

Tadeusz MARCINIAK¹
Wojciech STACHURSKI¹

STAN GEOMETRYCZNY POWIERZCHNI BOCZNYCH ZĘBÓW KÓŁ ZĘBATYCH PO FREZOWANIU DIAGONALNYM

Przedstawiono znaną, ale sporadycznie wykorzystywaną metodę diagonalnego nacinania kół zębatych. Dotychczasowe opracowania na ten temat są bardzo nikłe i niedoskonałe. Przedstawione w literaturze zależności, według których należy prowadzić tę obróbkę, w praktyce nie dają pozytywnych rezultatów. Dopiero przeprowadzona szczegółowa analiza łańcucha kinematycznego konkretnej obrabiarki dała zadowalający wynik. Potwierdziły to prace wstępne prowadzone w warunkach warsztatowych. Badania właściwe obejmują badania wpływu parametrów skrawania na stan powierzchni koła po obróbce tą metodą. Według teorii należy spodziewać się znacznego polepszenia tego stanu ze względu na krzyżowe ślady obróbki. Uzyskane rezultaty częściowo potwierdzają te przypuszczenia. Pierwsze badania prowadzono na kołach w stanie nieutwardzonym. Przewiduje się, że lepsze rezultaty będą uzyskiwane na kołach utwardzonych. Pełne badania mogą spopularyzować tą zarzuconą metodę i dać wymierne korzyści w postaci znacznego polepszenia stanu powierzchni bez kosztownego szlifowania.

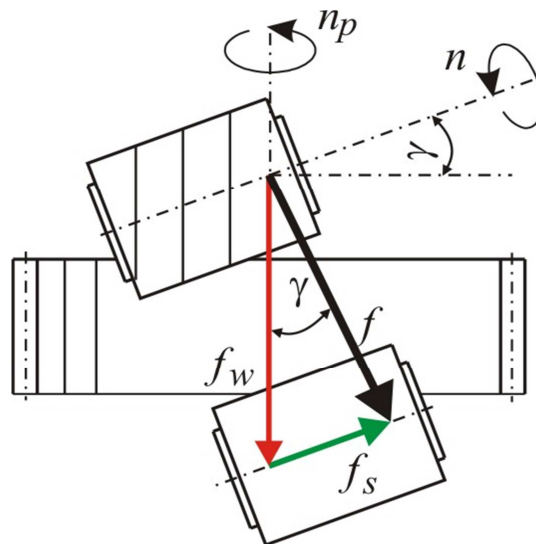
1. METODA FREZOWANIA DIAGONALNEGO – STAN AKTUALNY

Od dłuższego czasu obserwuje się stały wzrost wymagań jakościowych stawianych kołom zębatym. Jest to związane głównie z zapewnieniem ich cichobieżności, a także z zapewnieniem wysokiej niezawodności i trwałości pracy przekładni. Z tego powodu istnieje konieczność zwiększenia dokładności wytwarzanych kół zębatych oraz polepszenia jakości warstwy wierzchniej ewolwentowej powierzchni zęba. Z drugiej strony, obok aspektów związanych z jakością, powszechnie dąży się do zwiększenia wydajności produkcji. W tym zakresie istotnie zwiększono trwałość frezów ślimakowych, stosując m.in. nowe materiały narzędziowe oraz pokrycia przeciwzużyciowe. Jednak w klasycznej metodzie frezowania obwiedniowego z posuwem wzdłużnym, największemu zużyciu podlega zazwyczaj jeden ząb frezu. Pozostałe ostrza są zużyte znacznie mniej, a niektóre nie wykazują zużycia zupełnie. Pomimo to, frez po osiągnięciu kryterialnej wartości zużycia musi być ostrzony jednakowo na wszystkich ostrzach.

Jednym ze sposobów na poprawę jakości powierzchni bocznych zębów oraz wydłużenie trwałości frezu jest zastosowanie metody frezowania diagonalnego [1,4,5].

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

W metodzie tej frez wykonuje jednocześnie posuw f_w wzdłuż osi obrabianego koła (jak w metodzie konwencjonalnej), oraz posuw f_s wzdłuż własnej osi (stycznie do obwodu koła obrabianego). Posuw f jest posuwem wypadkowym. Schemat frezowania diagonalnego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Frezowanie diagonalne; n – prędkość obrotowa frezu [obr/min], n_p – prędkość obrotowa przedmiotu obrabianego [obr/min], γ – kąt wzniosu linii śrubowej zwoju frezu [°]

Fig. 1. Diagonal hobbing; n – rotational speed of hob [rpm], n_p – rotational speed of workpiece [rpm], γ – lead angle [°]

Podczas frezowania diagonalnego krawędzie skrawające zębów narzędzia zmieniają swoje położenie, a przez to zużywają się bardziej równomiernie, przy czym największe zużycie jest wówczas znacznie mniejsze. Ponadto umożliwiają uzyskanie dokładniejszych zarysów. Według danych literaturowych [1] frezowanie diagonalne daje w stosunku do frezowania konwencjonalnego (z posuwem wzdłużnym) następujące korzyści:

- zwiększa trwałość frezu około 10 krotnie,
- zmniejsza chropowatość obrabianej powierzchni zęba,
- zwiększa dokładność zarysu zęba.

Należy zauważyć, że w dostępnych pozycjach literaturowych [1-3] brak jest wyczerpujących informacji dotyczących zastosowania frezowania diagonalnego w praktyce. Prowadzący badania zauważyli także niechęć do stosowania tego frezowania w przemyśle. Wynika to zapewne z braku wytycznych normatywnych do prowadzenia tej obróbki, głównie zaś wartości posuwu stycznego frezu. Nieprawidłowo dobrany posuw, według [4], prowadzi do niewłaściwie obrobionego fragmentu koła, a także do uszkodzenia ewolwentowej powierzchni zęba.

Z uwagi na powyższe właściwe jest podjęcie tematu i rozpoczęcie badań nad zastosowaniem frezowania diagonalnego w produkcji kół zębatych.

Celem badań opisanych w poniższym artykule było:

- wyznaczenie zależności do ustawień posuwu i mechanizmu różnicowego (należy zaznaczyć, że zastosowanie zależności przedstawionych w literaturze nie dawało

- pozytywnych rezultatów),
- określenie wpływu obróbki diagonalnej na stan geometryczny powierzchni bocznych zębów kół.

Założone cele osiągnięto poprzez:

- wykonanie szczegółowej analizy łańcucha kinematycznego konkretnej obrabiarki, na której chciano wykonać próby,
- przeprowadzenie badań wstępnych do sprawdzenia poprawności wyliczonych ustawień,
- przeprowadzenie prób frezowania diagonalnego, a następnie pomiar chropowatości,
- przeprowadzenie analogicznych prób porównawczych dla frezowania konwencjonalnego.

2. KINEMATYKA FREZOWANIA DIAGONALNEGO KÓŁ ZĘBATYCH O ZĘBACH PROSTYCH NA FREZARCE OBWIEDNIOWEJ Z DYFERENCJAŁEM

W kilku pracach [1-3] przedstawiono zależności, według których należy prowadzić proces frezowania diagonalnego na frezarce obwiedniowej z dyferencjałem. Próby przeprowadzone przez autorów na podstawie tych zależności nie dały jednak zadowalających rezultatów. Frezując w założeniu zęby proste w efekcie uzyskano zęby pochylone o kąt $\beta = 2 \div 4^\circ$ (weryfikacji wzorów i frezowania kół o zębach śrubowych w tym opracowaniu nie prowadzono).

Analizując schematy kinematyczne frezarek stwierdzono, że w celu uzyskania poprawnych efektów frezowania należy przede wszystkim wyznaczyć zależność na przełożenie gitary mechanizmu różnicowego biorącej udział w nacinaniu diagonalnym. Wprowadzenie do układu kształtowania uzębienia stycznego posuwu frezu, wymaga bowiem zastosowania dodatkowego ruchu obrotowego koła obrabianego rekompensującego ten posuw.

Na rys. 2 przedstawiono schemat kinematyczny kształtowania linii zęba na frezarce obwiedniowej dyferencjałowej SRF1 firmy Staehely, będącej w dyspozycji autorów badań. W oparciu o ten schemat dokonano analizy łańcuchów kinematycznych, a następnie określono zależność na przełożenie gitary mechanizmu różnicowego.

Analiza schematu kinematycznego wskazuje, że kąt obrotu śruby pociągowej φ_{Sp2} posuwu stycznego (Sp_2) powoduje dodatkowy obrót przedmiotu obrabianego (PO) o kąt φ_{PO} . Możemy zatem zapisać następujące zależności przemieszczeń dla dodatkowego łańcucha kinematycznego:

- dla przedmiotu obrabianego (PO):

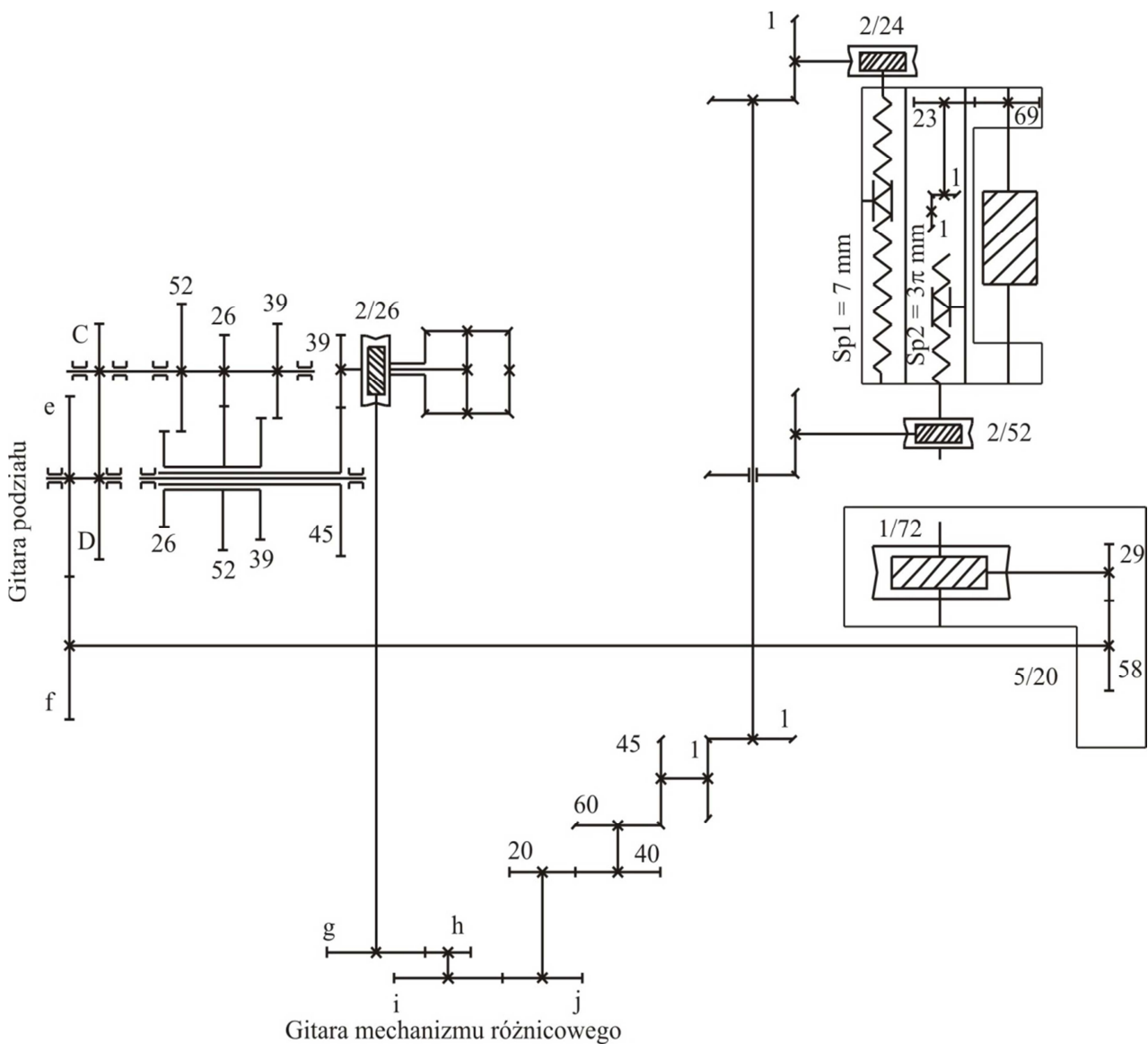
$$\varphi_{PO} = \frac{f_s \cdot \cos \gamma}{\pi \cdot d}, \quad (1)$$

- dla śruby pociągowej posuwu stycznego (Sp_2):

$$\varphi_{Sp2} = \frac{f_s}{h_{p2}} \quad (2)$$

gdzie: γ – kąt wzniosu linii śrubowej zwoju frezu [°],
 d – średnica podziałowa koła zębatego [mm],
 h_{p2} – skok śruby posuwu stycznego [mm].

Warto zaznaczyć, że kąt skręcenia prowadnic przesuwu stycznego dla przypadku kształtowania kół zębatych o zębach prostych równa się kątowi γ wzniosu linii śrubowej zwoju frezu. Do wzoru (1) wprowadzono składową posuwu stycznego f_s prostopadłą do osi przedmiotu obrabianego wynoszącą $f_s \cos \gamma$.



Rys. 2. Schemat kinematyczny frezarki Staehely (łańcuch frezowania diagonalnego)
 Fig. 2. Kinematic scheme of Staehely hobbing machine (kinematic chain of diagonal hobbing)

Całkowite przełożenie rozpatrywanego łańcucha kinematycznego wynosi:

$$I_d = \frac{\varphi_{PO}}{\varphi_{Sp2}} = \frac{f_s \cdot \cos\gamma \cdot h_{p2}}{\pi \cdot d \cdot f_s} = \frac{h_{p2} \cdot \cos\gamma}{\pi \cdot m \cdot z}, \quad (3)$$

a wzór dla doboru kół zmianowych przekładni gitarowej mechanizmu różnicowego ma postać:

$$i_d = \frac{h_{p2} \cdot \cos\gamma}{\pi \cdot m \cdot z \cdot i_{st}}. \quad (4)$$

Wyznaczając stałą występującą we wzorze 4 na podstawie rys. 2 mamy:

$$i_{st} = \frac{52}{2} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{45}{60} \cdot \frac{40}{20} \cdot \frac{2}{26} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{39}{78} \cdot \frac{52}{26} \cdot \frac{24}{1} \cdot \frac{k}{z} \cdot \frac{58}{29} \cdot \frac{1}{72} = \frac{k}{z}. \quad (5)$$

Ponieważ skok śruby suportu stycznego w tej frezarce wynosi $Sp_2 = 3\pi$ ostatecznie zależność ta wyrazi się wzorem:

$$i_d = \frac{3 \cdot \pi \cdot z \cdot \cos\gamma}{\pi \cdot m \cdot z \cdot k} = \frac{3 \cdot \cos\gamma}{m \cdot k}. \quad (6)$$

Posuw wzdłużny f_w z posuwem stycznym f_s połączony jest za pomocą sterowanego sprzęgła w sposób trwały niepodlegający zmianie. Zależność ta dla omawianej frezarki, jak wynika z rys. 2, wynosi:

$$\frac{f_s}{f_w} = \frac{2 \cdot 7}{\frac{24}{3\pi \cdot 2}} = \frac{0,362}{0,583} = 0,621. \quad (7)$$

Na podstawie uzyskanych wzorów dobrano koła zmianowe gitary mechanizmu różnicowego, a następnie wykonano próbę frezowania diagonalnego [6]. Dla pomiaru kąta pochylenia linii śrubowej zęba otrzymano wartość $\beta = 0^\circ$, co potwierdziło poprawność wprowadzonych zależności.

3. PRÓBY FREZOWANIA DIAGONALNEGO

W ramach badań frezowano przeciwbieżnie koła zębate dwiema metodami:

- 1) diagonalnie (D) – z posuwem wzdłużnym f_w i posuwem osiowym f_s ,
- 2) konwencjonalnie (K) – z posuwem wzdłużnym f_w .

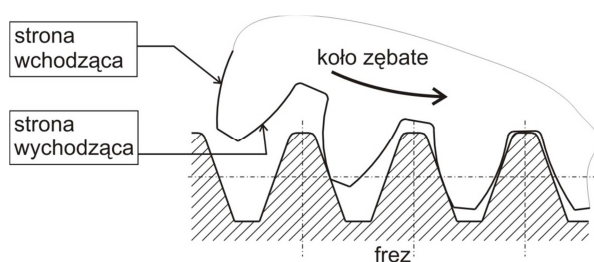
Próby frezowania przeprowadzono na frezarce obwiedniowej dyferencjałowej SRF1 firmy Staehely. W trakcie badań frezowano koła zębate walcowe o zębach prostych ze stali

stopowej 42CrMo4 o twardości 240 HB. Otoczki kół zębatach posiadały średnicę $d = 72\text{mm}$ i szerokość $b = 15\text{mm}$. Użyto frezów ślimakowych NMFc-2/20°/B wykonanych ze stali szybko tnącej HS6-5-2 bez pokryć przeciwzużyciowych. Są to frezy prawozwojne o module $m = 2\text{mm}$, liczbie ostrzy $s = 9$ i długości części roboczej $l = 32\text{mm}$. W trakcie badań zastosowano parametry skrawania przedstawione w tabeli 1. Jako ciecz obróbkową zastosowano olej maszynowy Ferokol EP dostarczany w strefę obróbki z wydatkiem 5 l/min.

Tabela 1. Parametry skrawania
Table 1. Cutting parameters

Metoda frezowania	Prędkość skrawania v_c [m/min]	Posuw wzdłużny f_w [mm/obr]	Posuw osiowy f_s [mm/obr]	Głębokość skrawania a_p [mm]
diagonalna (D)	1) $v_{c1} = 13,45$ 2) $v_{c2} = 25,72$	1) $f_{w1} = 0,369$ 2) $f_{w2} = 0,167$	1) $f_{s1} = 0,229$ 2) $f_{s2} = 0,104$	4,4
konwencjonalna (K)			brak	

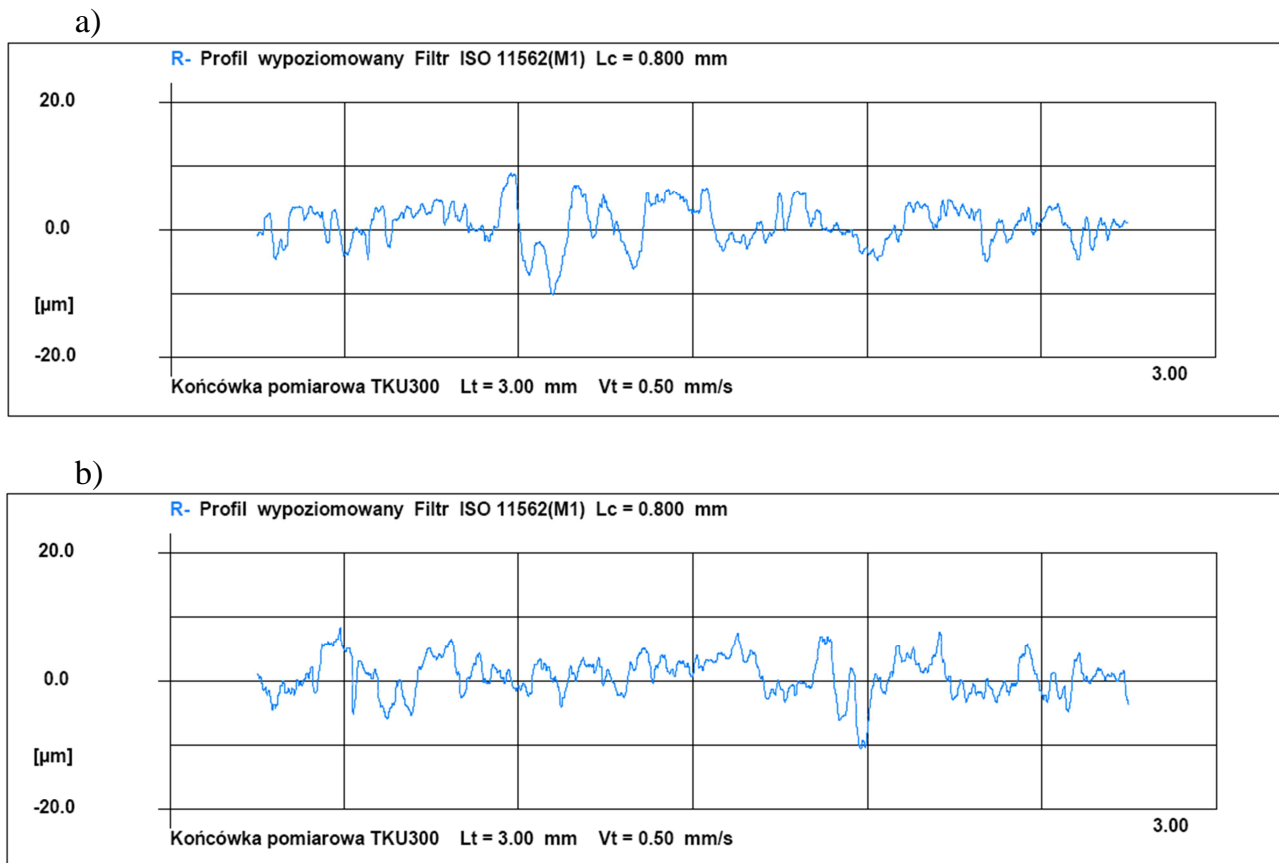
Do pomiaru chropowatości na bocznych powierzchniach zębów kół zębatach zastosowano profilografometr T8000 firmy Hommelwerke. Przyrząd umożliwia pomiar nierówności powierzchni 2D i 3D. Do porównywania użyto wartość chropowatości wyrażoną parametrem R_z . Dla każdego koła zębatego wybrano do pomiaru pięć najgorzej prezentujących się zębów, a następnie wykonano po trzy pomiary na wysokości każdego zęba po obu jego stronach – wchodzącej i wychodzącej z zazębienia obróbczo-tocznego. Wartość średnia z tych trzech pomiarów była podawana jako wartość chropowatości R_z na mierzonej stronie pojedynczego zęba. Sposób określenia stron zęba pokazuje rys. 3.



Rys. 3. Sposób określenia stron zęba
Fig. 3. Description of tooth flank side

4. WYNIKI POMIARÓW STANU POWIERZCHNI PO FREZOWANIU

Na rys. 4 pokazano przykładowe profile chropowatości powierzchni R_z uzyskane dla wybranych zębów po frezowaniu diagonalnym (rys. 4a) i konwencjonalnym (rys. 4b). Przedstawione wykresy wykonano dla powierzchni zębów po stronie wchodzącej w zazębienie obróbczo-toczone.



Rys. 4. Profil chropowatości powierzchni Rz: a) frezowanie diagonalne, b) frezowanie konwencjonalne;

$$v_{c2} = 25,72 \text{ m/min}, f_{w2} = 0,167 \text{ mm/obr}, f_{s2} = 0,104 \text{ mm/obr}; a_p = 4,4 \text{ mm}$$

Fig. 4. Surface roughness profile Rz: a) diagonal hobbing, b) conventional hobbing

$$v_{c2} = 25,72 \text{ m/min}, f_{w2} = 0,167 \text{ mm/rev}, f_{s2} = 0,104 \text{ mm/rev}; a_p = 4,4 \text{ mm}$$

Wyniki pomiarów chropowatości Rz powierzchni zębów przedstawiono w tabeli 2.

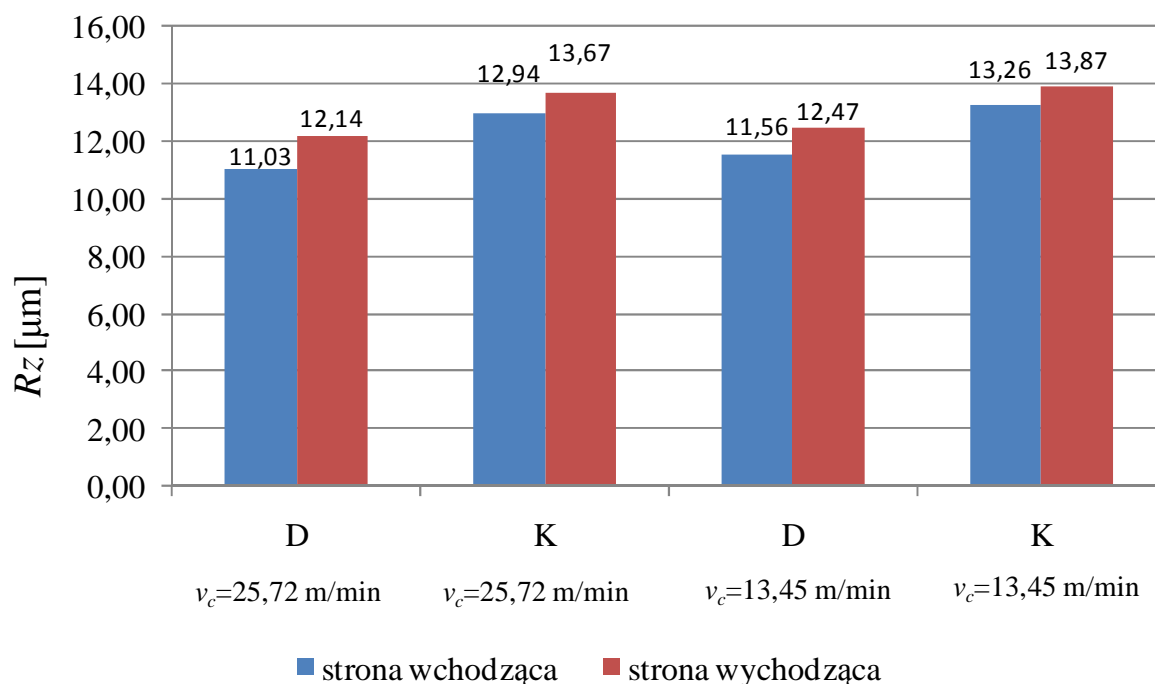
Tabela 2. Parametr chropowatości powierzchni – Rz

Table 2. Surface roughness parameter – Rz

Lp.	Metoda frezowania	Prędkość skrawania v_c	Posuw wzdłużny f_w	Posuw osiowy f_s	Parametr Rz [μm]	
					Strona zęba	
					Wchodząca	Wychodząca
1.	D	25,72	0,167	0,104	11,03	12,14
2.	K	25,72	0,167	-----	12,94	13,67
3.	D	13,45	0,369	0,229	11,56	12,47
4.	K	13,45	0,369	-----	13,26	13,87

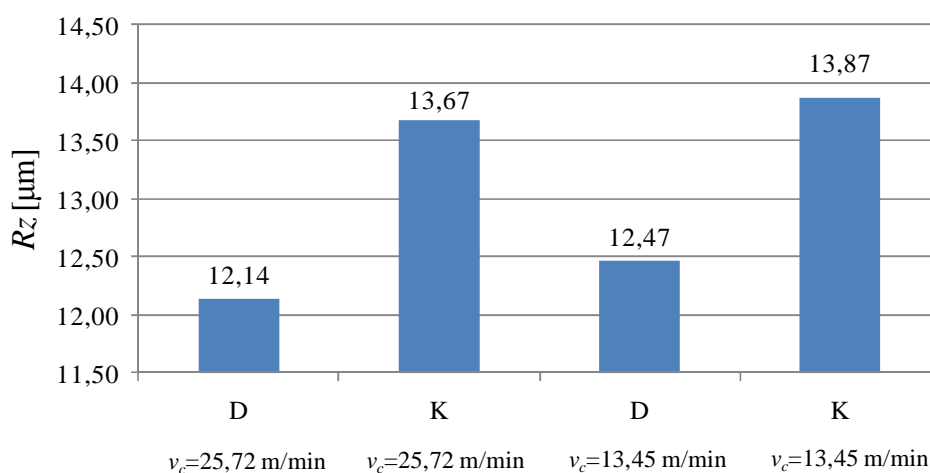
D – frezowanie diagonalne, K – frezowanie konwencjonalne

Na podstawie prezentowanej powyżej tabeli sporządzono wykres uzyskanych wyników chropowatości (rys. 5).



Rys. 5. Porównanie parametru chropowatości R_z dla frezowania diagonalnego i frezowania konwencjonalnego
Fig. 5. Comparison of surface roughness parameters R_z for diagonal and conventional hobbing

Na podstawie rys. 5 można zauważyć, że zarówno dla frezowania diagonalnego (D) jak i konwencjonalnego (K) na zębie po stronie wchodzącej w zazębienie obróbczo-toczone uzyskano mniejsze wartości chropowatości R_z niż dla strony wychodzącej z zazębienia.



Rys. 6. Maksymalne wartości parametru R_z dla każdej próby frezowania
Fig. 6. Maximal values of R_z parameter for each hobbing test

Na uwagę zwraca fakt, że dla obu prób frezowania występują podobne różnice pomiędzy chropowatością na zębach po stronie wchodzącej i wychodzącej z zazębienia. Dla frezowania diagonalnego różnica wynosi około 8 %, podczas gdy dla frezowania konwencjonalnego około 5 %.

Ponieważ o jakości wytworzonego uzębienia decyduje największa zmierzona chropowatość, do porównania wybrano większe jej wartości dla każdej próby frezowania i pokazano na rys. 6.

Jak wynika z wykresu najniższa wartość chropowatości występuje podczas frezowania diagonalnego z prędkością $v_c = 25,72 \text{ m/min}$, posuwem wzdłużnym $f_w = 0,167 \text{ mm/obr}$ i odpowiadającym mu posuwem osiowym $f_{s2} = 0,104 \text{ mm/obr}$. Zmniejszenie prędkości skrawania i zwiększenie posuwu dla drugiej próby frezowania diagonalnego powoduje wzrost wartości chropowatości. Jest to różnica niewielka i wynosi około 3 %.

5. WNIOSKI

Wyniki z pomiarów chropowatości potwierdziły celowość podjęcia tematyki frezowania diagonalnego.

Jakość powierzchni uzyskana dzięki zastosowaniu tej metody jest lepsza niż w przypadku frezowania konwencjonalnego, dla obydwu zaproponowanych zestawów parametrów skrawania. Co prawda, na podstawie rys. 6 widać, że różnica pomiędzy największą ($Rz = 13,87 \mu\text{m}$) i najmniejszą ($Rz = 12,14 \mu\text{m}$) uzyskaną chropowatością jest niewielka (~12 %), jednak zdaniem autorów różnicę tę można zwiększyć poprzez:

- 1) zmianę parametrów skrawania. Dalsze prace powinny koncentrować się na poszukiwaniu najkorzystniejszych prędkości skrawania v_c oraz posuwów f_w i f_s .
- 2) zastosowanie materiału obrabianego o większej twardości.
- 3) wykonanie obróbki wykończeniowej z małym naddatkiem.

Z punktu widzenia praktycznego warto zauważyć, że możliwe jest użycie do frezowania diagonalnego frezów ślimakowych o standardowej długości roboczej. Jednak powoduje to ograniczenie szerokość wieńca obrabianego koła. W przypadku prób opisanych w pracy było to $b = 15 \text{ mm}$. Dla kół o szerszym wieńcu konieczne staje się stosowanie frezów o przedłużonej długości części roboczej. Jest to chyba jedna z przyczyn tak małej popularności tej metody.

LITERATURA

- [1] OCHEŁDUSZKO K., 1976, *Koła zębate – wykonanie i montaż*, Tom II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [2] PADEREWSKI K., 1976, *Zarys kinematyki obrabiarek*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [3] GWIAZDOWSKI W., 1965, *Kinematyka obrabiarek*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [4] PIJANOWSKI M. WIECZOROWSKI K., 2004, *Dobór posuwu ciągłego osiowego przemieszczania frezu ślimakowego w procesie frezowania diagonalnego kół zębatych walcowych o zębach prostych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Mechanika z. 64, 201-209.
- [5] SIECLA R., WIECZOROWSKI K., 2009, *Zużycie frezu w procesie frezowania diagonalnego kół zębatych walcowych o zębach śrubowych*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 29/2, 163-172.

- [6] MARSZAŁEK M., 2011, *Frezowanie diagonalne walcowych kół zębatych o zębach prostych i śrubowych*, Praca magisterska w Instytucie Obrabiarek i TBM, promotor dr hab. inż., prof. PŁ Tadeusz Marciniak, Łódź.

GEOMETRICAL CONDITION OF TOOTH FLANK OF THE GEAR AFTER DIAGONAL HOBGING PROCESS

In the paper well-known but rarely used gears generating method called diagonal hobbing is presented. Previous studies of this subject usually were not precise and imperfect. Relationships and formulas which were presented in scientific literature couldn't be directly applied to workshop practice. Unfortunately most of these relationships give wrong results considering accuracy of the gears. There is no other way to obtain satisfying results then by working out detailed analysis concerning kinematic chain of specific machine tool on which the process will be held. In this paper results of previously presented strategy gave satisfactory results. Preliminary investigations and experimental tests which were carried out at workshop environment proved correctness of previously made assumptions. Main investigations consider an influence of selected cutting parameters on surface condition of the gears generated by diagonal hobbing method. In theory by applying diagonal hobbing method we should obtain cross-shaped pattern on the surface of the teeth. Consequently this type of pattern should improve surface roughness of teeth flanks of the gears. Results obtained during tests partially confirmed these predictions. Preliminary tests were carried out on normalizing gears (not hardened). Next step of our investigation will consider hardened gears where we predict better results in case of surface roughness of manufactured gears. Full investigations might popularize diagonal hobbing and might give many people an advantage of manufacturing very accurate gears without necessity of employing expensive grinding processes.