

Wojciech STACHURSKI*, **Jacek SAWICKI****,
Łukasz KACZMAREK**

WPLYW CZYNNIKA CHŁODZĄCO-SMARUJĄCEGO NA STAN WARSTWY WIERZCHNIEJ ZĘBÓW KÓŁ FREZOWANYCH OBWIEDNIOWO

THE INFLUENCE OF CUTTING FLUID APPLICATION ON SURFACE LAYER CONDITION OF GEARS GENERATED BY HOBBING

Słowa kluczowe:

frezowanie obwiedniowe, warstwa wierzchnia, ciecz obróbkowa, chropowatość powierzchni, minimalne smarowanie (MQL)

Key words:

hobbing, surface layer, cutting fluid, surface roughness, minimum quantity lubrication MQL

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących określenia wpływu różnych strategii podawania cieczy obróbkowej na stan war-

* Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, tel. (42) 631-24-13, e-mail: wojciech.stachurski@p.lodz.pl.

** Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Materiałowej, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, e-mail: jacek.sawicki@p.lodz.pl, lukasz.kaczmarek@p.lodz.pl.

stwy wierzchniej powierzchni roboczych kół zębatach frezowanych obwie-dniowo. Frezowanie przeprowadzono z wykorzystaniem podawania cieczy obróbkowej w trybie obfitym, z minimalnym wydatkiem (MQL) oraz z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza. Koła zębata, wykonane ze stali 42CrMo4 w stanie ulepszonym, frezowano na gotowo. Jako narzędzi użyto frezów ze stali szybko tnącej HS6-5-2 bez pokryć przeciwzużyciowych. Wykonano pomiary chropowatości powierzchni na roboczych powierzchniach zębów po stronie wchodzącej i wychodzącej z zazębienia obróbczo-tocznego. Wykonano również badania metalograficzne makroskopowe oraz rozkłady twardości w warstwie powierzchniowej. Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość zastąpienia tradycyjnie stosowanej cieczy obróbkowej (oleju) podawanej w trybie obfitym na rzecz przyjaznych dla środowiska i operatorów obrabiarek alternatywnych sposobów chłodzenia i smarowania.

WPROWADZENIE

Ciecze obróbkowe znajdują powszechne zastosowanie w procesach obróbki skrawaniem. W ostatnich latach, pomimo oczywistych zalet wynikających z ich stosowania, coraz częściej są uznawane za czynnik niepożądany w procesie skrawania. Obok względów ekonomicznych (szacuje się, że zastosowanie cieczy obróbkowych stanowi do 17% kosztów wytwarzania) zaczęto zwracać uwagę na aspekty ekologiczne i konieczność dostosowania się do coraz bardziej rygorystycznych przepisów związanych z ochroną środowiska i BHP. Kontakt ze skórą lub wdychanie cieczy obróbkowych w trakcie procesów produkcyjnych może mieć negatywny wpływ na człowieka, zwłaszcza na operatorów obrabiarek. Składowanie i utylizacja zużytych cieczy obróbkowych powoduje zagrożenie dla środowiska naturalnego [L. 1–3].

Jednak całkowita eliminacja cieczy obróbkowej (skrawanie „na sucho”) często nie gwarantuje dobrych rezultatów procesu obróbkowego. W takim przypadku możliwe jest stosowanie alternatywnych sposobów smarowania i chłodzenia. Jednym z nich jest obróbka z minimalnym wydatkiem cieczy obróbkowej (MQL – Minimum Quantity Lubrication), gdzie środek smarujący jest podawany w strefę skrawania w postaci mgły olejowej.

Do podstawowych zalet tego sposobu podawania cieczy obróbkowej można zaliczyć:

- zredukowanie bezpośrednich kosztów produkcji,
- brak kłopotów z oddzieleniem wiórów i cieczy obróbkowej,
- wspomaganie produkcji przyjaznej środowisku,
- eliminację szoku termicznego.

Drugim alternatywnym sposobem chłodzenia jest obróbka z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza (SSP). Schłodzone sprężone powietrze jest

podawane w strefę styku narzędzia z materiałem obrabianym, zapewniając skuteczne chłodzenie w procesie obróbki.

MQL i SSP są coraz częściej stosowane w przemyśle i laboratoriach badawczych w procesach obróbki wiórowej. Dotychczasowe badania wykazały, że w pewnych warunkach ich stosowanie pozwala na uzyskanie wyników (siły skrawania, trwałość narzędzi) porównywalnych do konwencjonalnego podawania cieczy obróbkowej i znacznie lepszych niż dla obróbki „na sucho” [L. 2, 4, 5, 6].

W Instytucie Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej realizowane są badania frezowania obwiedniowego kół zębatych z udziałem alternatywnych sposobów podawania cieczy obróbkowych w strefę skrawania. Dotychczasowe prace prowadzone przez autorów, jak i te dostępne w publikacjach, dotyczyły określenia wpływu środka chłodząco-smarującego na proces zużycia narzędzia i jego trwałość. Wyniki tych badań dowiodły, że w pewnych warunkach stosowanie alternatywnych sposobów pozwala na uzyskanie wyników porównywalnych do konwencjonalnego podawania cieczy obróbkowej i znacznie lepszych niż dla obróbki „na sucho” [L. 1, 5–9].

Obok aspektu związanego ze zużyciem narzędzia również istotne jest zbadanie wpływu zastosowanego czynnika chłodząco-smarującego na stan warstwy wierzchniej powierzchni roboczych zębów koła zębatego wykonywanego na gotowo. Zaprezentowane poniżej badania dotyczyły określenia tego wpływu.

WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

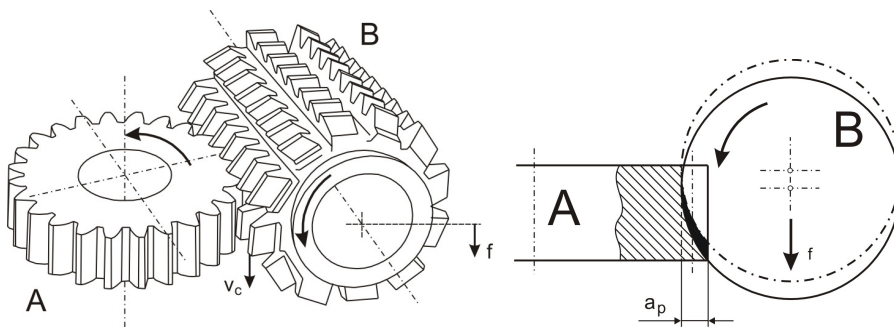
Badania podzielono na dwa etapy. Na pierwszym etapie przeprowadzono frezowanie obwiedniowe (Rys. 1), na drugim zaś – pomiary wybranych parametrów warstwy wierzchniej powierzchni roboczych zębów wytworzonych kół zębatych (topografia, chropowatość, mikrotwardość). Parametry frezowania zostały dobrane na podstawie wcześniejszych badań prowadzonych przez autorów [L. 9–11].

Pomiary chropowatości na powierzchniach roboczych zębów wykonano profilometrem T8000 firmy Hommelwerke. Do porównywania użyto wartość chropowatości wyrażoną parametrem R_z . Odcinek pomiarowy L_t wynosił 4,8 mm i składał się z 6 odcinków elementarnych $L_c = 0,8$ mm. Dla każdego koła zębatego losowo wybrano do pomiaru pięć zębów, a następnie wykonano po dziesięć pomiarów w kierunku prostopadłym do linii zęba po obu jego stronach – wchodzącej i wychodzącej z zazębienia obróbczo-tocznego. Uzyskiwano w ten sposób obraz topografii powierzchni, a wartość średnia z dziesięciu pomiarów była podawana jako wartość chropowatości R_z i R_a na mierzonej stronie pojedynczego zęba. Ostatecznie jako wartość chropowatości dla pojedynczego koła zębatego przyjmowano jej największą wartość spośród pięciu zmierzonych zębów.

Pomiary mikrotwardości wykonano w skali Vickersa HV0,1 z użyciem mikrotwardościomierza CLEMEX na szlifach prostopadłych do powierzchni szlifowanej. Pomiary przeprowadzono do głębokości 100 μm od powierzchni obrabianej. Badania wykonano z użyciem skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI S-3000N.

FREZOWANIE OBWIEDNIOWE KÓŁ ZĘBATYCH

W trakcie badań frezowano koła zębate walcowe o zębach prostych ze stali węglowej 42CrMo4 ulepszonej cieplnie do twardości 300 ± 10 HV. Użyto frezów ślimakowych NMFc-3/20°/B o module $m = 3$ wykonanych ze stali szybkołatającej HS6-5-2 bez pokryć przeciwzużyciowych. Badania prowadzone były dla stałej wartości prędkości skrawania i posuwu, dla frezowania na pełną głębokość wrębów (**Rys. 1**).



Rys. 1. Frezowanie obwiedniowe; A – koło zębate, B – frez ślimakowy, v_c – prędkość skrawania, f – posuw, a_p – głębokość skrawania

Fig. 1. Hobbing; A – gear, B – hob cutter, v_c – cutting speed, f – feed, a_p – depth of cut

Podczas frezowania wykorzystano trzy sposoby chłodzenia i smarowania:

- 1) podawanie cieczy obróbkowej w trybie obfitym (WM),
- 2) z minimalnym wydatkiem cieczy obróbkowej (MQL),
- 3) podawanie schłodzonego sprężonego powietrza (SSP), bez udziału cieczy obróbkowej.

Warunki obróbki zestawiono w **Tabeli 1**.

Do MQL zastosowano urządzenie MicroJet MKS-G100 firmy Link oraz ciecz obróbkową MICRO 3000 dostarczoną przez producenta urządzenia. Urządzenie MKS-G100 przeznaczone jest do zewnętrznego, jednokanałowego wytwarzania mgły olejowej. Ciecz obróbkową dostarczano z wydatkiem około 15 ml/godz.

Do SSP zastosowano urządzenie handlowe oferowane przez firmę WNT, schładzając sprężone powietrze do temperatury minus 20°C.

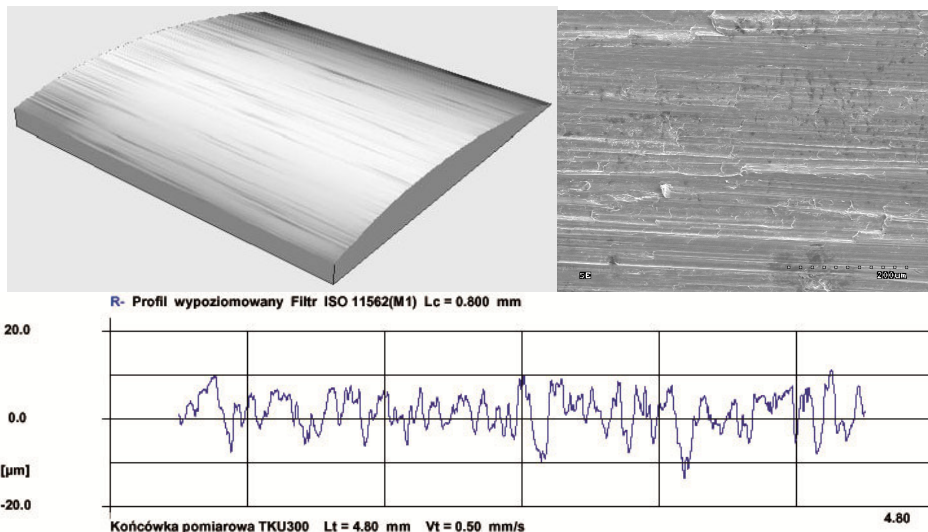
Tabela 1. Warunki obróbki
Table 1. Cutting conditions

Sposób chłodzenia i smarowania	Parametry skrawania
WM	prędkość skrawania – $v_c = 34,4$ m/min
MQL	posuw – $f = 0,5$ mm/obr
SSP	głębokość skrawania – $a_p = 6,6$ mm
	frezowanie przeciwbieżne

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na **Rys. 2** pokazano przykładową topografię oraz profil chropowatości uzyskane dla powierzchni roboczej zęba po stronie wychodzącej z zazębienia obróbczo-tocznego z zastosowaniem MQL. Zestawianie uzyskanych wartości parametru R_z i R_a przedstawiono w **Tabeli 2 i 3** oraz na **Rys. 3 i 4**.

Na podstawie wykonanych pomiarów chropowatości (**Rys. 3**) można zauważyć, że dla zastosowanych w badaniach warunków obróbki na powierzchniach roboczych zębów po stronie wchodzącej w zazębienie obróbczo-toczne uzyskano mniejsze wartości chropowatości R_z niż dla strony wychodzącej z zazębienia. Uwagę zwraca fakt, że różnice te praktycznie nie zależą od rodzaju czynnika chłodząco-smarującego i wynoszą odpowiednio dla WM – 8%, MQL – 9% i SSP – 9%.



Rys. 2. Profil chropowatości R_z oraz topografia powierzchni roboczej zęba po stronie wychodzącej z zazębienia obróbczo-tocznego; MQL

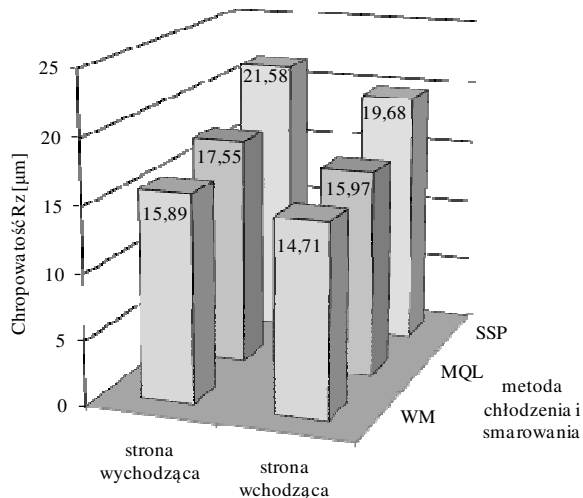
Fig. 2. Surface roughness profile R_z and surface layer topography of the leaving gear flank; MQL

Tabela 2. Parametr chropowatości – R_z
 Table 2. Surface roughness parameter – R_z

	R_z [μm]	
	Strona WCHODZĄCA w ząbienie	Strona WYCHODZĄCA z ząbienia
WM	14,71	15,89
MQL	15,97	17,55
SSP	19,68	21,58

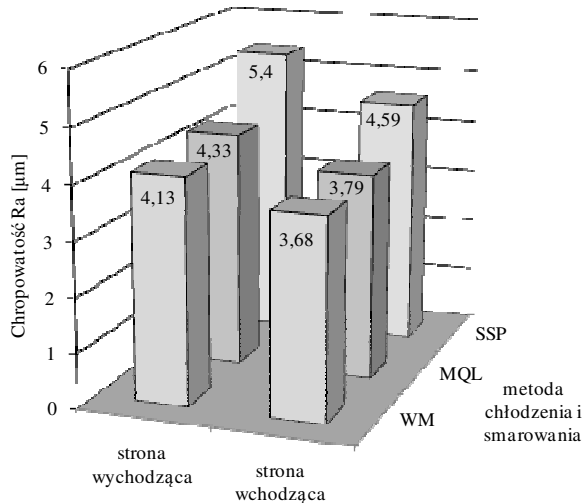
Tabela 3. Parametr chropowatości – R_a
 Table 3. Surface roughness parameter – R_a

	R_a [μm]	
	Strona WCHODZĄCA w ząbienie	Strona WYCHODZĄCA z ząbienia
WM	3,68	4,13
MQL	3,79	4,33
SSP	4,59	5,40



Rys. 3. Wartości parametru chropowatości R_z na powierzchni roboczej zębów frezowanych obwiedniowo z wykorzystaniem WM, SSP, MQL

Fig. 3. Surface roughness profile R_z and surface layer topography of the entering gear flank; MQL



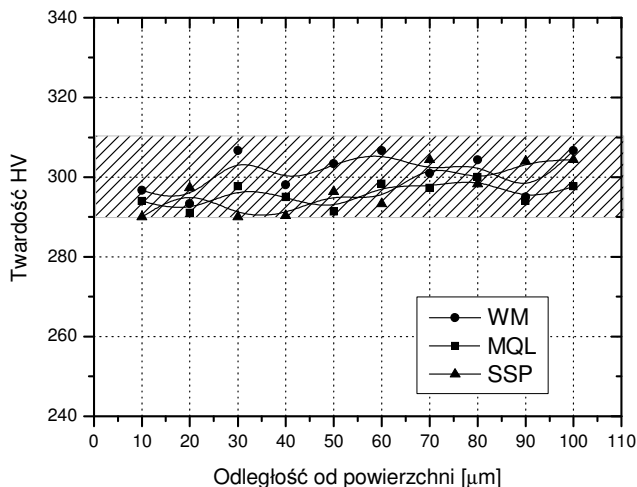
Rys. 4. Wartości parametru chropowości Ra na powierzchni roboczej zębów frezowanych obwiedniowo z wykorzystaniem WM, SSP, MQL

Fig.4. Surface roughness profile Rz and surface layer topography of the entering gear flank; SSP

Większe różnice zaobserwowano, porównując wartości chropowości uzyskane dla poszczególnych sposobów podawania cieczy obróbkowej. Do porównania wybrano największe wartości Rz zmierzone dla strony wychodzącej z zazębienia obróbczo-tocznego. Spośród nich najmniejsza wartość Rz pojawiła się przy podawaniu cieczy obróbkowej w trybie obfitym (WM). Chropowość dla MQL jest większa o około 10% w stosunku do WM, natomiast dla SSP jest to aż 36%.

Wartości parametru Ra (Rys. 4) potwierdzają charakter chropowości określony na podstawie parametru Rz . Na powierzchniach roboczych zębów po stronie wchodzącej w zazębienie obróbczo-toczne uzyskano mniejsze wartości nierówności w porównaniu ze stroną wychodzącą z zazębienia. Różnice te są niewielkie i wynoszą dla WM – 12%, MQL – 14 % i SSP – 17%.

Porównując wartości chropowości uzyskane dla poszczególnych sposobów podawania cieczy obróbkowej, zaobserwowano, że najmniejsza wartość Ra pojawiła się przy podawaniu oleju w trybie obfitym (WM). Chropowość dla MQL jest większa o około 3% w stosunku do WM, natomiast dla SSP jest to aż 25%.



Rys. 5. Profil mikrotwardości w warstwie wierzchniej zęba po frezowaniu z użyciem WM, MQL i SSP

Fig. 5. Surface roughness parameters R_z of the gear's tooth flank generated by hobbing with WM, SSP, MQL method

Uzyskany rozkład mikrotwardości (**Rys. 5**) pokazuje, że dobrane parametry obróbki frezowania oraz sposoby dostarczania cieczy chłodząco-smarującej nie wpłynęły na zmianę wartości mikrotwardości w wykonanym kole zębatym i mieszczą się w zakresie twardości uzyskanej na ulepszonych cieplnie przygotowkach ze stali 42CrMo4.

WNIOSKI

Wyniki pomiarów chropowatości potwierdziły celowość podjęcia badań określających wpływ czynnika chłodząco-smarującego na stan warstwy wierzchniej powierzchni roboczych zębów frezowanych na pełną głębokość wrębów.

Jakość powierzchni roboczych uzyskana dzięki zastosowaniu MQL jest zbliżona do WM. Zdaniem autorów różnicę w jakości tych powierzchni można zmniejszyć poprzez:

- 1) zmianę parametrów skrawania. Dalsze prace powinny koncentrować się na poszukiwaniu najkorzystniejszych prędkości skrawania v_c oraz posuwu f ,
- 2) zmianę materiału narzędziowego,
- 3) wykonanie obróbki wykończeniowej z małym naddatkiem.

Wydaje się, że podawanie schłodzonego sprężonego powietrza (SSP) nie zapewnia odpowiednich warunków obróbki i jako takie nie jest odpowiednie przy wytwarzaniu kół zębatych.

Podziękowania:

Badania zostały zrealizowane ze środków Ministra Edukacji i Nauki w ramach projektu badawczego nr N503 013 31/1839.

LITERATURA

1. Oczóś K.E.: Postęp w obróbce skrawaniem. Cz. II. Obróbka na sucho i ze zminimalizowanym smarowaniem. *Mechanik* nr 1998, nr 5–6, s. 307–318.
2. Oczóś K.E.: Doskonalenie strategii chłodzenia i smarowania w procesach obróbkowych. *Mechanik* 2004, nr 10, s. 597–606.
3. Suda S., Wakabayashi T., Inasaki I., Yokota H.: Multifunctional application of a synthetic ester to machine tool lubrication based on MQL machining lubricants, *Annals of the CIRP* 2004, vol. 53/1, s. 61–64.
4. Byrne G., Dornfeld D., Denekena B.: Advancing cutting technology. *Annals of the CIRP* 2003, vol. 52/2, s. 12–13.
5. Matsuoka H., Suda S., Yokota H., Tsuda Y.: Fundamental research on hobbing with minimal quantity lubrication of cutting oil. *JSME International Journal* 2006, nr 49/2, s. 590–599.
6. Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T.: Dry machining and minimum quantity lubrication. *Annals of the CIRP* 2004, vol. 53/2, s. 511–537.
7. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B., Advancing cutting technology. *Annals of the CIRP* 2003, vol. 52/2, s. 11–20.
8. Matsuoka H., Tsuda Y., Suda S.: Yokota H. Fundamental research on hobbing with minimal quantity lubrication of cutting oil (effect of cutting speed). *JSME International Journal* 2006, series C, vol. 49, nr 4, s. 1140–1150.
9. Stachurski W.: Wpływ warunków podawania cieczy obróbkowej w strefę skrawania z minimalnym wydatkiem na zużycie frezu ślimakowego. *Praca doktorska* 2008, Łódź.
10. Stachurski W., Midera S., Zgórniak P.: Siła skrawania F_c podczas frezowania obwodniowego kół zębatych z zastosowaniem wybranych metod chłodzenia i smarowania. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 2010, nr 30/4, s. 37–46.
11. Kruszyński B., Stachurski W.: Ocena wybranych metod chłodzenia i smarowania dla frezowania obwodniowego kół zębatych. *Obróbka skrawaniem. Innowacje* 2008, s. 377–384.

Summary

In this paper, experimental results concerning influence of different strategies of cutting fluid application on surface layer condition of the gear's tooth flank generated by hobbing are described. Experimental tests were carried out for wet machining (WM), minimal quantity lubrication

(MQL) and cooled compressed air methods (SSP). 42CrMo4 steel gears after hardening and tempering, were manufactured by finishing hobbing. HS6-5-2 hobs was used without coatings. Surface roughness parameters were measured on the both sides of gear's tooth flank. Additionally, metallography, macro- and microscopy analysis together with hardness profiles were made.

The findings in the present investigation show that it is possible to replace conventional cutting fluid (oil) in wet machining without deterioration of surface layer conditions with applying environmentally and human friendly alternatives of cooling and lubricating methods.