

Wpływ strategii szlifowania kształtowo-podziałowego na dokładność i chropowatość uzębień kół zębatach

The influence of the profile-dividing grinding strategy on the surface accuracy and roughness of a gear teeth

PIOTR ZYKAK
PAWEŁ KOBIELA
ARNOLD BROŻEK
MAREK GABRYŚ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.119>

Przedstawiono wyniki badań wpływu przyjętej strategii szlifowania kształtowo-podziałowego uzębień kół zębatach walcowych na szlifierce Rapid Höfler 900 na klasę dokładności wykonania uzębienia oraz chropowatość powierzchni. Dokonano porównania otrzymanych rezultatów dla przyjętych strategii szlifowania. Strategie uwzględniały zmianę następujących parametrów determinujących uzyskiwane efekty szlifowania: liczbę przejść, liczbę skoków oraz sposób kształtowania profilu ściernicy.

SŁOWA KLUCZOWE: koła zębata, szlifowanie kształtowo-podziałowe, efekty obróbki

In the paper are presented investigation results of an effects of adopted strategy of profile-dividing grinding of a cylindrical gear teeth, performed on the Rapid Höfler 900 grinder, on machining accuracy and surface roughness of the teeth. The strategies have taken into considerations changes in the following parameters determining obtained results of the grinding: number of passes, number of leads, shaping method of the grinding wheel.

KEYWORDS: a tooth gears, profile dividing grinding, results of the grinding operation

Szlifowanie kształtowe polega na obróbce powierzchni roboczych zębów koła przy pomocy ściernicy odpowiednio dopasowanej kształtem do kształtu zarysu zębów. Niezwykle istotne jest więc dokładne wykonanie takiej ściernicy oraz kontrolowanie poziomu jej zużycia, gdyż decyduje to o ostatecznej geometrii koła zębatego. W przypadku tego typu obróbki wykończeniowej konieczne jest intensywne chłodzenie. Główną zaletą tej metody jest liniowy styk zarysu ściernicy z zarysem kształtowanego uzębienia, co pozwala osiągnąć wysoką wydajność obróbki. Szlifowanie ma bezpośredni wpływ na właściwości eksploatacyjne koła zębatego [11].

Biorąc pod uwagę fakt, że obróbka wykończeniowa szlifowaniem jest długotrwała, a przez to kosztowna, należy dążyć do uzyskania określonej klasy dokładności kół zębatach już podczas obróbki skrawaniem [3]. Szlifowanie kształtowo-podziałowe jest najdokładniejszą metodą obróbki wykończeniowej kół zębatach, zwłaszcza przy niesymetrycznym szlifowaniu, ze względu na korzystniejsze warunki pracy narzędzia [1–3, 9].

Wyróżnia się trzy metody szlifowania kształtowego [3]:

- z ustawieniem symetrycznym ściernicy – zaletą tej metody jest to, że szlifowane są jednocześnie dwa boki sąsiednich zębów; za wadę można uznać niekorzystne warunki pracy ściernicy, wynikające ze zmiennej głębokości szlifowania wzdłuż zarysu ściernicy podczas posuwu promieniowego;
- z ustawieniem niesymetrycznym z jedną ściernicą – zaletą tej metody są korzystniejsze warunki pracy ściernicy, przy czym obrabiany jest tylko jeden bok zęba;
- z ustawieniem niesymetrycznym z dwoma ściernicami – zaletą tej metody są korzystne warunki pracy ściernicy, a wadą – konieczność stosowania dwóch ściernic.

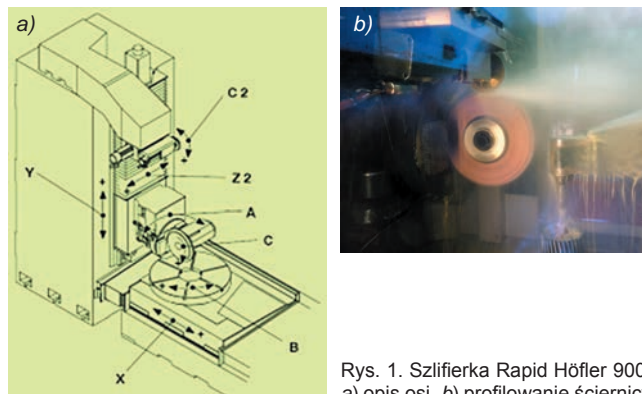
Przyjmuje się, że niewątpliwymi zaletami metod kształtowych są: możliwość nadania zarysowi zębów dowolnego kształtu oraz możliwość szlifowania zębów w kołach o uzębieniu wewnętrznym [7, 9].

Stanowisko badawcze – szlifierka Rapid Höfler 900

Szlifierka Rapid Höfler 900 do profilowego szlifowania kół zębatach jest zainstalowana w firmie BEFARED, zajmującej się produkcją reduktorów i motoreduktorów ogólnego zastosowania. Na rys. 1 pokazano osie obrabiarki oraz realizację procesu obciążania ściernicy obciążaczem diamentowym krążkowym.

W szlifierce Rapid Höfler 900 osie są przypisane do głównych podzespołów (realizujących określone funkcje), takich jak [7, 8]:

- głowica szlifująca (oś A) – wychylenie tarczy szlifierskiej do kąta nachylenia,
- stół elementów obrabianych (oś B) – podziałka,
- wrzeciono szlifierskie (oś C) – ruch obrotowy wrzeciona szlifierskiego podczas szlifowania,



Rys. 1. Szlifierka Rapid Höfler 900: a) opis osi, b) profilowanie ściernicy

* Dr inż. Piotr Zyzak (pzyzak@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej; mgr inż. Paweł Kobiela (pawel.kobiela@befared.pl), inż. Arnold Brożek (arnoldbrozek@gmail.com), mgr inż. Marek Gabryś (marek.gabrys@befared.pl) – Fabryka Reduktorów i Motoreduktorów BEFARED Spółka Akcyjna

- wrzeciono obciążające (oś C2) – ruch obrotowy rolki obciążającej podczas obciążania,
- sanie elementów obrabianych (oś X) – ustawianie średnicy,
- sanie narzędziowe (oś Y) – ruch skokowy,
- sanie obciążania (oś Z2) – wytworzenie profilu narzędzia.

Przebieg szlifowania kształtowo-podziałowego dla wytypowanych kół zębatach

Głównymi parametrami operacji szlifowania kół zębatach są:

- liczba skoków – jest to liczba przejazdów ściernicy w pojedynczym wrębie;
- liczba przejść – jedno przejście odpowiada wyszlifowaniu wszystkich zębów w jednej serii, np. po sześć skoków na wręb;
- prędkość obrotowa ściernicy, obr/min;
- moc napędu tarczy szlifierskiej, W;
- głębokość szlifowania/skrawania (zależna od ilości nadatku), mm;
- kryteria obciążania ściernicy: rodzaj ruchu rolki obciążającej względem ściernicy (współbieżny lub przeciwbieżny); prędkość obrotowa ściernicy, obr/min; prędkość obrotowa rolki obciążającej, obr/min; liczba procesów obciążania; promieniowe dostawienie obciążania, mm; stosunek prędkości obciążania; liczba procesów obciążania po przeprofilowaniu.

Podczas badań własnych zmieniano następujące parametry szlifowania kształtowo-podziałowego w programie obróbki kół zębatach: liczbę przejść, liczbę skoków, kształtowanie profilu ściernicy. Na podstawie analizy szlifowania kół zębatach w warunkach przemysłowych stwierdzono, że należy wykonywać więcej przejść niż skoków, ponieważ większa liczba skoków może prowadzić do osłabienia podstawy zęba.

W szlifowaniu kształtowo-podziałowym zdecydowany wpływ na jakość obrobionej powierzchni ma narzędzie, czyli ściernica, w tym materiał, z jakiego ją wykonano, oraz sposób, w jaki została obciążona (sposób przygotowania czynnej powierzchni ściernicy).

Operacji szlifowania na szlifierce Rapid 900 firmy Höfler poddano dwa koła zębata wykonane ze stali C55 (o zawartości następujących pierwiastków: 0,52±0,6% C, 0,6±0,9% Mn, maks. 0,4% Si, maks. 0,045% P, maks. 0,045% S, maks. 0,4% Cr, maks. 0,4% Ni, maks. 0,1% Mo) po hartowaniu indukcyjnym. Charakterystyka kół była następująca:

- moduł $m = 5$ mm,
- liczba zębów $z = 31$,
- średnica podziałowa $d_p = 157,339$ mm,
- kąt przyporu $\alpha = 20^\circ$,
- kąt pochylenia linii zęba $\beta = 9^\circ 53' 30''$,
- współczynnik korekcji $x = 0$.

Dla kół zębatach po szlifowaniu wykonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej pomiary następujących odchylek: F_α , f_α , $f_{H\alpha}$, F_β , f_β , $f_{H\beta}$, F_p , F_r [4–6].

Uzębienie frezowano metodą obwiedniową na frezarce SAMPUTENSILI S800 z układem sterowania SINUMERIK. Po frezowaniu obwiedniowym oraz gratowaniu zębów kół zębatach poddano je obróbce cieplnej (hartowaniu indukcyjnym metodą zęb po zębie do uzyskania twardości 54÷58 HRC).

Hartowanie indukcyjne poszczególnych zębów odbywało się metodą posuwową, gdzie w trakcie operacji dokonuje się podziału o jeden ząb. Stosowano generator HF 35 kW oraz podajnik IV-630 przy częstotliwości 300÷400 kHz i natężeniu prądu 670 A, posuwie maszynowym 2

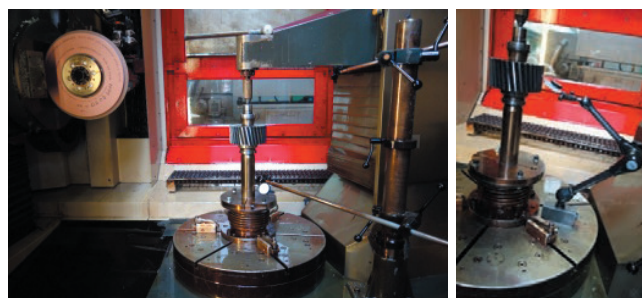
Rys. 2. Operacja hartowania indukcyjnego kół zębatach w warunkach przemysłowych



i grubości warstwy zahartowanej ok. 1 mm. Po hartowaniu indukcyjnym koła poddano operacji odpuszczania. Na rys. 2 przedstawiono realizację operacji hartowania indukcyjnego.

Bazując na średnicy wierzchołków zębów (zewnętrznej uzębienia), szlifowano otwór $\varnothing 90H7 \times 80$ i powierzchnię do niego prostopadłą (czołową), a następnie koło zębata ustalono na wyszlifowanym otworze oraz powierzchni czołowej za pomocą tulei rozprężnej i szlifowano uzębienie.

Na pierwszym etapie szlifowania kształtowo-podziałowego wytypowanych kół zębatach ustalono współosiowość koła zębatego z osią stołu oraz sprawdzono bicie promieniowe za pomocą czujnika Mitutoyo RRY 483 (rys. 3). Uzyskano wartość bicia promieniowego odpowiednio 2 μm (0,002 mm). Ustalono wysokość zamocowania oraz przygotowano program szlifowania. Następnie wyznaczono wskaźnik W_k (długość przez k zębów), co było podstawą do opracowania zadania obróbkowego. Zamocowanie i ustawienie koła zębatego względem osi obrabiarki kończy etap przygotowania szlifowania.



Rys. 3. Ustalanie współosiowości koła zębatego z osią stołu

Do szlifowania wykorzystano ściernicę firmy 3M, wykonaną z elektrokorundu, o oznaczeniu: 22VDT1ESP400 $\times 45 \times 127V50U1255NA80F15VPH902W$. Jako chłodziwa użyto oleju Rotel Specjal 277-4 o wydatku 150 l/min.

Przyjęta strategia szlifowania w przypadku obu kół zębatach (szlifowanie dwupowierzchniowe) była taka sama – z tą różnicą, że drugie koło od razu było szlifowane wykończeniowo (bez szlifowania zgrubnego) zgrubnie obciążoną ostrą ściernicą, która miała inny stopień nałożenia podczas obciążania. Powierzchnia ściernicy do szlifowania koła oznaczonego numerem 2 była zdecydowanie bardziej chropowata – wprowadzono więc pojęcie ostrej ściernicy. W celu określenia wpływu wybranych parametrów szlifowania kształtowo-podziałowego na dokładność i chropowatość szlifowanych uzębienia przyjęto różną liczbę przejść i skoków ściernicy (tabl. I–IV).

TABLICA I. Zestawienie rodzajów przeprowadzonej obróbki oraz liczby przejść i skoków

Koło zębate	1								2			
	zgrubna				wykończeniowa				wykończeniowa			
Obróbka	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Liczba przejść	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Liczba skoków	6	6	6	2	6	4	4	2	6	6	6	4

TABLICA II. Parametry obróbki zgrubnej – koło zębate 1

Przejścia	Skoki	Dostawienie, mm	Dostawienie promieniowe, mm	Posuw, mm/min	Q_w , mm ³ /(mm·s)
1., 2.	1+6	0,020	0,052	6000	5,1544
3.	1+4	0,015	0,039	5000	3,2215
	5+6	0,010	0,026	5000	2,1477
4.	1	0,010	0,026	2200	0,9450
	2	0,010	0,026	1800	0,7732

TABLICA III. Parametry obróbki wykończeniowej – koło zębate 1

Przejścia	Skoki	Dostawienie, mm	Dostawienie promieniowe, mm	Posuw, mm/min	Q_w , mm ³ /(mm·s)
1.	1+6	0,020	0,051	6000	5,1371
2.	1+4	0,020	0,051	6000	5,1371
3.	1+2	0,015	0,039	5000	3,2107
	3+4	0,010	0,026	5000	2,1404
4.	1	0,010	0,026	2200	0,9418
	2	0,010	0,026	1800	0,7706

TABLICA IV. Parametry obróbki – koło zębate 2

Przejścia	Skoki	Dostawienie, mm	Dostawienie promieniowe, mm	Posuw, mm/min	Q_w , mm ³ /(mm·s)
1., 2., 3.	1+6	0,020	0,051	6000	5,1371
4.	1+4	0,020	0,051	6000	5,1371



Rys. 4. Kalibracja opuszczalnego zewnętrznego ramienia pomiarowego na szlifierce Rapid Höfler 900

Realizacja operacji szlifowania wytypowanych kół zębatych wymagała przyjęcia w programie obróbki: promieniowego dostawienia obciążania, wskaźnika pokrycia k_d [10], parametru obciążania ściernicy η (η jest stosunkiem prędkości obwodowej rolki obciążającej do prędkości obwodowej tarczy szlifierskiej).

W obróbce zgrubnej i wykończeniowej koła 1 przyjęto:

- przejście 1. – promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 2$, $\eta = 0,8$;
- przejście 2. – promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 2$, $\eta = 0,8$;
- przejście 3. – promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 3$, $\eta = 0,6$;
- przejście 4. – promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 6$, $\eta = -0,6$.

W przypadku obróbki koła 2 w przejściach 1.–4. przyjęto: promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 2$, $\eta = 0,8$.

Dodatkowo w planie obróbki założono, że ściernica ma być obciążona zgrubnie przy przeciwnym ruchu obrotowym rolki i ściernicy.

Po zakończeniu szlifowania pierwszego koła przeprowadzono kalibrację w celu przygotowania i przeprowadzenia pomiarów po szlifowaniu (rys. 4). Dzięki kalibracji uzyskuje się dokładną pozycję czujnika pomiarowego.

Efekty badań i dyskusja wyników

Na podstawie opracowanych strategii przeprowadzono szlifowanie kół zębatych. Po operacjach frezowania, hartowania indukcyjnego oraz szlifowania wykonano pomiary dokładności uzębienia na maszynie współrzędnościowej ZEISS PRISMO NAVIGATOR firmy Carl Zeiss oraz za pomocą skaningowej głowicy pomiarowej Vast Gold; wykorzystano oprogramowanie ZEISS GEAR PRO Involute 2014. Do oceny dokładności uzębienia przyjęto (według PN-ISO 1328-1):

- całkowitą odchyłkę zarysu F_α ,
- odchyłkę położenia zarysu $f_{H\alpha}$,
- odchyłkę kształtu zarysu $f_{f\alpha}$,
- całkowitą odchyłkę linii zęba F_β ,
- odchyłkę położenia linii zęba $f_{H\beta}$,
- odchyłkę kształtu linii zęba $f_{f\beta}$,
- odchyłkę sumaryczną podziałek koła F_p ,
- odchyłkę podziałki f_p ,
- bicie promieniowe F_r .

Na rys. 5 przedstawiono wartości zmierzonych odchyłek, charakteryzujących koła zębate szlifowane metodą kształtowo-podziałową. Przykładowe prezentacje graficzne profilu dla szlifowanych kół zębatych przedstawiono na rys. 6.

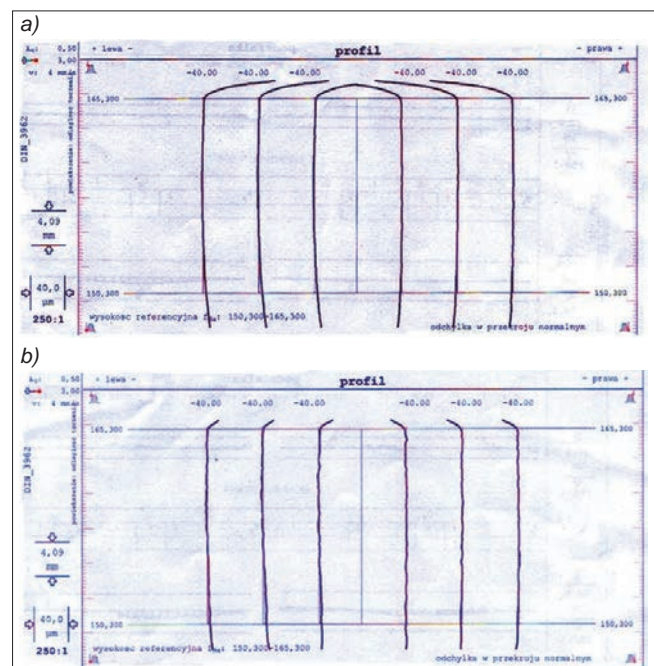
a)

Odchyłka	Q_z	(...)	Lewa strona					Prawa strona					Q_z	(...)
			21	11	1	Q_z	O	O	Q_z	1	11	21		
F_α , μm	7	18	5	6	5	4	5	2	2	2	3	2	7	18
$f_{H\alpha}$, μm	7	14	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	7	14
$f_{f\alpha}$, μm	7	± 10	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	7	± 10
F_β , μm	7	18	2	6	9	5	6	5	4	6	5	5	7	18
$f_{H\beta}$, μm	7	12	4	2	3	2	3	5	4	4	5	5	7	12
$f_{f\beta}$, μm	7	± 14	1	6	9	6	6	1	5	6	0	-1	7	± 14

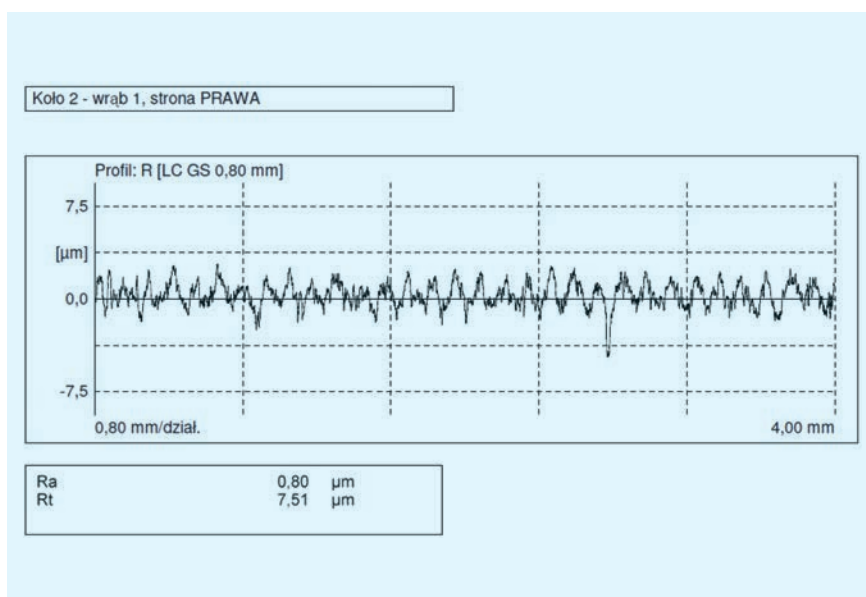
b)

Odchyłka	Q_z	(...)	Lewa strona					Prawa strona					Q_z	(...)
			21	11	1	Q_z	O	O	Q_z	1	11	21		
F_α , μm	7	18	5	6	5	4	5	3	2	3	3	3	7	18
$f_{H\alpha}$, μm	7	14	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	7	14
$f_{f\alpha}$, μm	7	± 10	3	4	2	5	3	-1	1	-1	1	-1	7	± 10
F_β , μm	7	18	4	1	8	5	4	7	6	4	11	4	7	18
$f_{H\beta}$, μm	7	12	3	1	3	1	2	5	3	5	5	4	7	12
$f_{f\beta}$, μm	7	± 14	2	0	8	6	3	-1	5	1	-6	1	7	± 14

Rys. 5. Zmierzone odchyłki: a) koła zębatego 1, b) koła zębatego 2



Rys. 6. Prezentacja graficzna profilu szlifowanych kół zębatych: a) koła 1, b) koła 2



Rys. 7. Wykres profilu chropowości powierzchni R_a (koło 2, wrąb 1.)

Według dokumentacji konstrukcyjnej wymagana chropowość uzębienia nie mogła przekroczyć wartości $R_a = 0,63 \mu\text{m}$. Dokonano pomiaru średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowości od linii średniej dla koła zębatego 1 oraz koła zębatego 2 przy ustawieniu długości odcinka elementarnego $l_r = 0,8$ dla pięciu odcinków [12, 13]. Do pomiarów wykorzystano Profilometr MAHR PERTHOMETER CONCEPT z głowicą pomiarową MAHR MFW-250 6851801 i oprogramowaniem PERTHOMETER CONCEPT V.6.50. Zarówno w przypadku oceny dokładności wykonania uzębienia, jak i oceny chropowości powierzchni przyjęto dla obu kół zębatych pomiary lewej i prawej strony 1., 11. i 21. wrębu. Wybrany profil chropowości powierzchni prawej strony 1. wrębu koła zębatego szlifowanego ostrą ściernicą przedstawiono na rys. 7.

Średnia wartość zmierzonego parametru R_a wynosiła odpowiednio:

- koło zębate 1: **wrąb 1.** – strona lewa $R_a = 0,35 \mu\text{m}$, strona prawa $R_a = 0,34 \mu\text{m}$; **wrąb 11.** – strona lewa $R_a = 0,34 \mu\text{m}$, strona prawa $R_a = 0,37 \mu\text{m}$; **wrąb 21.** – strona lewa $R_a = 0,37 \mu\text{m}$, strona prawa $R_a = 0,40 \mu\text{m}$;
- koło zębate 2: **wrąb 1.** – strona lewa $R_a = 0,6 \mu\text{m}$, strona prawa $R_a = 0,8 \mu\text{m}$; **wrąb 11.** – strona lewa $R_a = 0,52 \mu\text{m}$, strona prawa $R_a = 0,69 \mu\text{m}$; **wrąb 21.** – strona lewa $R_a = 0,59 \mu\text{m}$, strona prawa $R_a = 0,7 \mu\text{m}$.

Obie strategie szlifowania kół zębatych pozwoliły na uzyskanie 6 klasy dokładności wykonania uzębienia. Wartości odchyłek charakteryzujących szlifowane uzębienie, uzyskane w ramach przyjętych strategii szlifowania, odpowiadały wymaganej klasie dokładności wykonania.

Strategia szlifowania uwzględniająca szlifowanie zgrubne i wykończeniowe (koło 1) umożliwiła uzyskanie gładkiej powierzchni zębów bez wyraźnych śladów nierówności.

Podsumowanie

W pracy przyjęto, że szlifowanie uzębienia kół zębatych będzie realizowane według dwóch strategii różniących się przede wszystkim wartością współczynnika k_d . Naddatki na szlifowanie powinny być usuwane z zachowaniem ich odpowiedniego podziału – tak, aby zostały spełnione wymagania stawiane geometrii oraz chropowości zazębienia, zgodnie z normą PN ISO 1328. Założono uzyskanie 7 klasy dokładności wykonania uzębienia, a w efekcie

przeprowadzonych prób uzyskano klasę 6. W przeprowadzonych badaniach uwzględniono również ocenę wskaźnika, jakim jest długość przez zęby W_k . Wskaźnik ten wyznaczony z pomiarów na stanowisku szlifierki Rapid Höfler 900 dla obu przyjętych strategii szlifowania wyniósł odpowiednio $W_{k(1)} = 53,791 \text{ mm}$ oraz $W_{k(2)} = 53,773 \text{ mm}$ (przy zadanej wartości wynoszącej $W_k = 53,790 \text{ mm}$). Uzębienie szlifowane ostrą, zgrubnie obciążoną ściernicą charakteryzowało się gorszą chropowością powierzchni i nie spełniało wymagań odnośnie do średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowości R_a .

Dodatkowo wyznaczono czas realizacji operacji szlifowania uzębienia. Na ten parametr składa się czas: trwania czynności ustawczych, realizacji operacji szlifowania i wykonywania

pomiarów. Dla przyjętej strategii szlifowania czasy te wynoszą odpowiednio: $t_{(1)} = 110 \text{ min}$, $t_{(2)} = 50 \text{ min}$.

Można przyjąć, że opracowanie odpowiedniej strategii szlifowania – uwzględniającej konkretne zadanie, geometrię uzębienia, rodzaj obróbki poprzedzającej szlifowanie oraz sposób ustalenia i zamocowania przedmiotu do obróbki – a także określenie strategii obciążania ściernicy będzie się przekładało na dokładność wykonania szlifowanego uzębienia.

Po analizie stanu wiedzy na temat szlifowania uzębienia można stwierdzić, że szlifowanie kształtowo-podziałowe nadal będzie wiodącą obróbką wykończeniową zębów kół zębatych.

LITERATURA

1. Oczko K.E., Porzycki J. „Szlifowanie. Podstawy i technika”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
2. Ochęduszek K. „Koła zębate. T. II. Wykonanie i montaż”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1992.
3. Oczko K.E., Marciniak M. „Rozwój konstrukcji obrabiarek do realizacji procesów szlifowania. Część 2”. *Mechanik*. 79, 3 (2006): s. 192–198.
4. PN-ISO 1328-1 (1997) Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Definicje i wartości odchyłek jednoimiennych boków zębów.
5. PN-ISO 1328-2 (1997) Definicje i wartości odchyłek pomiarowych złożonych i odchyłek bicia.
6. DIN 3962 (1978) Toleranze für Stirnradverzahnungen. Toleranze für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen.
7. Instrukcja obsługi szlifierki kształtowo-podziałowej Rapid 2000 do obróbki wykańczającej uzębienia firmy Höfler (Niemcy).
8. www.klingelberg.com/en/business-divisions/hoeffler/cylindrical-gear-grinding-machines/detail-page/product/rapid-900/ (dostęp: 10.02.2018 r.).
9. Płonka S., Szadkowski J., Matuszek J., Kobiela P. „Rozwój wybranych metod kształtowania obróbką skrawaniem uzębienia kół zębatych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Transport*. 87, 1929 (2015): s. 11–20.
10. Rosik R., Świerczyński J. „Wpływ metody MQL na parametry kształtowania czynnej powierzchni ściernicy i chropowość warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego”. *Inżynieria Maszyn*. 16, 1–2 (2011): s. 175–185.
11. Gawroński Z. „Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzykowych”. Politechnika Łódzka, 2005.
12. PN-ISO 4288:1997 Długość odcinka elementarnego l_r w zależności od wartości parametrów R_a , R_z , R_{sm} chropowości powierzchni.
13. PN-ISO 3274:1997 Zależności między filtrem chropowości A_c i A_s , promieniem wierzchołka r_{ip} oraz odległością próbkowania. ■