

# OBRÓBKA WYKOŃCZENIOWA WALCOWYCH KÓŁ ZĘBATYCH NA FREZARKACH CNC

**Rafał TALAR<sup>1</sup>**

## **STRESZCZENIE**

*W referacie zaprezentowano wybrane wyniki prób obróbki wykończeniowej walcowych kół zębatach na frezarkach i centrach obróbczych CNC. Próby wykonywano z wykorzystaniem jednoostrzowego narzędzia specjalnego. Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość obróbki kół zębatach walcowych w stanie zahartowanym. Wskazano niedostateczną wydajność procesu, jednocześnie określono drogę prowadzącą do dosunięcia tego problemu.*

## **WSTĘP**

Obróbka wykończeniowa kół zębatach jest procesem złożonym i jednocześnie pracochłonnym, dodatkowo wiąże się ze znacznymi nakładami finansowymi. Nakłady te obejmują zakup narzędzi i wysoki koszt eksploatacji obrabiarek przeznaczonych do obróbki kół zębatach. W produkcji kół zębatach o nieznormalizowanym profilu odniesienia konieczne jest zastosowanie narzędzi specjalnych wykonywanych na zamówienie, co znacznie podwyższa koszty produkcji i wydłuża czas wykonania zlecenia. Obecnie pojawiła się duża liczba przedsiębiorstw zajmujących się obróbką skrawaniem z wykorzystaniem obrabiarek CNC. Przedsiębiorstwa te nabywają obrabiarki CNC między innymi dzięki dotacjom z funduszy Unii Europejskiej. Z tego względu popularność tego typu obrabiarek wzrasta, co pociąga za sobą wzrost konkurencji. Producenci obrabiarek prześcigają się w unowocześnianiu swoich produktów, lecz żadna z nich nie wprowadziła rozwiązań pozwalających na obróbkę wykończeniową kół zębatach. Kontynuując prace przedstawione w minionym latach skonstruowano

---

<sup>1</sup> dr inż. Rafał Talar – Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej

i wykonano próbne narzędzie jednoostrzowe. Narzędzie to miało w zamyśle służyć do obróbki wykończeniowej walcowych kół zębatach w określonym przedziale wielkości modułów, niezależnie od: kąta przyporu, współczynnika wysokości głowy zęba, luzu wierzchołkowego, grubości zęba, korekcji uzębienia, liczby zębów koła zębatego. W kolejnym etapie przeprowadzono badania obróbki kół zębatach wykonanych uprzednio narzędziem specjalnym oraz poddano ocenie efekty przeprowadzonej obróbki.

### NARZĘDZIE SPECJALNE

Jako podstawę podczas konstrukcji narzędzia przyjęto prostotę wykonania oraz możliwość obróbki wykończeniowej koła zębatego o modułach od 2,5 mm do 8 mm (przyjęto  $m = 5,5$ ) oraz o liczbie zębów od 2 do 100 (przyjęto  $z = 16$ ), kącie pochylenia linii zębów  $\beta = 0$ , kącie przyporu od  $17,5^\circ$  do  $25^\circ$  (przyjęto  $\alpha_0 = 20^\circ$ ). Przyjęte wartości parametrów koła zębatego pozwalają na łatwy dostęp do powierzchni obrobionej podczas oględzin i pomiarów. W założeniu, narzędzie przeznaczono do obróbki wykończeniowej krótkich serii (maksimum kilkanaście sztuk) kół zębatach w tym kół zębatach o zahartowanych powierzchniach nośnych. Narzędzie skonstruowano w formie jednoostrzowego frezu tarczowego z wymienną płytką skrawającą. Jedno czynne ostrze skrawające ma zarówno istotne zalety, ale i wady. Do zalet należy zaliczyć wyeliminowanie błędu wzajemnego położenia wielu ostrzy skrawających. W przypadku narzędzi wielostrzowych gniazda na płytki skrawające muszą być względem siebie bardzo dokładnie usytuowane, ważne jest w takim przypadku wzajemne położenie katowe, jednakowa głębokość gniazd oraz odległość punktów bazowych gniazd od osi obrotu narzędzia. Zasadniczą wadą narzędzia jednoostrzowego jest znacznie mniejsza wydajność obróbki niż w przypadku narzędzi wielostrzowych. Wada ta traci na znaczeniu w przypadku prac badawczych, gdzie wydajność procesu jest drugoplanowa. Jednocześnie kształt narzędzia musi pozwalać na potencjalne zastosowanie wielu ostrzy skrawających. Korpus narzędzia zaprojektowano w formie frezu trzpieniowego z gniazdem na jedną wymienną płytkę skrawającą mocowaną za pomocą śruby (rys.1). Korpus prototypowego narzędzia wykonany został ze stali 40H ulepszonej cieplnie do twardości 40 HRC. Jedyne wątpliwości wzbudzała sztywność korpusu narzędzia. Ze względu na ograniczoną przestrzeń pomiędzy zębami w okolicy dna wrębu, szerokość tarczy wraz z osadzoną płytką musiała być niewielka – maksimum 4 mm. Większa grubość tarczy z płytką skrawającą doprowadziłaby do kolizji narzędzia z powierzchnią boczną zęba leżącego po przeciwnej stronie wrębu do powierzchni obrabianej. Jednakże w trakcie prób narzędzie okazało się być dostatecznie sztywne i nie stwierdzono nadmiernych drgań. Narzędzie specjalne mocowano w oprawce zaciskowej walcową częścią chwytową narzędzia o średnicy 20 mm i długości 55 mm. Elementem determinującym średnicę

tarczy jest jedynie głębokość wrębu obrabianego koła, która w rozpatrywanym przypadku wynosi niecałe 13 mm. Mniejsza średnica tarczy poprawiłaby sztywność konstrukcji co zmniejszyłoby ewentualne drgania powstające przy wysokich prędkościach obrotowych, będących skutkiem braku wyważenia narzędzia (nie stwierdzono takich drgań do 15000 obr/min wrzeciona wraz z narzędziem).



Rys.1. Widok narzędzia specjalnego wraz z oprawką HSK

W badaniach wykorzystano płytkę z otworem, trójostrzową z prostoliniową krawędzią skrawającą przechodzącą na jednym z końców w łuk o promieniu 2 mm, wykonaną z węgla spiekane P30-35 bez powłok przeciwzużyciowych.

### **BADANIE PROCESU OBRÓBKI WYKOŃCZENIOWEJ - TECHNOLOGIA**

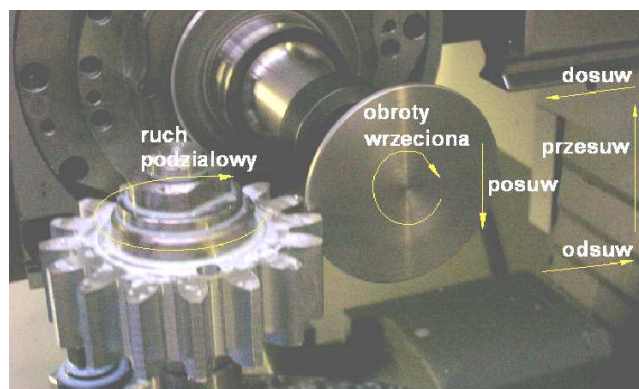
Badania procesu obróbki wykończeniowej kół zębatach przeprowadzono na 5-osiowym centrum obróbkowym DMU 60 będącym na wyposażeniu Instytutu Technologii Mechanicznej PP. Proces technologiczny wykonania uzębienia podzielono na trzy operacje: obróbkę kształtującą wręby koła zębatego, obróbkę cieplną i obróbkę wykończeniową z wykorzystaniem narzędzia specjalnego. Dysponując otoczką, wykonano wręby zębów z protuberancją i naddatkiem na obróbkę wykończeniową o wartości 0,3 mm na każdą ze stron zęba. W naszym przypadku naddatek wynosił 0,3 mm na stronę. Obróbkę kształtującą przeprowadzono frezami palcowymi o średnicach części roboczej kolejno 10 mm, 6 mm, 4 mm. Dla ułatwienia zarys ewolwentowy boku zęba zastąpiono zarysem o kształcie łuku o promieniu 16 mm. Maksymalne odchylenie między zarysem łukowym zęba a zębem o zarysie ewolwentowym nie przekroczyło 0,08 mm. Proces obróbki kształtującej wręby uzębienia następował kolejno wręb po wrębie wg ścieżek. Program sterujący obrabiarką wygenerowano w środowisku

CAD-CAM. Obróbka kształtująca była przeprowadzona na otoczkach w sztywnym zamocowaniu za pomocą śruby z nakrętką do stołu frezarki (rys.2). Obróbka kształtująca za pomocą frezów palcowych okazała się być bardzo czasochłonna, gdyż potrzeba było około 90 minut na wykonanie jednego pełnego wieńca zębatego o szerokości 30 mm.



Rys.2.. Obróbka kształtująca wieńca koła zębatego

Kolejnym etapem było przeprowadzenie obróbki cieplnej kół zębatach po obróbce kształtującej z materiału 40H, która miała na celu zwiększenie twardości do 40 HRC. W ostatnim etapie przeprowadzono obróbkę wykończeniową, narzędziem specjalnym zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 3.



Rys.3. Schemat obróbki wykończeniowej powierzchni bocznych koła zębatego na frezarce CNC

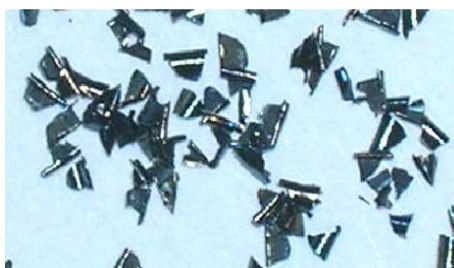
W procesie obróbki wykończeniowej skrawano naddatek obróbkowy pozostawiony uprzednio w czasie obróbki kształtującej. Usuwanie naddatku następowało w wyniku kolejnych przejść w kierunku osi koła zębatego. Ze względu na wypukłą krawędź skrawającą o promieniu 2 mm i zakładaną wartość parametru chropowatości powierzchni  $R_a$  na poziomie  $0,5 \mu\text{m}$  każdy z boków zęba obrabiano w 60 przejściach składających się na obwiednie ewolwenty. Po wykonaniu 60 przejść koło zębate obracano o kąt odpowiadający jednej podziałce i

przystępowano do obróbki kolejnego boku zęba. Po obrobieniu wszystkich boków zębów z jednej strony, przystępowano do obróbki przeciwległych boków zębów stosując odbicie lustrzane kinematyki obróbki.

Tabela 1. Parametry obróbki wykończeniowej koła zębatego

Materiał		Posuw roboczy $f$ [mm/min]	Prędkość obrotowa $n$ [obr/min]	Prędkość skrawania $v_c$ [m/min]	Czas obróbki [min]
Prolan 55		450	5000	1256	20
Aluminium PA4		450	3000	754	50
Stal 40H	Przed o.c.	450	3000	754	50
	Po o.c.	50	500	126	180

Wynika z tego, że jedno z boków zębów będą wykonane współbieżnie a boki przeciwległe przeciwbieżnie, co wywołało niewielkie różnice wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionych. Badania przeprowadzono wykorzystując obróconą o 90 stopni oś B obrabiarki. Obróbka wykończeniowa przeprowadzana wg przedstawionej metody wymaga sterowania tylko trzema osiami, w tym jedną obrotową.



Rys.4. Widok wiórów zebranych podczas obróbki materiału 40H w stanie normalizowanym



Rys.5. Widok wiórów zebranych podczas obróbki materiału 40H w stanie zahartowanym

W celach porównawczych przeprowadzono również próby obróbki wykończeniowej koła zębatego ze stali 40 w stanie normalizowanym, a także kół ze stopu aluminium PA4 i tworzywa sztucznego Prolab 55. W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów obróbki odpowiednio do materiału obrabianego. Podczas badań ujawniła się niedostateczna wydajność procesu z zastosowaniem narzędzia jednoostrzowego, gdyż czas obróbki koła zębatego z twardego materiału (40H po obróbce cieplnej) zwiększył się o ponad 3,5 raza w stosunku do kół zębatach z materiałów miękkich i wynosił 180 minut. Wiąże się to koniecz-

nością znacznego zmniejszenia wartości parametrów obróbki. Próby zwiększenia wartości parametrów obróbki w czasie obróbki materiału zahartowanego doprowadzały do zniszczenia krawędzi skrawającej przed zakończeniem obróbki wszystkich powierzchni bocznych zębów. Pomimo znacznego zmniejszenia parametrów obróbki w czasie skrawania materiału twardego, w stosunku chociażby do tego samego materiału w stanie normalizowanym, można zaobserwować występowanie bardzo wysokiej temperatury w strefie skrawania. Dla porównania na rysunku 4 przedstawiono widok wiórów zebranych podczas obróbki materiału 40H w stanie normalizowanym, a na rysunku 5 przedstawiono widok częściowo stopionych wiórów zebranych podczas obróbki materiału 40H w stanie zahartowanym.

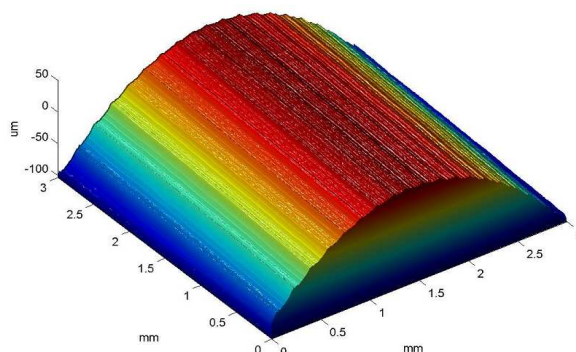
### **– BADANIE PROCESU OBRÓBKII WYKOŃCZENIOWEJ – STRUKTURA GEOMETRYCZNA POWIERZCHNI OBROBIONYCH**

W wyniku obróbki wykończeniowej narzędziem specjalnym otrzymano wieniec zębaty z zahartowanymi i obrobionymi powierzchniami bocznymi zębów (rys. 6). Nieobrobione pozostało dno wrębów.



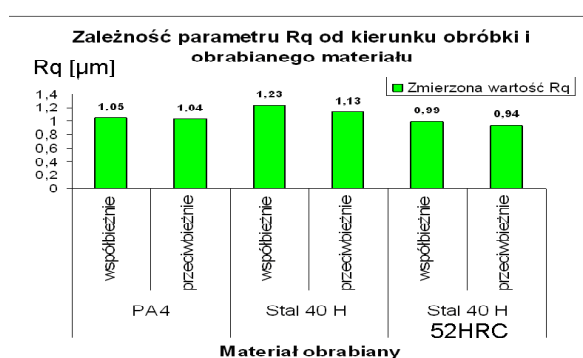
Rys.6. Widok fragmentu obrobionego wieńca zębatego ze stali 40H 52HRC

Oględziny powierzchni obrobionych nie wykazały żadnych widocznych skaz. Pomiary wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionych wykonano czujnikiem typu S250 (bez ślizgacza) z igłą stożkową o kącie wierzchołkowym  $90^\circ$  i promieniu  $r = 2 \pm 0,5 \mu\text{m}$ , o zakresie pomiarowym czujnika  $250 \mu\text{m}$ . Pomiar odbywał się wzdłuż zarysu zęba prostopadle do kierunku obróbki specjalnym narzędziem jednoostrzowym. Zbierając równoległe kolejne profile nierówności powierzchni uzyskano obraz struktury geometrycznej powierzchni obrobionej (rys.7). Na obrazie struktury geometrycznej powierzchni obrobionej mającej wyraźnie kierunkowy charakter wyraźnie odwzorowana jest kinematyka obróbki. Świadczy to o braku występowania zakłóceń tribologicznych mogących powstawać podczas zjawisk adhezyjnych w strefie skrawania.



Rys.7. Obraz struktury geometrycznej powierzchni obróbjonej przeciwbieżnie

Wyraźne odwzorowanie kinematyki obróbki świadczy o stabilności obróbki nadmiernych i braku występowania nadmiernych drgań układu o-u-p-n. Spodziewano się występowania drgań ze względu na nieszttywny trzpień frezarski i nieszttywne narzędzie.



Rys.8. Wartości parametru  $R_q$  w zależności od kierunku obróbki i rodzaju materiału obrabianego

Niestety pomimo aż 60 przejść składających się na obwiednię ewolwenty, na obrazie struktury geometrycznej widać pomiędzy poszczególnymi przejściami narzędzia nieusunięty fragment materiału (przekrój reszkowy) w formie smukłego wzniesienia. Jest to skutek zastosowania płytki skrawającej z promieniem naroża. Jednak dalsze zwiększenie liczby przejść na jeden bok zęba spowoduje wydłużenie i tak długiego czasu obróbki. Obróbka wykończeniowa przeciwnych powierzchni bocznych zębów była prowadzona w odmienny sposób w jednym przypadku przeciwbieżnie w drugim przypadku współbieżnie. Zachodzi więc pytanie, czy kierunek obróbki wpłynął na strukturę geometryczną powierzchni obróbjonej. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki uśrednionych wartości parametru chropowatości  $R_q$ . Widać na nim brak wyraźnych różnic między

wartościami parametru  $R_q$  dla powierzchni obrobionych przeciwbieżnie i współbieżnie, co jest efektem pożądanym. Dodatkowo można zauważyć niewielką różnicę wartości parametru  $R_q$  dla materiałów znacznie różniących się właściwościami, poczynając od miękkiego, dobrze skrawalnego stopu aluminium PA4, kończąc na zahartowanej do 52 HRC stali 40H. Przedstawiona prawidłowość zachodzi także w stosunku do innych parametrów charakteryzujących stan powierzchni po obróbce.

## PODSUMOWANIE

Badania doświadczalne procesu obróbki wykończeniowej narzędziem specjalnym wieńców zębatych, w tym wieńców zębatych zahartowanych do twardości 52 HRC potwierdziły możliwość obróbki kół zębatych w stanie twardego na uniwersalnych frezarkach i centrach obróbkowych CNC. Pomiary struktur geometrycznych powierzchni obrobionych dla materiałów o znacznie różniących się właściwościach potwierdziły stabilność procesu obróbki, co jest warunkiem koniecznym jej przydatności. Wyniki określające udział nośny materiału wykazały konieczność modyfikacji kształtu ostrzy skrawających. Jednak rezygnacja z obróbki zaokrąglonym narożem i zastąpienie jej obróbką prostoliniowym ostrzem skrawającym spowoduje znaczny wzrost złożoności kinematyki obróbki, co będzie wymagało sterowania przynajmniej 4 osiami obrabiarki. Wykonanie narzędzia wieloostrowego pozwoli na proporcjonalne do liczby ostrzy podniesienie wydajności. Przewiduje się modyfikację metody obróbki, w wyniku której będzie możliwa obróbka dna wrębu, co zwiększy wytrzymałość na złamanie zębów oraz opracowanie aplikacji generującej kod sterujący obrabiarką na podstawie dostarczonych w postaci liczbowej parametrów geometrycznych kół zębatych.

## FINISH MACHINING OF GEARS ON CNC MACHINING CENTERS

### SUMMARY

*Chosen results of research finish machining of gears using CNC milling machines and machining centers have been presented in the paper. Research has been made by single wedge special cutting tool. Executed investigations approved the possibility of hardened gears machining. One indicate insufficient production capacity and simultaneously one determine the way of the solution, this problem.*