

Strategia szlifowania kształtowo-podziałowego kół zębatach na szlifierkach Höfler

Strategy of profile dividing gear grinding on Höfler grinding machines

PIOTR ZYZAK
PAWEŁ KOBIELA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.132>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono strategię podejścia do realizacji operacji szlifowania uzębienia kół zębatach metodą kształtowo-podziałową na szlifierkach firmy Höfler. Efekty tej operacji będą zależały od przyjętej strategii i warunków obróbki oraz rodzaju narzędzia.

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

The strategy of implementation of grinding operation of toothed gears with use of profile dividing method on Höfler grinding machines is presented. Results of this operation will depend on adopted strategy and machining conditions and the type of tool.

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

W konstrukcjach przekładni zębatach najczęściej spotyka się koła nawęglane oraz hartowane indukcyjnie, od których wymaga się twardości wynoszącej co najmniej 56 HRC. Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna nawet bardzo dokładnie obrobionych kół powoduje, że wykazują one błędy linii zęba i kąta ewolwenty, spowodowane odkształceniami, jakie towarzyszą obróbce cieplnej. W tym przypadku w celu uzyskania określonej klasy dokładności ewentualne błędy usuwa się za pomocą szlifowania. Wyróżnia się 2 grupy metod szlifowania zębów: kształtowe i obwiedniowe [1–3, 9]. Niewątpliwą zaletą metod kształtowych jest to, że umożliwiają one nadanie zarysowi zębów dowolnego kształtu i pozwalają na szlifowanie zębów w kołach o uzębieniu wewnętrznym [7, 9].

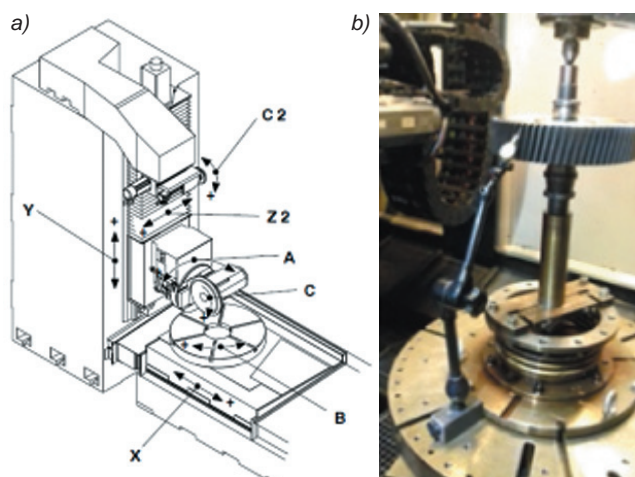
Charakterystyka stanowiska wyposażonego w szlifierkę Rapid Höfler 2000

Badania przeprowadzono na szlifierce Rapid Höfler 2000 do profilowego szlifowania kół zębatach, zainstalowanej w firmie Befared SA, należącej do czołowych producentów reduktorów i motoreduktorów ogólnego zastosowania. Realizacja operacji szlifowania za pomocą tego typu obrabiarek jest stosunkowo szybka. Na rys. 1 przedstawiono widok obrabiarki wraz z opisem osi i głównych ruchów w osiach. Poszczególne osie są przypisane głównym podzespołom, które realizują następujące funkcje [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,
- 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.

Istotne dane techniczne elementu obrabianego są następujące: maksymalna średnica koła wierzchołków $d_a = 2000$ mm, moduł (zależnie od danych uzębienia) $m = 3,5 \pm 30$ mm oraz maksymalny kąt nachylenia lewy/prawy 45° .



Rys. 1. Szlifierka Rapid Höfler 2000: a) opis osi, b) ustalenie wyśrodkowania i współosiowości [7, 9]

Opracowanie strategii szlifowania kształtowo-podziałowego dla wytwarzanych kół zębatach

Przez strategię szlifowania kształtowo-podziałowego należy rozumieć ogół czynności koniecznych do opracowania zadania obróbki elementu zębatego. Każde zadanie ma określone własne ustawienia wstępne oraz dane elementu obrabianego i dane procesu. Uzyskanie wysokiej jakości i dokładności szlifowanego uzębienia wymaga od operatorów obrabiarek dużego doświadczenia oraz wiedzy praktycznej, tak aby w poszczególnych obszarach okna do definiowania zadania potrafili oni ustalić właściwe parametry. Artykuł omawia sposób opracowania strategii szlifowania kół z uzębieniem zewnętrznym w warunkach przemysłowych.

Operacji szlifowania na szlifierce Rapid Höfler 2000 poddano koła zębata wykonane ze stali C55 po hartowaniu indukcyjnym, o następującej charakterystyce: module $m = 5$ mm, liczbie zębów $z = 68$, średnicy podziałowej $d_p = 345,131$ mm, kącie przyporu $\alpha = 20^\circ$, kącie pochylenia linii zęba $\beta = 9^\circ 53' 30''$, współczynnika korekcji $x = 0$. Obciążanie ściernicy prowadzono po wyszlifowaniu 7, 9, 11, 13, 15 i 17 wrębów koła zębatego. Dla kół zębatach po szlifowaniu z różnymi wariantami obciążania ściernicy wykonano pomiary (na współrzędnościowej maszynie pomiarowej) omówionych dalej, następujących odchylek: F_{α} , $f_{H\alpha}$, F_{β} , $f_{H\beta}$, F_p , F_r [4–6].

* Dr inż. Piotr Zyzak (pzyzak@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, mgr inż. Paweł Kobiela (pawel.kobiela@befared.pl) – Fabryka Reduktorów i Motoreduktorów Befared SA

Przebadano 6 kół zębatych ze stali niestopowej jakościowej do ulepszania cieplnego C55, zawierającej następujące pierwiastki: 0,52÷0,6% C, 0,6÷0,9% Mn, maksymalnie 0,4% Si, maksymalnie 0,045% P, maksymalnie 0,045% S, maksymalnie 0,4% Cr, maksymalnie 0,4% Ni i maksymalnie 0,1% Mo.

Po operacjach toczenia z nadładkiem, ulepszania cieplnego, toczenia, wiercenia i gwintowania uzębienie kół zębatych nacinano frezrem ślimakowym NM5 PA20 PRE-GR PROTUB ze stali szybkotnącej z powłoką ALCROM Al2+ (FUTURA NANO), o średnicy $D = 119,8$ mm, szerokości $B = 140$ mm i następującej charakterystyce: module $m = 5$, kącie przyporu $\alpha = 20^\circ$, kącie pochylenia linii śrubowej frezu $\lambda = 2^\circ 41'$. Nacinanie przeprowadzono na frezarce obwodniowej SAMPUTENSILI S800 z układem sterowania SINUMERIK. Frezowanie obwodniowe przeprowadzono z parametrami skrawania: $n_f = 186,09$ obr/min, $f = 2,50$ mm/obr, $v_c = 70$ m/min. Stosowano intensywne chłodzenie i smarowanie olejem bazowym MOBIL-MET 443, zawierającym dodatki uszlachetniające.

Po frezowaniu i gratowaniu zębów kół zębatych poddano je hartowaniu indukcyjnemu, metodą ząb po zębie, do osiągnięcia twardości 58÷60 HRC. Hartowanie poszczególnych zębów odbywało się metodą posuwową – w trakcie procesu dokonywano podziału o jeden ząb. Stosowano generator HF 35 kW oraz podajnik IV-630 (UNITERMA 35/50) przy częstotliwości 300÷400 kHz. W przypadku kół zębatych o module 5 instrukcja IP-10.03.04/03 zaleca następujące parametry operacji: natężenie prądu 670 A, posuw maszynowy 2, grubość warstwy ok. 1 mm. Po hartowaniu indukcyjnym koła poddano odpuszczaniu zgodnie z instrukcją IP-10.03.02.

Na pierwszym etapie realizacji strategii szlifowania kształtowo-podziałowego kół zębatych dokonano integracji stołu szlifierki z obrabianym elementem, który zamocowano na membranie z trzpieniem. Po zamocowaniu ustalono współosiowość koła zębatego z osią stołu oraz sprawdzono bicie promieniowe za pomocą czujnika Mitutoyo RRY 483. Uzyskano wartość bicia promieniowego rzędu 5 μ m. Zamocowanie i ustawienie koła zębatego względem osi obrabiarki kończy etap przygotowania szlifowania. Po ustaleniu wysokości zamocowania oraz przygotowaniu programu szlifowania można zdefiniować strategię obróbki. W jednym z pól okna do definiowania zadania ustalono profil ewolwentowy. Dla elementu obrabianego wprowadzono wartości parametrów charakteryzujących jego geometrię oraz ustawienia dotyczące zakresu stopy i wierzchołka oraz linii powierzchni nośnej zęba. W geometrii dodatkowej podano wysokość dolnej krawędzi przedmiotu obrabianego, która wynosiła 1209 mm. Jest to czynność wymagana przez układ sterowania obrabiarki, potrzebna do wewnątrzprogramowego przeprowadzenia kontroli kolizji. Średnica tarczy szlifierskiej wynosiła 276,0962 mm.

Prawidłowy przebieg szlifowania zależy również od określenia dodatkowego wybiegu góra/dół tarczy szlifierskiej. Długość wybiegu przyjęto na poziomie 15 mm. W jednym z pól ustawiane są parametry do optymalizacji kąta wychylenia tarczy szlifierskiej. Podczas szlifowania tarcza szlifierska jest wychylona o kąt odbiegający od kąta nachylenia – np. w celu minimalizacji wybiegu skoków lub wyrównania siły podczas wstępowania oraz występowania tarczy szlifierskiej [7]; w opracowanym zadaniu wyznaczona różnica w stosunku do kąta nachylenia wynosiła 0,0885°. Kołom zębatym nadano odpowiednie oznaczenia, aby operację szlifowania realizować każdorazowo od wrębu oznaczonego numerem 1.

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

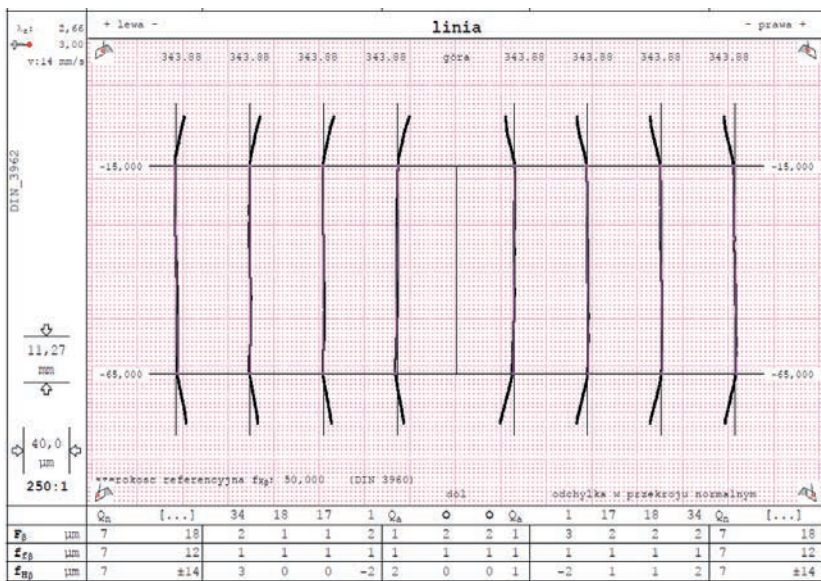
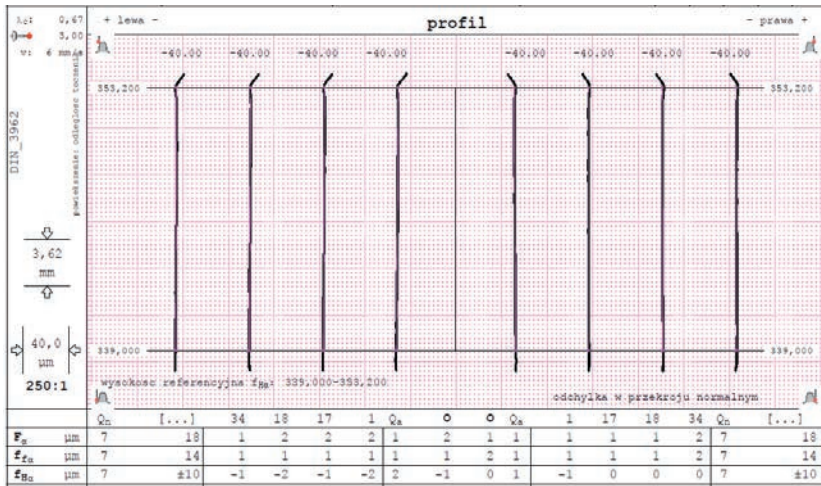
- w przejściu 1: promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, $k_d = 1$, $\eta = 0,6$;
- w przejściu 2: promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 1$, $\eta = 0,6$;
- w przejściu 3: promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 1,5$, $\eta = -0,3$;
- w przejściu 4: promieniowe dostawienie obciążania 0,05 mm, wskaźnik pokrycia $k_d = 6$, $\eta = -0,6$.

W analizowanym zadaniu obróbkowym zdecydowano się na ręczne znalezienie wrębu, natomiast centrowanie wrębu odbywało się automatycznie. W tej metodzie wyśrodkowywania środki wrębów są określane przez automatyczny dotyk powierzchni nośnych zęba za pomocą tarczy szlifierskiej. Liczba wrębów określona dla automatycznego centrowania wynosiła 6, natomiast liczba płaszczyzn – 2 (płaszczyzna górna i dolna rozłożone równomiernie we wprowadzonym obszarze). Rozpoczęcie obróbki wymagało zdefiniowania liczby przejść oraz ustalenia tabeli skoków – zarówno dla szlifowania 2-, jak i 1-powierzchniowego. W opracowanym zadaniu realizowanej strategii szlifowania przyjęto 2-powierzchniowe szlifowanie kół zębatych w 4 przejściach:

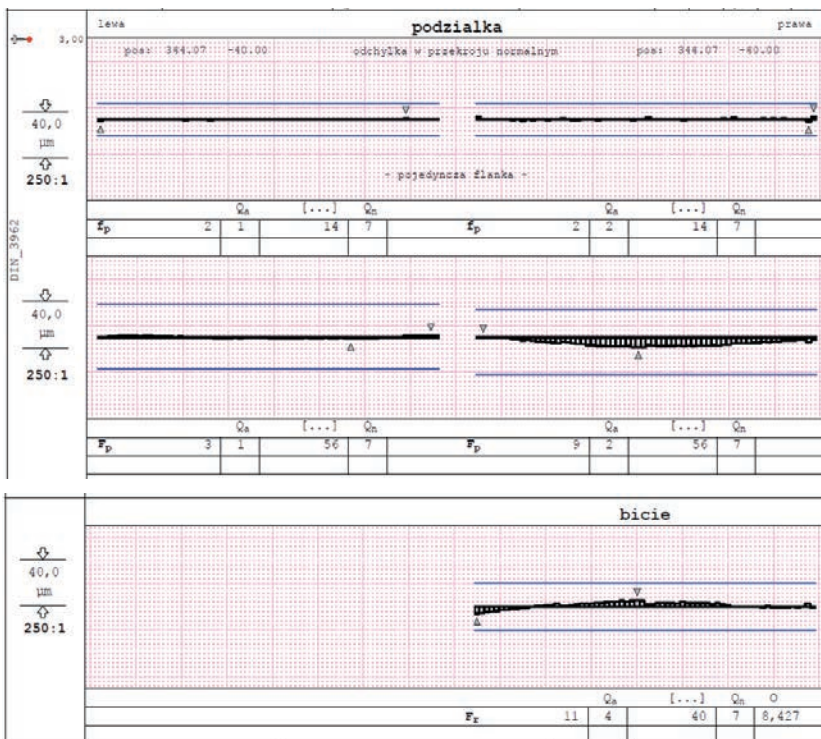
- dla przejścia 1 ustalono: sumę dostawień 0,120 mm (6 skoków po 0,02 mm), całkowitą sumę dosuwów 0,310 mm, dostawienie promieniowe 0,055 mm, posuw 7000 mm/min oraz objętość skrawania $V'_w = 26,4267$ mm³/mm;
- dla przejścia 2 ustalono: sumę dostawień 0,120 mm (6 skoków po 0,02 mm), całkowitą sumę dosuwów 0,310 mm, dostawienie promieniowe 0,055 mm, posuw 7000 mm/min, objętość skrawania $V'_w = 26,4267$ mm³/mm;
- dla przejścia 3 ustalono: sumę dostawień 0,05 mm, całkowitą sumę dosuwów 0,310 mm, dostawienie promieniowe 0,041 mm dla 2 skoków po 0,015 mm – posuw 4500 mm/min, dostawienie promieniowe 0,028 mm dla 2 skoków po 0,01 mm – posuw 4000 mm/min, objętość skrawania $V'_w = 11,011$ mm³/mm;
- dla przejścia 4 ustalono: sumę dostawień 0,020 mm (2 skoki po 0,01 mm), całkowitą sumę dosuwów 0,310 mm, dostawienie promieniowe 0,028 mm, posuw 2200 i 1800 mm/min, objętość skrawania $V'_w = 4,4044$ mm³/mm.

Po zakończeniu szlifowania pierwszego koła przeprowadzono kalibrację, aby następnie przygotować oraz przeprowadzić pomiary po szlifowaniu. Po kalibracji uzyskuje się dokładną pozycję czujnika pomiarowego.

Według opracowanej strategii przeprowadzono szlifowanie 6 kół zębatych z różnymi wariantami obciążania ściernicy. Po operacjach frezowania, hartowania indukcyjnego oraz szlifowania wykonano pomiary dokładności uzębienia na maszynie współrzędnościowej ZEISS PRISMO NAVIGATOR firmy CARL ZEISS z wykorzystaniem skaningowej głowicy pomiarowej Vast Gold oraz oprogramowania ZEISS GEAR PRO Involute 2014. Do oceny dokładności wykonania uzębienia przyjęto (według PN-ISO 1328-1): całkowitą odchyłkę zarysu F_a , 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



Rys. 2. Arkusz wyników pomiarów odchyłek podziałek oraz bicia promieniowego uzębienia koła zębatego



Rys. 3. Arkusz wyników pomiarów odchyłek profilu oraz linii zęba uzębienia koła zębatego

podziałek koła F_p , odchyłkę podziałki f_p oraz bicie promieniowe F_r . Przykładowe reprezentacje graficzne uzyskanych wyników dla koła zębatego z przyjętym wariantem obciążania ściernicy co 17. wręb przedstawiono na rys. 2 i 3.

Podsumowanie

Przedstawiona strategia opracowania i realizacji szlifowania kształtowo-podziałowego kół zębatych z różnymi wariantami obciążania ściernicy umożliwiła uzyskanie wysokiej dokładności szlifowanego uzębienia, co potwierdziły wyniki pomiarów wybranych odchyłek. Wartości średnie odchyłek F_a , f_{Ha} i f_{ra} odpowiadały najczęściej 2. klasie dokładności, natomiast odchyłki F_{β} , $f_{r\beta}$ i $f_{rH\beta}$ mieściły się w 1. klasie dokładności wykonania. Można przyjąć, że opracowanie odpowiedniej strategii szlifowania – z uwzględnieniem określonego zadania, geometrii uzębienia, rodzaju obróbki poprzedzającej szlifowanie, sposobu ustalenia i zamocowania detalu do obróbki – oraz strategii obciążania ściernicy będzie się przekładało na dokładność wykonania szlifowanego uzębienia. Szlifowanie na szlifierkach Rapid Höfler jest procesem niezwykle złożonym, uwzględniającym bardzo wiele czynników wejściowych.

Na podstawie analizy stanu wiedzy z zakresu szlifowania uzębienia można stwierdzić, że szlifowanie kształtowo-podziałowe będzie nadal wiodącą obróbką wykończeniową zębów kół zębatych.

LITERATURA

- Ocoś K.E., Porzycki J. „Szlifowanie. Podstawy i technika”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
- Ochęduszek K. „Koła zębate. T. II. Wykonanie i montaż”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1992.
- Ocoś K.E., Marciniak M. „Rozwój konstrukcji obrabiarek do realizacji procesów szlifowania. Część 2”. *Mechanik*. 79, 3 (2006): s. 192–198.
- PN-ISO 1328-1 (1997): Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Definicje i wartości odchyłek jednoimiennych boków zębów.
- PN-ISO 1328-2 (1997): Definicje i wartości odchyłek pomiarowych złożonych i odchyłek bicia.
- DIN 3962 (1978): Toleranze für Stirnradverzahnungen. Toleranze für abweichungen einzelner Bestimmungsgößen.
- Instrukcja obsługi szlifierki kształtowo-podziałowej Rapid 2000 do obróbki wykończeniowej uzębienia firmy Höfler (Niemcy).
- www.klingelberg.com/en/business-divisions/hoeffler/cylindrical-gear-grinding-machines/detail-page/product/rapid-2000/ (dostęp: 20.06.2017 r.).
- Płonka S., Szadkowski J., Matuszek J., Kobiela P. „Rozwój wybranych metod kształtowania obróbką skrawaniem uzębień kół zębatych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Transport*. 87, 1929 (2015): s. 11–20.
- Rosik R., Świerczyński J. „Wpływ metody MQL na parametry kształtowania czynnej powierzchni ściernicy i chropowatość warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego”. *Inżynieria Maszyn*. 16, 1–2 (2011): s. 175–185.