frezowania walcowego powierzchnie próbek poddawano wszechstronnej analizie. Pomiar metrologiczny przeprowadzono w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Wykonano pomiar topografii powierzchni 3D wszystkich próbek z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych firmy Taylor Hobson Talysurf CCI – Lite Non-contact 3D Profiler [12, 15, 19]. Talysurf CCI – Lite Non-contact 3D Profiler (rys. 3) to system pomiarowy do wykonywania optycznych, bezstykowych pomiarów i analiz struktury geometrycznej powierzchni. System umożliwia analizę struktury geometrycznej powierzchni z rozdzielczością pionową dochodzącą do $0,01\text{nm}$. Rozdzielczość pozioma osiągana przez urządzenie jest rzędu $0,33\mu\text{m}$. Profilometr posiada możliwość sklejanie (stichingu) mierzonej powierzchni. Dane z pomiarów zapisywane są w macierzy 1024×1024 punktów pomiarowych. Profilometr umożliwia pomiar próbek o współczynniku odbicia światła w zakresie $0,5\% \div 100\%$. Do analizy wyników pomiarów wykorzystywane jest oprogramowanie TalyMap Platinum [12, 15, 19].



Rys. 3. Talysurf CCI – Lite Non-contact 3D Profiler

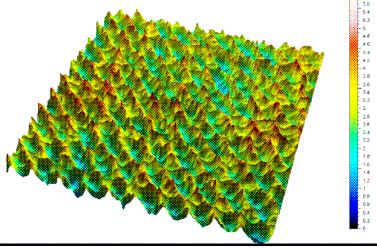
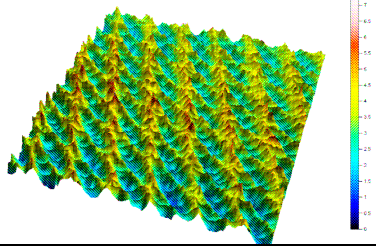
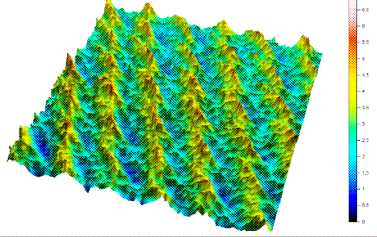
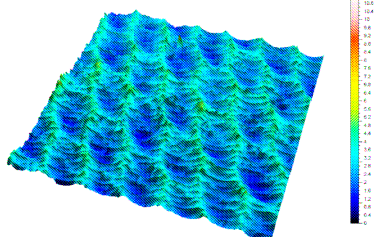
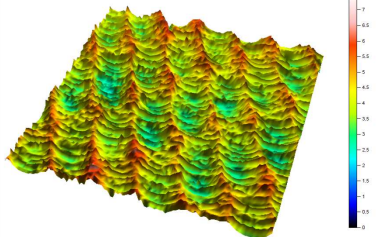
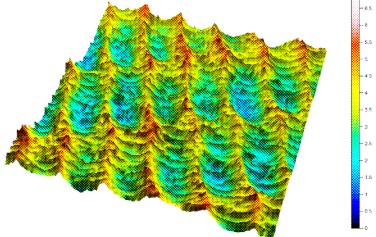
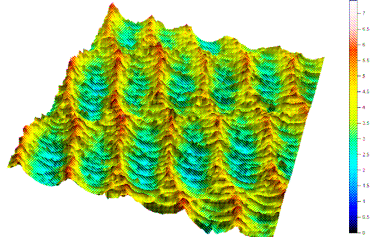
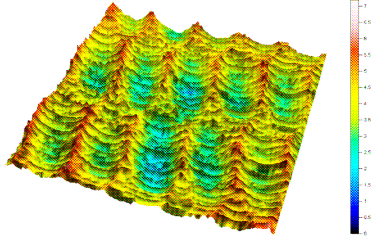
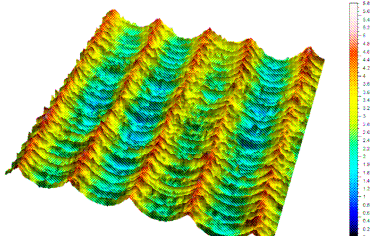
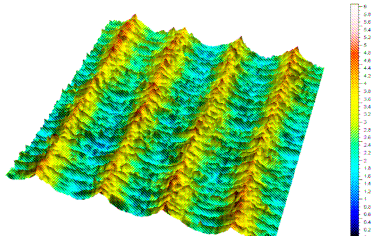
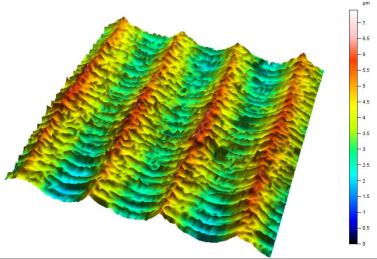
Wyniki pomiarów opracowano w programie Excel, które zostały przedstawione w formie atlasu struktur geometrycznych powierzchni uzyskanych w wyniku frezowania walcowego. Wyniki analiz zawierają tabele i wykresy opisujące: parametry skrawania, obrazy izometryczne powierzchni, parametry 2D i 3D chropowatości powierzchni [2, 6, 8].

Zestawienie obrazów izometrycznych zmierzonych powierzchni próbek wykonanych ze stali C45, obrabianych ze zmiennym posuwem na ostrze przy zachowaniu stałej prędkości skrawania $v_c = 150\text{ m/min}$ i stałej głębokości skrawania $a_p = 0,5\text{ mm}$ zostało przedstawione w tabeli 2. Stopniowe zwiększanie parametru posuwu na ostrze powodowało zmianę profilu chropowatości powierzchni z krótkofalowego na długofalowy. Dla posuwów $f_z = 0,02 \div 0,04\text{ mm/ostre}$ zaobserwowano na obrazie izometrycznym powierzchni pojawianie się nieregularności w strukturze geometrycznej powierzchni. Wraz ze wzrostem posuwu na ostrze zarejestrowany profil struktury geometrycznej powierzchni zmieniał się z krótkofalowego na długofalowy.

W tabeli 3 zostały zamieszczone wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni frezowanych frezem trzpieniowym ze zmiennym posuwem wraz z odchyleniem standardowym tych pomiarów. Wybrane wyniki pomiarów zostały również zaprezentowane w postaci wykresów przedstawiających wpływ posuwu na ostrze f_z na wybrane parametry chropowatości powierzchni tj. R_a , S_a , R_{sm} , R_{dq} .

Rozpatrując wpływ posuwu na ostrze f_z (rys. 4) na parametry chropowatości powierzchni stwierdzono, rozbieżności pomiędzy parametrami 2D i 3D. Analizując wpływ posuwu na ostrze na wartość parametru R_a chropowatości powierzchni zaobserwowano trzy korzystne wartości posuwu $0,005$, $0,025$, $0,04\text{ mm/ostre}$ dla których pomierzony parametr R_a chropowatości powierzchni miał najniższe wartości. Najmniejsza wartość chropowatości opisaną parametrami R_a i S_a zmierzono dla posuwu $0,005\text{ mm/ostre}$, natomiast największą wartość parametru R_a została zmierzona dla posuwu $0,02\text{ mm/ostre}$. Dla parametru S_a największą wartość zmierzono dla posuwu $0,055\text{ mm/ostre}$. Na podstawie przeprowadzonych badań chcąc zoptymalizować proces fre-

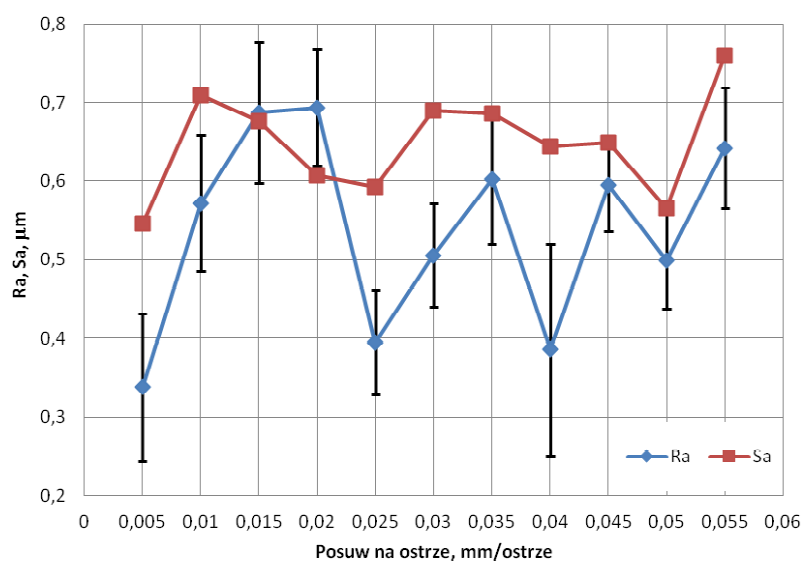
Tab. 2. Zestawienie obrazów izometrycznych powierzchni próbek wykonanych ze stali C45 obróbnionych ze zmiennym posuwem na ostrze

	
1. $f_z=0,005$ mm/strze, $f_n=0,04$ mm/obr, $f_t=120$ mm/min	2. $f_z=0,01$ mm/strze, $f_n=0,08$ mm/obr, $f_t=239$ mm/min
	
3. $f_z=0,015$ mm/strze, $f_n=0,12$ mm/obr, $f_t=358$ mm/min	4. $f_z=0,02$ mm/strze, $f_n=0,16$ mm/obr, $f_t=478$ mm/min
	
5. $f_z=0,025$ mm/strze, $f_n=0,2$ mm/obr, $f_t=597$ mm/min	6. $f_z=0,03$ mm/strze, $f_n=0,24$ mm/obr, $f_t=717$ mm/min
	
7. $f_z=0,035$ mm/strze, $f_n=0,28$ mm/obr, $f_t=836$ mm/min	8. $f_z=0,04$ mm/strze, $f_n=0,32$ mm/obr, $f_t=955$ mm/min
	
9. $f_z=0,045$ mm/strze, $f_n=0,36$ mm/obr, $f_t=1075$ mm/min	10. $f_z=0,05$ mm/strze, $f_n=0,4$ mm/obr, $f_t=1194$ mm/min
	<p>Material: C45 Parametry skrawania: $v_c=150$ m/min, $n=2986$ obr/min, $a_p=0,5$ mm</p>
11. $f_z=0,055$ mm/strze, $f_n=0,44$ mm/obr, $f_t=1313$ mm/min	

Tab. 3. Zestawienie wybranych cech parametrów chropowatości powierzchni

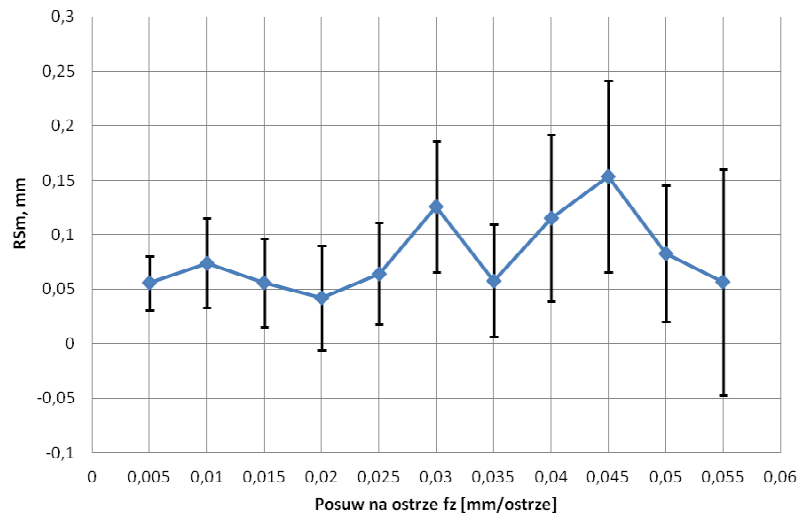
Parametr	Unit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rp	μm	1,061	2,010	1,802	2,119	1,724	1,654	2,327	1,216	1,960	1,511	2,259
Rp [Std dev]	μm	0,342	0,387	0,348	0,446	0,276	0,279	0,337	0,457	0,262	0,296	0,293
Rv	μm	1,059	1,432	1,460	1,314	0,956	1,293	1,700	0,778	0,997	0,921	1,718
Rv [Std dev]	μm	0,273	0,315	0,263	0,290	0,503	0,298	0,326	0,419	0,281	0,332	0,389
Rz	μm	2,120	3,442	3,263	3,433	2,681	2,947	4,028	1,994	2,957	2,432	3,977
Rz [Std dev]	μm	0,498	0,583	0,470	0,568	0,617	0,437	0,489	0,739	0,412	0,479	0,523
Rc	μm	0,973	1,431	1,436	1,541	0,858	1,557	1,596	1,081	1,995	1,247	1,054
Rc [Std dev]	μm	0,330	0,452	0,445	0,428	0,406	0,489	0,378	0,675	0,527	0,384	0,610
Rt	μm	2,12	3,442	3,273	3,433	2,681	2,947	4,028	1,994	2,957	2,518	3,977
Rt [Std dev]	μm	0,488	0,590	0,474	0,565	0,619	0,434	0,489	0,722	0,409	0,469	0,492
Ra	μm	0,337	0,572	0,686	0,693	0,395	0,505	0,601	0,385	0,595	0,499	0,641
Ra [Std dev]	μm	0,093	0,086	0,089	0,074	0,066	0,066	0,081	0,134	0,058	0,061	0,076
Rq	μm	0,404	0,710	0,789	0,839	0,504	0,619	0,743	0,449	0,701	0,599	0,780
Rq [Std dev]	μm	0,106	0,098	0,096	0,086	0,081	0,072	0,088	0,161	0,060	0,069	0,085
RSm	mm	0,055	0,074	0,055	0,0419	0,064	0,126	0,057	0,115	0,153	0,082	0,056
RSm [Std dev]	mm	0,024	0,040	0,040	0,0481	0,046	0,060	0,051	0,076	0,087	0,062	0,103
Rdq	°	4,33	6,053	6,603	6,264	4,980	4,815	8,759	3,258	3,809	4,730	6,957
Rdq [Std dev]	°	1,164	1,334	1,178	1,157	1,210	1,285	1,373	1,650	1,631	1,107	1,402
Sq	μm	0,667	0,868	0,832	0,746	0,730	0,844	0,837	0,794	0,786	0,688	0,913
Sp	μm	2,898	4,024	4,236	8,642	3,315	3,512	3,702	3,276	2,944	3,349	3,589
Sv	μm	2,931	3,290	2,887	2,848	4,149	3,383	3,714	3,908	2,866	2,717	3,819
Sz	μm	5,829	7,314	7,123	11,491	7,464	6,896	7,417	7,185	5,810	6,067	7,409
Sa	μm	0,545	0,708	0,675	0,607	0,592	0,689	0,686	0,644	0,648	0,565	0,759

zowania walcowego frezem firmy Horex optymalnym posuwem na ostrze przy zachowaniu najkorzystniejszych relacji parametrów Ra i Sa chropowatości powierzchni jest wartość 0,025 mm/ostrze.



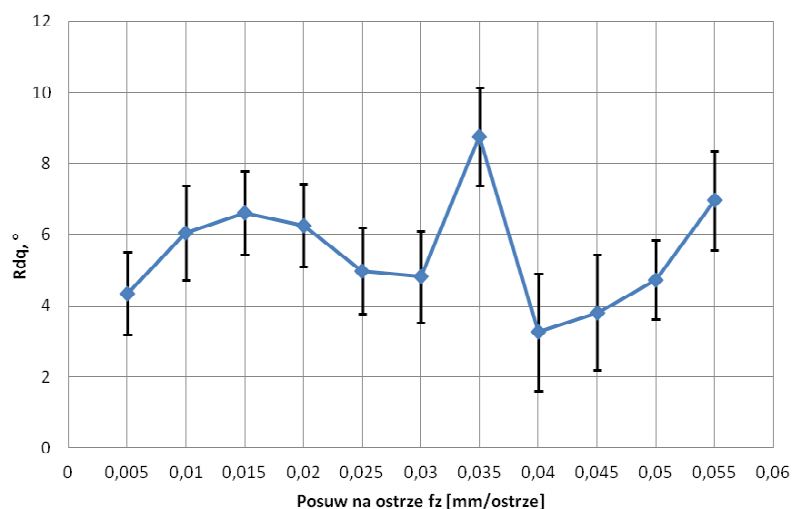
Rys. 4. Wykres wpływu posuwu na ostrze f_z na parametr chropowatości Sa i Ra z naniesionymi słupkami błędów uwzględniającymi zmianę parametru Ra na powierzchni.

Analizując wykres przedstawiony na rysunku 5 można jednoznacznie stwierdzić, że wzrost posuwu na ostrze powodował naprzemienne zmniejszanie i stopniowe zwiększanie się parametru RSm. Najmniejsze wartości parametru RSm zmierzono dla posuwów na ostrze równych 0,02; 0,035 i 0,055 mm/ostrze dla których parametr RSm oscylował koło wartości 0,05 mm. Kierując się optymalizacją procesu skrawania biorąc pod uwagę parametr RSm najkorzystniej jest zastosować posuw na ostrze równy 0,055 mm/ostrze, lecz dla tej wartości posuwu na ostrze uzyskujemy jedne z największych wartości parametrów Ra i Sa chropowatości powierzchni. Optymalną wartością posuwu na ostrze przy zachowaniu najniższych wartości parametrów Sa, Ra, RSm chropowatości powierzchni jest 0,025mm/ostrze.



Rys. 5. Przebieg zmiany parametru szerokości średniej elementów profilu chropowatości Rsm w odniesieniu do posuwu na ostrze f_z

Analizując wykres zaprezentowany na rysunku 6 zaobserwowano początkowo wzrost parametru Rdq wraz ze wzrostem posuwu na ostrze f_z . Po przekroczeniu wartości posuwu powyżej 0,015 mm/ostrze nastąpił spadek wartości parametru Rdq. Maksymalna zmierzona wartość parametru Rdq wystąpiła dla posuwu 0,035 mm/ostrze. Najmniejszą wartość parametru Rdq zmierzono dla posuwu 0,04 mm/ostrze, dalszy wzrost wartości posuwu na ostrze powodował stopniowy wzrost wartości parametru Rdq do $6,957^\circ$ przy posuwie 0,055 mm/ostrze.



Rys. 6. Wpływ posuwu na ostrze f_z na parametr nachylenia średniokwadratowego profilu chropowatości Rdq

W rezultacie przeprowadzonych badań przeanalizowano wpływ zmiany posuwu na ostrze na parametry chropowatości powierzchni Sa, Ra, RSm, Rdq, wynikiem przeprowadzonych analiz było określenie optymal-

nego posuwu na ostrze przy którym analizowane parametry chropowatości powierzchni osiągały najmniejsze wartości. Po przeanalizowaniu przebiegu zmian wszystkich analizowanych parametrów chropowatości skrawania w funkcji rosnącego posuwu na ostrze stwierdzono, że optymalną wartością posuwu na ostrze podczas frezowania walcowego stali frezem trzpieniowym $\varnothing 16$ mm firmy Horex jest 0,025 mm/ostrze.

4. WNIOSKI

Po przeprowadzeniu i analizie badań frezowania walcowego frezem trzpieniowym nasuwają się następujące wnioski i uwagi:

1. Początkowy wzrost posuwu na ostrze powodował znaczny wzrost parametru Ra i Sa chropowatości powierzchni. Jednak wraz z dalszym zwiększaniem posuwu zaobserwowano naprzemienne wzrosty i spadki wartości parametrów chropowatości. Stosowanie niskich parametrów posuwu jest powodem znacznego obniżenia wydajności obróbki, ale daje jednocześnie najlepsze właściwości użytkowych powierzchni. Na podstawie przeprowadzonych badań chcąc zoptymalizować proces frezowania walcowego frezem firmy Horex optymalnym posuwem na ostrze przy zachowaniu najkorzystniejszych relacji parametrów Ra i Sa chropowatości powierzchni jest wartość 0,025 mm/ostrze.
2. Dla posuwów $f_z = 0,02 \div 0,04$ mm/ostrze zaobserwowano na obrazie izometrycznym powierzchni pojawianie nieregularności w strukturze geometrycznej powierzchni. Wraz ze wzrostem posuwu na ostrze zarejestrowany profil struktury geometrycznej powierzchni zmieniał się z krótkofalowego na długofalowy.
3. Optymalną wartością posuwu na ostrze podczas frezowania walcowego stali frezem trzpieniowym $\varnothing 16$ mm firmy Horex zapewniającą najkorzystniejszą relację wartości parametrów chropowatości powierzchni Sa, Ra, RSm, Rdq jest 0,025 mm/ostrze.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczak S.: *Pomiary Geometryczne Powierzchni. Zarysy Kształtu, Falistość i Chropowatość*. Warszawa. WNT 2009.
- [2] Adamczak S., Janusiewicz A., Makieła W., Stepień K.: *Statistical validation of the method for measuring radius variations of components on the machine tool*; Metrology and Measurement Systems; 2011, Vol. XVIII, No 1, pp. 35-46.
- [3] Dae K. B., Tae J. K., Hee S. K., *A dynamical surface roughness model for milling*. Precision Engineering, vol. 20. No. 3, New York 1997, s. 123 – 132.
- [4] Dmochowski J.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. PWN. Warszawa 1983.
- [5] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych* WNT Warszawa 2010.
- [6] Michalik P., Zajac J., Hatala M., Mital D., Fecova V.: *Monitoring surface roughness of thin – walled components from steel C45 machining down and up milling*. Measurement 2014, pp. 416-428.
- [7] Miko E.: *Konstituowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrobionych narzędziami zdefiniowanej stereometrii ostrzy*, Monografie, Studia, Rozprawy Kielce 2004 No. 46.
- [8] Oczos K., Liubimov V.: *Struktura geometryczna powierzchni podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych*. Rzeszów 2003.
- [9] Ozimina D.: *Eksploracja systemów tribologicznych*. Monografia M48. Kielce 2013.
- [10] Ozimina D., Madej M., Kałdoński T.: *The wear resistance of HVOF sprayed composite coatings*; Tribology Letters; 2011, No 41, pp. 103-111.
- [11] Polański Z.: *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. PWN. Warszawa 1977
- [12] Wieczorowski M.: *Metrologia nierówności powierzchni metody i systemy*. Szczecin 2013.
- [13] PN-EN ISO 25178-6:2011P *Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) - Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna - Część 6: Klasyfikacja metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni*.
- [14] PN-EN ISO 4287:1999P *Specyfikacje geometrii wyrobów - Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa - Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni*.
- [15] Customer information pack Taly Surf CCI Lite.
- [16] Instrukcja obsługi DMU-50.
- [17] <http://www.hoffmann-group.com>
- [18] <http://pl.dmgmorseiki.com/sites/en/home>
- [19] <http://www.taylor-hobson.pl>