

Stanisław PŁONKA¹Piotr ZYZAK²Paweł KOBIELA³

WPLYW OBCIĄGANIA ŚCIERNICY NA DOKŁADNOŚĆ UZĘBIENIA SZLIFOWANEGO METODĄ KSZTAŁTOWĄ

W pracy przedstawiono badania wpływu liczby obciągnięć ściernicy na dokładność szlifowanego uzębienia metodą kształtowo-podziałową. Operacji szlifowania na szlifierce RAPID 2000 firmy Höfler poddano koła zębate wykonane ze stali C55 po frezowaniu obwiedniowym i hartowaniu indukcyjnym, o następującej charakterystyce: $m = 5$ mm, $z = 68$, $d_p = 345,131$ mm. Obciążanie ściernicy prowadzono po wyszlifowaniu 9, 13, 17 wrębów koła zębatego. Dla kół zębatach po szlifowaniu ściernicą z różną liczbą obciągnięć wykonano pomiary na współrzędnościowej maszynie pomiarowej następujących odchylek: odchyłki całkowitej zarysu F_{α} , odchyłki kształtu zarysu $f_{r\alpha}$, odchyłki położenia zarysu $f_{H\alpha}$, odchyłki całkowitej linii zęba F_{β} , odchyłki kształtu linii zęba $f_{r\beta}$, odchyłki położenia linii zęba $f_{H\beta}$, odchyłki podziałki f_p , odchyłki sumarycznej podziałki koła F_p , odchyłki bicia promieniowego F_r .

Słowa kluczowe: koła zębata, szlifowanie kształtowo-podziałowe, dokładność uzębienia

1. Wprowadzenie

Wysokie wymagania jakościowe stawiane przekładniom zębatym, dotyczące przede wszystkim ich cichobieżności, wymuszają stosowanie obróbki wykończeniowej uzębienia, np. przez szlifowanie, zapewniającej co najmniej 7 klasę dokładności i chropowatość powierzchni $Ra \leq 0,8$ μm . Znane są następujące metody szlifowania uzębienia kół zębatach walcowych: kształtowo-podziałowe, obwiedniowo-podziałowe (najczęściej metodą Maaga i metodą Nilesa) oraz obwiedniowe ciągłe (metodą Reishauera) [7-9]. W drugiej połowie XX w.

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Stanisław Płonka, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, 43-309, tel.: 338279213, e-mail: splonka@ath.bielsko.pl

² Piotr Zyzak, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, e-mail: pzyzak@ath.bielsko.pl

³ Paweł Kobiela, Fabryka Reduktorów i Motoreduktorów BEFARED Spółka Akcyjna, Bielsko-Biała, e-mail: pawel.kobiela@befared.pl

w wytwarzaniu kół zębatach walcowych w produkcji przekładni zębatach ogólnego przeznaczenia były na ogół stosowane dwie metody: obwiedniowo-podziałowa oraz obwiedniowa ciągła. Intensywny rozwój układów sterowania numerycznego pod koniec XX i na początku XXI w. spowodował coraz szersze zastosowanie metody kształtowo-podziałowej szlifowania uzębienia kół zębatach.

Aby było możliwe szlifowanie boków zębów metodą kształtowo-podziałową, należy nadać określony profil czynnej powierzchni ściernicy. W artykule przedstawiono czynności związane z przygotowaniem szlifierki do obróbki i z obciążaniem ściernicy do szlifowania uzębienia walcowych metodą kształtowo-podziałową na szlifierce RAPID 2000 firmy Höfler oraz wybrane wyniki badań własnych dotyczących wpływu obciążania ściernicy na dokładność szlifowanego uzębienia [4-6, 12].

2. Metodyka i zakres badań

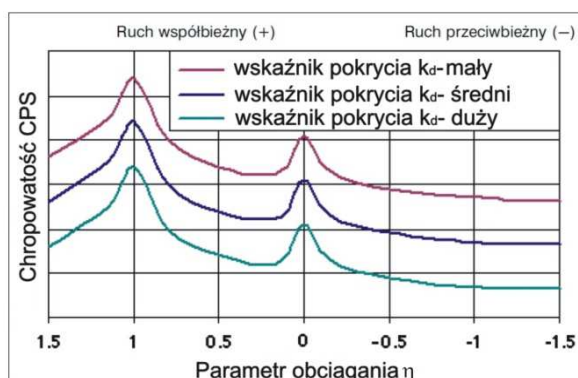
Badania wpływu liczby obciążeń ściernicy na dokładność operacji szlifowania kół zębatach walcowych o uzębieniu zewnętrznym przeprowadzono na kołach zębatach o następującej charakterystyce: $m = 5$ mm, $z = 68$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 9^\circ 53' 30''$, współczynnik przesunięcia $x = 0$ mm i pochylenie linii zęba prawe. Koła zębata, w liczbie 6 sztuk, wykonano ze stali do ulepszania cieplnego C55 o zawartości następujących pierwiastków stopowych: 0,52-0,60% C; 0,6-0,9% Mn; max 0,4% Si; max 0,045% P; max 0,045% S; max 0,4% Cr; max 0,4% Ni; max 0,1% Mo. Po operacjach: toczenia zgrubnego, ulepszania cieplnego, toczenia kształtującego, wiercenia i gwintowania drugorzędnych otworów, uzębienie kół zębatach nacinano frezem ślimakowym NM5 PA20° ze stali szybko tnącej z pokryciem ALCROM Al2+ (FUTURA NANO), o następującej charakterystyce: $m = 5$, $\alpha = 20^\circ$, $\lambda = 2^\circ 41'$, średnicy frezu $d_a = 119,8$ mm oraz szerokości frezu $B = 140$ mm. Operację frezowania uzębienia wykonano na frezarce obwiedniowej SAMPUTENSILI S800 z układem sterowania SINUMERIK. W czasie frezowania obwiedniowego stosowano następujące parametry skrawania: prędkość obrotową freza $n_f = 186,09$ obr./min ($v_c = 70$ m/min) i posuw freza $f = 2,50$ mm/obr., oraz intensywne chłodzenie i smarowanie olejem obróbkowym MOBILMET 443 zawierającym dodatki uszlachetniające.

Po operacji frezowania oraz gratowania zębów kół zębatach poddano je hartowaniu indukcyjnemu metodą zęb po zębie, do uzyskania twardości 58-60 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 oraz posuwie maszynowym 2. Grubość warstwy zahartowanej ~1 mm. Po hartowaniu indukcyjnym koła poddano operacji odpuszczania. Opierając się na średnicy wierzchołków zębów (zewnętrznej uzębienia), szlifowano otwór na $\phi 100H7$ i powierzchnię prostopadłą do niego (czołową), a następnie

koło zębate ustawiono na wyszlifowanym otworze oraz powierzchni czołowej, za pomocą tulejki rozprężnej, i szlifowano uzębienie.

W dalszej kolejności należy określić dane dotyczące obciążania ściernicy: liczbę przebiegów obciążania $i_d = 1$, wartość promieniowego dosuwu obciążacza do ściernicy $a_d = 0,02$ mm i posuwu obciążacza $f_d = 0,10$ mm/obr. oraz wskaźnik pokrycia k_d , będący stosunkiem czynnej szerokości powierzchni obciążacza b_d do posuwu obciążacza f_d . Wskaźnik pokrycia k_d wpływa znacząco na chropowatość CPS. Im mniejszy jest wskaźnik pokrycia, tym bardziej chropowata jest czynna powierzchnia ściernicy. Najmniejszy wskaźnik pokrycia $k_d = 1$. Ustalenie wskaźnika pokrycia zależy od materiału ściernicy. Dla obróbki zgrubnej $2 \leq k_d \leq 5$, natomiast dla obróbki wykończeniowej $5 \leq k_d \leq 15$ [2]. W operacji obciążania przyjęto parametr η oznaczający stosunek prędkości obwodowej rolki obciążającej do prędkości obwodowej ściernicy. Dla ruchu współbieżnego rolki obciążającej i ściernicy należy przyjąć wartości dodatnie tego parametru, natomiast dla ruchu przeciwbieżnego wartości ujemne (rys. 1). W programie szlifowania przyjęto następujące wartości parametrów nastawnych procesu dotyczących obciążania:

- Przejście 1: promieniowe dostawienie obciążacza $a_d = 0,02$ mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 1,0$, parametr obciążania $\eta = 0,6$ (prędkość obwodowa rolki obciążającej stanowi 0,6 prędkości obwodowej ściernicy),
- Przejście 2: promieniowe dostawienie obciążacza $a_d = 0,02$ mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 1,0$, parametr obciążania $\eta = 0,6$,
- Przejście 3: promieniowe dostawienie obciążacza $a_d = 0,02$ mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 1,5$, parametr obciążania $\eta = -0,3$,
- Przejście 4: promieniowe dostawienie obciążacza $a_d = 0,02$ mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 6,0$, parametr obciążania $\eta = -0,6$.



Rys. 1. Zależność chropowatości CPS od wskaźnika pokrycia k_d oraz parametru obciążania η

Fig. 1. CPS surface roughness in a function of k_d teeth overlaps index and η truing parameter

Na szlifierkach sterowanych numerycznie typu Rapid 2000 firmy Höfler do obciążania konwencjonalnych ściernic płaskich i profilowych wykorzystuje się rolki obciążające z nasypem diamentowym. Sterowanie numeryczne umożliwia sterowanie kątem pochylenia rolki, co w połączeniu z przemieszczeniem ściernicy pozwala na kształtowanie dowolnego profilu ściernicy. Podczas realizacji badań doświadczalnych do obciążania ściernicy wykorzystano rolki obciążające NC 32730/6. W następnym kroku należy dokonać ustawienia (wypośrodkowania) ściernicy, które obejmuje: znalezienie wrębu (zgrubne ustalenie pozycji wrębu), oraz centrowanie wrębu (dokładne ustalenie środka wrębu). Znalezienie wrębu przeprowadzono ręcznie, wprowadzając ściernicę we wręb na głębokość średnicy podziałowej d_p koła zębatego. Centrowanie wrębu zostało zrealizowane automatycznie przez zetknięcie ściernicy z lewym i prawym bokiem wrębu, co pozwoliło na określenie podziału naddatku. Centrowanie wykonano w dwóch płaszczyznach: górnej oraz dolnej, które są symetrycznie rozłożone na szerokości wieńca zębatego dla sześciu wrębów równomiernie rozłożonych na obwodzie koła. Po hartowaniu indukcyjnym oraz odpuszczaniu realizowano operację szlifowania zębów kół zębatych, a następnie dokonano kontroli uzębienia, mycia i konserwowania.

Do szlifowania kół zębatych użyto jednoprotfilowej ściernicy z elektrokorundu T1ESP-400×45×27-V60°-U12-93A80/80F15VPH601W firmy 3M, zaprofilowanej na moduł $m = 5$ mm, profil E (50 Grad). Warunki operacji szlifowania: prędkość obwodowa szlifowania $v_s = 30$ m/s dla ściernicy 400 mm, prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego ściernicy dla: przejść zgrubnych $v_f = 7$ m/min, przejść kształtujących $v_f = 4,5$ m/min, przejść wykończeniowych $v_f = 2,2$ m/min, naddatek całkowity na szlifowanie $C_c = 0,31$ mm, naddatek dla przejść zgrubnych $C_z = 0,24$ mm (głębokość szlifowania dla przejść zgrubnych $a_{p(z)} = 0,02$ mm), naddatek dla przejść kształtujących $C_k = 0,05$ mm (głębokość szlifowania dla przejść kształtujących $a_{p(k)} = 0,015$ mm, $i_p = 2$ przejścia i $a_{p(k)} = 0,01$ mm, $i_p = 2$ przejścia), naddatek na szlifowanie wykończeniowe $C_w = 0,02$ mm (głębokość szlifowania dla przejść wykończeniowych $a_{p(w)} = 0,01$ mm, $i_p = 2$), płyn obróbkowy: olej Rotel Spezial 277-4 o wydatku 220 l/min.

3. Wyniki pomiarów i ich analiza

Po zakończeniu realizacji operacji frezowania uzębienia oznaczono koła numerami od 1 do 3. Wykonano również cechy na każdym oznakowanym kole, oznaczające pierwszy jego wręb. Szlifowanie każdego koła zębatego rozpoczynano od wrębu oznaczonego numerem 1. Przed rozpoczęciem szlifowania wrębu 1 ściernica była obciążana. Układ sterowania numerycznego szlifierki umożliwia wybór dwóch strategii obciążania. Do wyboru są dwie metody: liczba wrębów (ściernica obciążana jest po szlifowaniu podanej liczby wrębów), określona objętość skrawania (obciążanie następuje po osiągnięciu zdefiniowanej wartości objętości warstwy usuniętej). W badaniach własnych zastosowano metodę obciąż-

gania polegającą na ustaleniu liczby wrębów. Tabela 1 zawiera informacje o wariantach obciążania ściernicy do szlifowania kół zębatach (w nawiasach podana liczba oznacza numer wrębu, który jest szlifowany jako ostatni przed obciążaniem ściernicy).

Tabela 1. Warianty obciążania ściernicy do szlifowania badanych kół zębatach
Table 1. Truing variants of the grinding wheel for grinding of the tested gear wheels

Nr koła	Wręb (numer)				
1	[co 9 wręb – obciążanie] dla każdego przejścia. Liczba obciągnięć ściernicy – 7				
	1	10(9)	19(18)	28(27)	37(36)
		46(45)	55(54)	64(63)	
2	[co 13 wręb – obciążanie] dla każdego przejścia. Liczba obciągnięć ściernicy – 5				
	1	14(13)	27(26)	40(39)	53(52)
		66(65)			
3	[co 17 wręb – obciążanie] dla każdego przejścia. Liczba obciągnięć ściernicy – 4				
	1	18(17)	35(34)	52(51)	68(67)

Pomiary dokładności uzębienia badanych kół zębatach przeprowadzono oddzielnie po operacjach frezowania, hartowania indukcyjnego oraz szlifowania na maszynie współrzędnościowej typu ZEISS PRISMO NAVIGATOR firmy CARL ZEISS skaningową głowicą pomiarową Vast Gold, wykorzystując oprogramowanie ZEISS GEAR PRO involute 2014. Maksymalny błąd dopuszczalny współrzędnościowej maszyny pomiarowej $MPE = 2 + 3L$ [μm], gdzie: L – wartość liczbowo mierzonej długości w m. W każdym kole zmierzono lewą i prawą stronę wrębów szlifowanych ściernicą przed obciążaniem i bezpośrednio po obciążaniu dla oznaczonego koła zębatego (tab. 1). W pracy do oceny dokładności wykonania uzębienia przyjęto wg PN-ISO 1328-1:2013(E): całkowitą odchyłkę zarysu F_a , odchyłkę położenia zarysu f_{Ha} , odchyłkę kształtu zarysu f_{fa} , 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 oraz bicie promieniowe F_r [1, 3, 10, 11].

Ze względu na to, że uzębienie koła miało być wykonane w 6 klasie dokładności, a norma ISO 1328-1:2013 (E) zaleca do oceny kół zębatach o średnicy $d \leq 4\ 000$ mm w klasie od 1 do 6 następujące parametry: $F_p, f_p, s, F_a, f_{Ha}, f_{fa}, F_\beta, f_{H\beta}, f_{f\beta}$, ograniczono się do analizy tylko tych wielkości (z wyjątkiem parametru s). Dodatkowo, w ocenie dokładności uzębienia kół zębatach uwzględniono bicie promieniowe F_r . Średnie wartości odchyłek: $F_a, f_{Ha}, f_{fa}, F_\beta, f_{H\beta}, f_{f\beta}, f_p, F_p, F_r$ uzyskanych z pomiarów dla lewej i prawej strony wrębu, przyjętych do oceny

dokładności szlifowanego uzębienia zamieszczono w tab. 2-4. Wartości zmierzonych odchyłek: F_α , $f_{H\alpha}$, $f_{f\alpha}$, F_β , $f_{H\beta}$, $f_{f\beta}$, f_p , F_p , F_r szlifowanego uzębienia dla pierwszego wrębu po obciążeniu ściernicy i po wyszlifowaniu 9, 13 oraz 17 wrębów przedstawiono na rys. 2.

Po operacji frezowania obwiedniowego frezem ślimakowym klasy Bp średnie wartości całkowitej odchyłki zarysu F_α mieściły się, dla lewej strony wrębu, w przedziale 12,9-13,8 μm (co odpowiada 6 klasie dokładności), odchyłki kształtu zarysu $f_{f\alpha}$ w przedziale 12,9-13,2 μm (7 klasa), odchyłki położenia zarysu $f_{H\alpha}$ w przedziale -0,6- -3,6 μm (3 klasa), całkowite odchyłki linii zęba F_β w przedziale 9,9-17,8 μm (6 klasa), odchyłki kształtu linii zęba $f_{f\beta}$ w przedziale 9,4-13,2 μm (7 klasa), odchyłki położenia linii zęba $f_{H\beta}$ w przedziale -1,0- -15,5 μm (7 klasa). Z kolei średnie wartości całkowitej odchyłki zarysu F_α dla prawej strony wrębu są większe: od 32,7 do 90,7% (co odpowiada 8 klasie dokładności), odchyłki kształtu zarysu $f_{f\alpha}$ są większe od 34,8 do 50% (8 klasa), a odchyłki położenia zarysu $f_{H\alpha}$ są mniejsze (wartości tych odchyłek mieszczą się w 1 klasie dokładności). Średnie wartości całkowitej odchyłki linii zęba F_β dla prawej strony wrębu są na ogół większe: od 27,0 do 45,2% (co odpowiada 7 klasie dokładności), odchyłki kształtu linii zęba $f_{f\beta}$ są prawie identyczne z uzyskanymi w przypadku lewej strony wrębu, a odchyłki położenia linii zęba $f_{H\beta}$ są znacząco większe: od 106,5 do 190,6%, od średnich wartości tych odchyłek dla lewej strony wrębu. Maksymalna wartość odchyłki $f_{f\beta}$ po frezowaniu wyniosła 26 μm , co daje 8 klasę dokładności koła zębatego. Wartości odchyłki podziałki f_p po frezowaniu obwiedniowym zawierają się w przedziale 3,0-3,5 μm (3 klasa), odchyłki sumarycznej podziałki F_p w przedziale 6,5-21,0 μm (4 klasa), a bicia promieniowego F_r w przedziale 7,0-24,0 μm (6 klasa). W wyniku operacji hartowania indukcyjnego następuje nieznaczny wzrost wartości odchyłek F_α , $f_{H\alpha}$, $f_{f\alpha}$ oraz znaczący wzrost odchyłek F_β , $f_{H\beta}$, $f_{f\beta}$, f_p , F_p , F_r . Maksymalna wartość odchyłki F_β po hartowaniu indukcyjnym wyniosła 30 μm , co daje 8 klasę dokładności koła zębatego, a odchyłki $f_{f\beta}$ 35 μm , co daje 9 klasę dokładności koła zębatego.

Zastosowanie operacji szlifowania uzębienia metodą kształtowo-podziałową spowodowało bardzo znaczące zmniejszenie wartości prawie wszystkich badanych odchyłek. Przykładowo średnie wartości całkowitej odchyłki zarysu F_α uległy po operacji szlifowania zmniejszeniu od 5,2 do 9,2 razy, a całkowitej odchyłki linii zęba F_β od 5,0 do 11,5 razy. Maksymalna wartość całkowitej odchyłki zarysu F_α po szlifowaniu wyniosła 3,0 μm , odchyłki kształtu zarysu $f_{f\alpha}$ 3,0 μm , odchyłki położenia zarysu $f_{H\alpha}$ 1 μm (co odpowiada 2 klasie dokładności), natomiast całkowita odchyłka linii zęba $F_\beta = 4,0 \mu\text{m}$, odchyłka kształtu linii zęba $f_{f\beta} = 2 \mu\text{m}$, odchyłka położenia linii zęba $f_{H\beta} = 3$ (2 klasa). Maksymalna wartość odchyłki podziałki f_p wyniosła 3,0 μm (3 klasa), odchyłki sumarycznej podziałki koła $F_p = 7,0 \mu\text{m}$ (1 klasa) oraz bicia promieniowego $F_r = 11,0 \mu\text{m}$ (4 klasa).

Tabela 2. Średnie wartości odchyłek dokładności wykonania uzębienia po frezowaniu, hartowaniu indukcyjnym oraz szlifowaniu z określonym wariantem obciążania ściernicy co 9 wręb

Table 2. Average values of deviations of fabrication accuracy of the teeth after milling, induction hardening and grinding with determined truing variant of the grinding wheel at every 9th tooth space

	Wartości średnie odchyłek dla wariantu obciążania co 9 wręb [μm]												Wartości odchyłek z pomiarów dla wariantu obciążania co 9 wręb [μm]		
	lewa strona wrębu szlifowanego po obciążaniu ściernicy						prawa strona wrębu szlifowanego po obciążaniu ściernicy								
	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	f_p	F_p	F_r
Frezowanie	12,9	12,9	-2,3	10,0	9,4	-1,6	20,3	19,8	-0,9	17,6	9,5	15,3	3,0	6,5	7,0
Hartowanie indukcyjne	13,0	13,0	1,4	17,4	12,4	-15,6	23,9	21,0	4,8	19,5	12,1	17,5	4,0	23,5	31,0
Szlifowanie	2,5	1,0	-2,4	2,0	2,0	0,6	1,9	2,0	0,1	1,8	1,5	-0,6	3,0	7,0	7,0
	lewa strona wrębu po szlifowaniu 9 wrębów						prawa strona wrębu po szlifowaniu 9 wrębów								
	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$			
Frezowanie	13,6	13,0	-2,1	9,9	9,6	-1,0	20,4	20,0	-1,4	18,0	9,1	15,3			
Hartowanie indukcyjne	13,7	13,7	1,4	17,3	12,7	-14,9	23,6	21,1	4,7	19,6	11,3	18,3			
Szlifowanie	2,4	1,0	-2,3	1,7	2,0	0,7	2,0	1,9	0,6	1,6	1,1	-0,3			

Tabela 3. Średnie wartości odchyłek dokładności wykonania uzębienia po frezowaniu, hartowaniu indukcyjnym oraz szlifowaniu z określonym wariantem obciążania ściernicy co 13 wręb

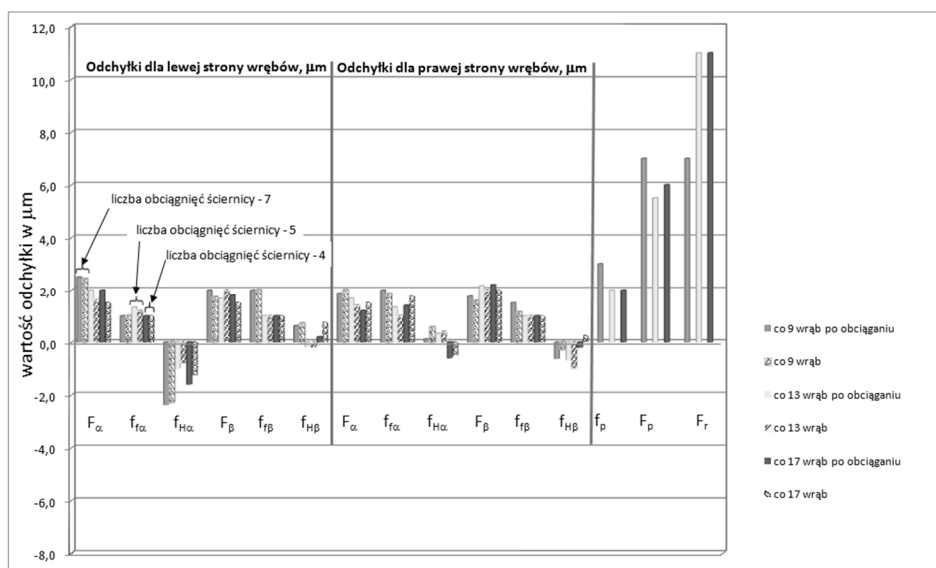
Table 3. Average values of deviations of fabrication accuracy of the teeth after milling, induction hardening and grinding with determined truing variant of the grinding wheel at every 13th tooth space

	Wartości średnie odchyłek dla wariantu obciążania co 13 wręb [μm]												Wartości odchyłek z pomiarów dla wariantu obciążania co 13 wręb [μm]		
	lewa strona wrębu szlifowanego po obciążaniu ściernicy						prawa strona wrębu szlifowanego po obciążaniu ściernicy								
	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	f_p	F_p	F_r
Frezowanie	13,2	12,3	-0,7	12,2	10,0	-6,3	23,0	22,8	-1,3	16,7	10,2	16,8	3,0	21,0	11,0
Hartowanie indukcyjne	13,8	12,8	-4,7	17,0	12,3	-16,2	24,8	23,3	2,7	21,5	13,5	16,8	4,0	23,0	14,0
Szlifowanie	2,0	1,3	-1,0	1,7	1,0	-0,2	1,7	1,3	0,3	2,2	1,0	-0,7	2,0	5,5	11,0
	lewa strona wrębu po szlifowaniu 13 wrębów						prawa strona wrębu po szlifowaniu 13 wrębów								
	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$			
Frezowanie	13,6	13,0	-0,6	12,0	9,6	-6,4	26,0	26,0	0,0	19,0	12,4	16,8			
Hartowanie indukcyjne	14,4	13,4	-4,2	16,8	12,2	-15,8	24,2	22,8	3,0	21,0	13,0	20,0			
Szlifowanie	1,6	1,2	-0,8	2,0	1,0	-0,2	1,4	1,0	0,4	2,0	1,0	-1,0			

Tabela 4. Średnie wartości odchyłek dokładności wykonania uzębienia po frezowaniu, hartowaniu indukcyjnym oraz szlifowaniu z określonym wariantem obciągania ściernicy co 17 wręb

Table 4. Average values of deviations of fabrication accuracy of the teeth after milling, induction hardening and grinding with determined truing variant of the grinding wheel at every 17th tooth space

	Wartości średnie odchyłek dla wariantu obciągania co 17 wręb [μm]												Wartości odchyłek z pomiarów dla wariantu obciągania co 17 wręb [μm]		
	lewa strona wrębu szlifowanego po obciąganiu ściernicy						prawa strona wrębu szlifowanego po obciąganiu ściernicy								
	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	f_p	F_p	F_r
Frezowanie	13,8	13	-3,6	17,8	12,6	-15,4	21,2	21,2	-1,4	18	11,8	17	3,5	21,0	24,0
Hartowanie indukcyjne	14	14,4	0,8	20,2	18,4	-16,8	22,8	22,4	2,4	25,8	12,8	28,8	4,0	23,0	26,0
Szlifowanie	2	1	-1,6	1,8	1	0,2	1,2	1,4	-0,6	2,2	1	-0,2	2,0	6,0	11,0
	lewa strona wrębu po szlifowaniu 17 wrębów						prawa strona wrębu po szlifowaniu 17 wrębów								
	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$	F_α	$f_{f\alpha}$	$f_{H\alpha}$	F_β	$f_{f\beta}$	$f_{H\beta}$			
Frezowanie	13,8	13,3	-2,8	17,8	13,3	-15,5	21,0	21,0	-1,3	16,5	10,3	16,3			
Hartowanie indukcyjne	14,3	13,5	1,0	20,0	17,3	-16,8	22,5	21,3	2,5	26,3	12,3	27,8			
Szlifowanie	1,5	1,0	-1,3	1,5	1,0	0,8	1,5	1,8	-0,5	2,0	1,0	0,3			



Rys. 2. Średnie wartości odchyłek dokładności wykonania uzębienia po szlifowaniu z określoną liczbą obciągnięć ściernicy

Fig. 2. Average values of deviations of fabrication accuracy of the teeth after grinding with the specified number of truing the grinding wheel

Przykładowo, odchylenie standardowe wyników pomiarów całkowitej odchyłki zarysu F_α dla kół zębatych szlifowanych ściernicą obciążaną co 9 wręb dla lewej strony zęba wynosi $s_{(l)} = 0,53 \mu\text{m}$, a dla prawej $s_{(p)} = 0,35 \mu\text{m}$. Z kolei dla kół zębatych szlifowanych ściernicą obciążaną co 13 wręb odchylenie standardowe dla lewej strony zęba wynosi $s_{(l)} = 0,54 \mu\text{m}$, a dla prawej $s_{(p)} = 0,81 \mu\text{m}$. W przypadku kół zębatych szlifowanych ściernicą obciążaną co 17 wręb odchylenie standardowe zarówno dla lewej, jak i prawej strony wynosi $s_{(l)} = s_{(p)} = 0,57 \mu\text{m}$.

Nie stwierdzono w badanym zakresie wpływu liczby obciążeń ściernicy na obwodzie koła na dokładność uzębienia kół zębatych. Należy to tłumaczyć dużą trwałością ściernicy oraz obciążaniem ściernicy po przeszlifowaniu stosunkowo niewielkiej liczby wrębów (rys. 2).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania częstości obciążania ściernicy nie wykazały jej wpływu na dokładność szlifowania uzębień metodą kształtowo-podziałową. Należy to tłumaczyć przede wszystkim zbyt częstym obciążaniem ściernicy po przeszlifowaniu stosunkowo niewielkiej liczby wrębów. Po operacji frezowania frezem ślimakowym klasy Bp dokładność uzębienia kół zębatych mieściła się w klasie 8, natomiast po operacji hartowania indukcyjnego nastąpiło pogorszenie dokładności uzębienia o 1 klasę (9 klasa dokładności). Zastosowanie operacji szlifowania metodą kształtowo-podziałową po frezowaniu i następnie hartowaniu indukcyjnym spowodowało zmniejszenie badanych odchyłek od kilku do kilkunastu razy i umożliwiło wykonanie uzębienia kół zębatych w 4 klasie dokładności.

Literatura

- [1] DIN 3962 (1978): Toleranze für Stirnradverzahnungen. Toleranze für abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen.
- [2] Instrukcja obsługi szlifierki kształtowo-podziałowej Rapid 2000 do obróbki wykończeniowej uzębień firmy Höfler (Niemcy).
- [3] ISO 1328-1: 2013 (E): Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth.
- [4] Koziarski A.: Czynna powierzchnia ściernicy. Metody badań makro- i mikrogeometrii, Monografie, Politechnika Łódzka 1996.
- [5] Krzempek A., Płonka S., Tubielewicz K.: Metody obciążania ściernicy ślimakowej oraz ich wpływ na dokładność szlifowanego uzębienia. Monografia 99. Budowa i Eksploatacja Maszyn, Wydawn. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [6] Mazurowicz R., Raczyk R.: Przyrządy do profilowania ściernic ślimakowych do szlifowania kół zębatych metodą Reishauer, Mechanik, 71 (1998) 599-600.
- [7] Ochęduszek K.: Koła zębate. T. II. Wykonanie i montaż, WNT, Warszawa 1992.

- [8] Oczóś K., Marciniak J.: Rozwój konstrukcji obrabiarek do realizacji procesów szlifowania. Cz. II, *Mechanik*, 79 (2006) 192-198.
- [9] Oczóś K., Porzycki J.: *Szlifowanie. Podstawy i technika*, WNT, Warszawa 1986.
- [10] PN-ISO 1328-1 (1997): Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Definicje i wartości odchyłek jednoimiennych boków zębów.
- [11] PN-ISO 1328-2 (1997): Definicje i wartości odchyłek pomiarowych złożonych i odchyłek bicia.
- [12] Rybak J.: *Badania dokładności kształtowania ściernic ślimakowych oraz niektóre aspekty jej wpływu na dokładność szlifowania uzębień*, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1971.

EFFECT OF TRUING OF GRINDING WHEEL ON ACCURACY OF GEAR TEETH GRINDED WITH THE USE OF PROFILE METHOD

Summary

In this paper the results of investigations concerning the effects of number of truing operations of a grinding wheel on accuracy of gear wheel grinded with the use of profile dividing method are presented. The grinding operation was performed on the gear wheels made of hobbed and induction hardened C55 steel on grinding machine of RAPID 2000 made by Höfler Company. The gear wheels parameters were as follows: $m = 5$ mm, $z = 68$, $d_p = 345,131$ mm. Truing of the grinding wheel was performed after grinding of 9, 13, 17 tooth spaces of the gear wheel. The measurements of deviations of gear wheels were conducted on coordinate measuring machine. Following deviations are measured: total profile deviation F_α , profile form deviation $f_{f\alpha}$, profile slope deviation $f_{H\alpha}$, total helix deviation F_β , helix form deviation $f_{f\beta}$, helix slope deviation $f_{H\beta}$, single pitch deviation f_p , total cumulative pitch deviation F_p , radial runout deviation F_r .

Keywords: gear wheels, profile dividing grinding, accuracy of toothing

DOI: 10.7862/rm.2017.50

Przesłano do redakcji: 22.08.2017

Przyjęto do druku: 18.10.2017