

**Wojciech Stachurski**

**Stanisław Midera**

**Bogdan Kruszyński**

Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn

Politechnika Łódzka

ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, Polska

E-mail:

wojciech.stachurski@p.lodz.pl, stanislaw.midera@p.lodz.pl, bogdan.kruszynski@p.lodz.pl

## **Model matematyczny opisujący przebieg zużycia frezu ślimakowego dla różnych metod podawania cieczy obróbkowej**

**Słowa kluczowe:** frezowanie obwiedniowe, frez ślimakowy, zużycie, ciecz obróbkowa, MQL

**Streszczenie:** W artykule omówiono metodę wyznaczania zależności matematycznej do obliczania wielkości starcia  $VB_c$  najbardziej zużytego ostrza frezu ślimakowego. Zależność w postaci funkcji regresji wielorakiej wyznaczono metodą dołączania i odrzucania. Dane do obliczeń uzyskano przeprowadzając badania eksperymentalne frezowania stali węglowej C45 z udziałem cieczy obróbkowej podawanej w trybie obfitym oraz z minimalnym wydatkiem (MQL). W oparciu o wyznaczone równania dokonano oceny wpływu wybranych warunków obróbki na przebieg zużycia frezów ślimakowych. W końcowej części artykułu dokonano analizy uzyskanych zależności matematycznych oraz przeprowadzono ich weryfikację.

### **1. Wstęp**

Obróbka z udziałem minimalnego wydatku cieczy obróbkowej (ang. Minimum Quantity Lubrication - MQL) jest stale rozwijającą się dziedziną technologii. Niemniej jednak w zastosowaniach przemysłowych, zwłaszcza krajowych, jest ciągle nowością. Dotyczy to m.in. frezowania obwiedniowego, które jest najbardziej rozpowszechnioną metodą obróbki wiórowej kół zębatych. W metodzie tej naddatek obróbkowy jest usuwany przez wiele ostrzy skrawających rozmieszczonych na obwodzie frezu ślimakowego. Dodatkowo każde z ostrzy ma postać zębatego składającej się z co najmniej kilku zębów. W trakcie obróbki zarówno poszczególne ostrza skrawające, jak i pojedyncze zęby są nierównomiernie obciążone, co w konsekwencji powoduje nierównomierne zużycie krawędzi skrawających. Z ogólnej liczby zębów skrawających rozmieszczonych w poszczególnych ostrzach skrawających, tylko część przenosi podstawowe obciążenia związane ze skrawaniem, a najbardziej zużywają się zaledwie 2÷4 [3]. W praktyce, przekroczenie wartości kryterialnej zużycia już przez jeden ząb decyduje o stopniu frezu ślimakowego.

Dostępne publikacje i badania procesu frezowania obwiedniowego wskazują, że wpływ zastosowania metody MQL na efektywność tego procesu nie jest jeszcze zbadany [5] lub dotyczy ograniczonego zakresu. W badaniach opisanych w literaturze [16, 17] wykazano, że w pewnych warunkach stosowanie tej metody pozwala na uzyskanie wyników porównywalnych do konwencjonalnego podawania cieczy obróbkowej i znacznie lepszych niż dla obróbki „na sucho”. Jednak wyniki i wnioski płynące z tych badań mogą być obciążone błędem wynikającym z zastosowania przez ich autorów symulacji frezowania obwiedniowego przez narzędzie jednoostrzowe („fly tool”).

Podstawą do oceny efektywności różnych warunków podawania cieczy obróbkowej są przebiegi zużycia ostrzy w całym okresie trwałości. Zatem skuteczność smarowania czy chłodzenia w metodzie MQL można określić poprzez porównanie przebiegów zużycia z tymi, jakie występują podczas frezowania obwiedniowego z udziałem podawania cieczy obróbkowej w trybie obfitym.

Należy pamiętać o tym, że zużywające się narzędzie jest najsłabszym ogniwem układów obróbkowych. Tak więc, możliwość przewidywania zużycia w różnych warunkach eksploatacyjnych nabiera szczególnego znaczenia, zwłaszcza z uwagi na kosztowne i długotrwałe badania trwałościowe. Do przewidywania zużycia można między innymi wykorzystać odpowiednie procedury matematyczne, np.: metodę analizy trendu [8], sztuczne sieci neuronowe [9], modelowanie rozmyte oparte na strukturze TSK [10], czy model równania drugiego stopnia prognozujący trwałość ostrza metodą powierzchni odpowiedzi [13].

W różnych ośrodkach naukowo-badawczych podejmowano badania nad zjawiskiem zużycia zębów ostrzy frezów ślimakowych. W pracy [6] zaproponowano metodę określania zmienności obciążeń czynnej krawędzi skrawającej poprzez zastosowanie narzędzia wieloostrowego w postaci zębówki („flute hobbing”), rozwijając w ten sposób metodę wykorzystującą narzędzie jednoostrzowe [3]. W pracy [7] wskazano na fakt, że w przypadku narzędzi pokrytych powłoką TiN, zastosowanie metody MQL powoduje mniejsze ich zużycie w porównaniu do narzędzi bez powłok przeciwozużyciowych. Innym tematem podjętym w pracy [18] jest określenie wpływu stanu krawędzi skrawającej na intensywność zużycia podczas frezowania obwiedniowego bez udziału cieczy obróbkowej. W ramach prac badawczych zajmowano się również matematycznym opisem krzywej zużycia frezów ślimakowych [2-4]. Prace te opierają opis matematyczny głównie na analizie zmiany obciążeń czynnych krawędzi skrawających ostrzy w trakcie obróbki wynikających ze zmiennych przekrojów poprzecznych wiórów w różnych położeniach kątowych frezu.

W niniejszym artykule omówiono metodę wyznaczania zależności matematycznej do obliczeń wartości starcia  $VB$  na powierzchni przyłożenia najbardziej zużytego zęba. Dane do obliczeń uzyskano przeprowadzając badania eksperymentalne. Zależność w postaci funkcji regresji wielorakiej (wielokrotnej) wyznaczono za pomocą algorytmu metody dołączania i odrzucania. Następnie, w oparciu o równania w postaci wielomianów potęgowych, dokonano oceny wpływu wybranych warunków obróbki (prędkość skrawania, posuw, siła skrawania, metoda dostarczania cieczy obróbkowej) na przebiegi zużycia frezów ślimakowych.

## 2. Plan badań eksperymentalnych

Celem badań eksperymentalnych było zebranie danych dotyczących wartości zużycia narzędzi oraz sił skrawania podczas frezowania obwiedniowego kół zębatych:

- z udziałem cieczy obróbkowej w trybie obfitym (WM – Wet Machining),
- z minimalnym wydatkiem cieczy obróbkowej (MQL).

W trakcie badań zastosowano różne parametry skrawania (prędkość skrawania, posuw) oraz mierzono wartości  $VB_c$  (nie zaobserwowano istotnego zużycia na powierzchni natarcia) i odpowiadające im wartości siły skrawania  $F_c$ . Wybór tych danych spowodowany był ich znaczącym wpływem na proces zużywania narzędzia. Prowadzone już od dawna badania nad obwiedniowym frezowaniem uzębień, np. [11] dowodzą, że spośród wszystkich parametrów skrawania największy wpływ na zużycie narzędzia wykazuje prędkość skrawania  $v_c$ . Główną tego przyczyną jest fakt, że w największym stopniu zależy od niej temperatura skrawania. Potwierdzają to także inni badacze, np. [1]. Siła skrawania może stanowić natomiast pośredni wskaźnik zużycia. Zużycie frezu ślimakowego prowadzi bowiem, w trakcie procesu obróbkowego, do zmiany warunków skrawania i pogorszenia jakości przedmiotu obrabianego.

Konsekwencją tego jest m.in. zmiana wartości sił występujących w trakcie frezowania obwiedniowego.

## 2.1. Próby trwałościowe

Próby trwałościowe przeprowadzono frezując obwiedniowo koła zębate walcowe wykonane ze stali węglowej C45 ( $20\pm 2$  HRC). Otoczki kół zębatych posiadały średnicę  $d=72$  mm i szerokość  $b=15$  mm. Wykorzystując frezarkę obwiedniową ZFC-20 nacinano uzębienie o zarysie ewolwentowym, module  $m=3$  mm, kącie przyporu  $\alpha=20^\circ$  i kącie pochylenia zęba  $\beta=0^\circ$ . Użyto frezów ślimakowych NMFc-3/20°/B wykonanych ze stali szybko tnącej HS6-5-2 bez pokryć przeciwzużyciowych. Jako konwencjonalną ciecz obróbkową zastosowano olej maszynowy Ferokol EP dostarczany w strefę skrawania z wydatkiem 10 l/min. Do metody MQL zastosowano urządzenie MicroJet MKS-G100 firmy Link oraz ciecz obróbkową do obróbki wiórowej MICRO 3000 podawaną z wydatkiem około 15 ml/godz. Urządzenie MKS-G100 przeznaczone jest do zewnętrznego, jednokanałowego wytwarzania mgły olejowej.

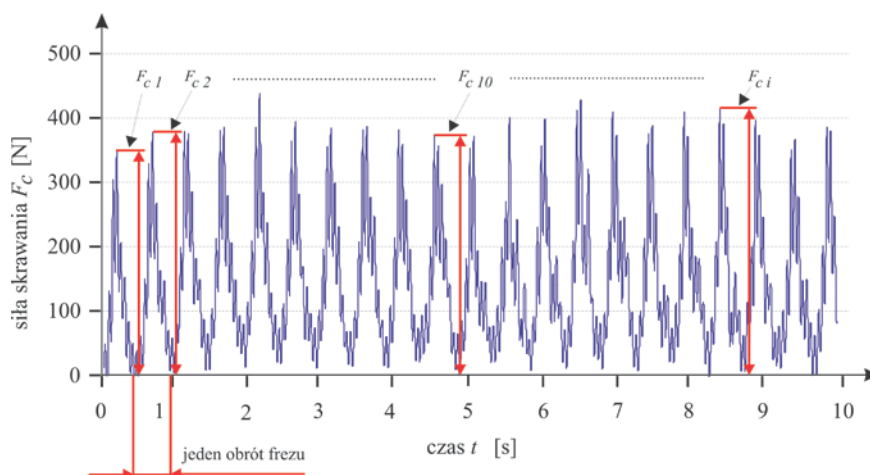
Badania były prowadzone dla różnych parametrów skrawania (tablica 1) przy stałej drodze frezowania  $L = 400$  mm.

Koło obrabiane mocowano na specjalnie zaprojektowanym trzpieniu przeznaczonym do zamontowania jednoskładowego siłomierza piezoelektrycznego KISTLER Typ 9321B, umożliwiającą pomiar siły skrawania  $F_c$ . Sygnał pomiarowy z siłomierza kierowany był do jednokanałowego wzmacniacza laboratoryjnego KISTLER Typ 5011B i przetwarzany na sygnał napięciowy. Następnie ze wzmacniacza sygnał przesyłano do karty pomiarowej KEITHLEY Typ KPCMCIA-12AI-C umieszczonej w komputerze. Oprogramowanie do rejestracji danych pomiarowych opracowano w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ [20].

Tabela 1. Parametry skrawania.

Parametry skrawania		
prędkość skrawania $v_c$ [m/min]	posuw $f$ [mm/obr]	głębokość skrawania $a_p$ [mm]
34,4	0,50 1,25	6,6
44,2		
54,0		
69,9		

Na rys. 1 przedstawiono przykładowy wykres przebiegu siły skrawania uzyskany w trakcie frezowania koła zębatego.



Rys. 1. Przykładowy wykres przebiegu siły skrawania w funkcji czasu.

Pomiaru dokonywano w czasie 10 sekund. W tym czasie frez ślimakowy wykonywał około 20 obrotów. Jako wartość siły skrawania  $F_c$  dla jednego pomiaru przyjęto średnią wartość maksymalnych sił skrawania  $F_{c,i}$  (gdzie „i” kolejny numer obrotu frezu) obserwowanych dla każdego obrotu frezu. Na skutek zmiennej liczby zębów pracujących jednocześnie w trakcie jednego obrotu narzędzia ulega zmianie sumaryczny przekrój warstwy skrawanej. Ma to wpływ na przebieg mierzonego sygnału, powodując utrzymywanie się krzywej powyżej wartości siły równej 0.

Pomiary zużycia wykonywano na mikroskopie warsztatowym. Zużycie ostrzy frezów ślimakowych występowało na powierzchniach przyłożenia i przybierało formę starcia w pobliżu krawędzi skrawającej. Największa jego wartość  $VB_{c-we}$  występowała w okolicach naroża po stronie wchodzącej w zazębienie obróbkowo-toczone. Tę wartość, dla najbardziej zużytego zęba, brano jako miarę zużycia przy analizie wyników badań.

## 2.2. Wyznaczenie zależności matematycznej

Do wyznaczenia zależności matematycznych służących do obliczania zużycia narzędzia wykorzystano oprogramowanie komputerowe SKZ opracowane w Instytucie Obrabiarek i TBM PŁ [14]. Program SKZ umożliwia wyznaczanie współczynników równania regresji wielorakiej. Procedurę analizy regresji opracowano na podstawie algorytmu metody „dołączania i odrzucania” zamieszczonej w pracy [15].

Pracę z programem rozpoczynano od wprowadzenia danych wejściowych ( $v_c, f, F_c$ ) z przygotowanego wcześniej pliku tekstowego oraz wybrania postaci funkcji regresji ( $Y1 = B0 + \text{Suma}(Bi * Xi)$ ). Ponieważ próby trwałościowe prowadzono dla jednej głębokości skrawania  $a_p$ , przy wprowadzaniu danych wejściowych pomijano ten parametr.

Wybór wartości krytycznych statystyki ( $F_{kr}$ ) dokonywany jest na poziomie istotności  $\alpha=0,4$  i po wyznaczeniu funkcji regresji zmieniany jest na wartość  $\alpha=0,1$ . Obliczenia rozpoczyna się od najprostszej funkcji regresji i kolejno dołączane są nowe człony. Gdy nowo dołączony człon obniża istotność członu już wprowadzonego, to ten nieistotny człon jest usuwany z funkcji regresji. Po wprowadzeniu wszystkich istotnych członów na ekranie monitora wyświetlany jest panel z podglądem wyników obliczeń.

Ostatecznie funkcja obiektu badań przyjęła poniższą postać:

$$VB_{c-we} = VB_0 \cdot v_c^{f_v} \cdot f^{f_f} F_c^{f_F} \text{ [mm]} \quad (1)$$

gdzie:  $v_c$  – [m/min];  $f$  – [mm/obr];  $F_c$  – [N].

Wyznaczone na podstawie obliczeń wartości współczynników oraz stałych tej funkcji zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyznaczone wartości stałych i współczynników przyjętej funkcji badań.

Stałe i wykładniki	
WM	MQL
$VB_0 = 9,98 \cdot 10^{-21}$	$VB_0 = 2,15 \cdot 10^{-12}$
$f_v = -2,194$	$f_v = -1,569$
$f_f = -0,633$	$f_f = -0,604$
$f_F = 8,962$	$f_F = 5,282$
Współczynnik korelacji wielorakiej R	
0,7502	0,7418

Po podstawieniu wartości liczbowych z tablicy 2 do funkcji obiektu badań (1) otrzymano:

– dla podawania cieczy obróbkowej w trybie obfitym (WM)

$$VB_{c-we} = 9,98 \cdot 10^{-21} \cdot v_c^{-2,194} \cdot f^{-0,633} \cdot F_c^{8,962} \quad [N] \quad (2)$$

– dla metody MQL

$$VB_{c-we} = 2,15 \cdot 10^{-12} \cdot v_c^{-1,569} \cdot f^{-0,604} \cdot F_c^{5,282} \quad [N]. \quad (3)$$

### 3. Analiza uzyskanych zależności

Istotności otrzymanych współczynników korelacji wielorakiej  $R$  określono za pomocą testu  $F$  Fishera-Snedecora, poprzez obliczenie wartości testowych współczynnika  $F$  i porównanie ich z wartościami krytycznymi  $F_{kr}$ . Ponieważ wartości  $F > F_{kr}$ , to współczynniki korelacji należy uznać za istotne, co oznacza zgodność (na poziomie istotności  $\alpha=0,1$ ) równania regresji z wynikami badań [12].

Analiza stałych i wykładników przedstawionych w tabeli 2 wskazuje, że wartości te różnią się w zależności od zastosowanej metody podawania cieczy obróbkowej. Dotyczy to zarówno stałych  $VB_0$  definiujących generalnie poziom wartości zużycia jak i wykładników potęgowych określających wpływ poszczególnych warunków obróbki na zmiany wartości zużycia.

Największe różnice zaobserwowano porównując wykładniki  $f_F$  i  $f_v$  dla metody MQL do analogicznych wykładników dla WM. Wartości wykładników  $f_v$  różnią się o blisko 40 %, a wykładniki  $f_F$  o 70 %. Wskazuje to, że dla podawania cieczy obróbkowej w trybie obfitym (WM) występuje dużo większa wrażliwość zużycia  $VB_{c-we}$  na zmiany prędkości skrawania  $v_c$  w porównaniu do MQL. Ta sama zależność dotyczy towarzyszącym zużyciu siłom skrawania  $F_c$ .

W przypadku współczynników  $f_f$  nie zauważono znaczących różnic w ich wartościach (odpowiednio -0,633 i -0,604). Wskazuje to na podobny wpływ posuwu  $f$  na wartość zużycia niezależnie od sposobu podawania cieczy obróbkowej. Warto zauważyć, że właściwość ta może być spowodowana tym, że posuw wzdłużny jest istotnym parametrem wywierającym wpływ na maksymalną wartość siły skrawania  $F_c$  [19] i jako taki jest już uwzględniony w współczynniku  $f_F$ .

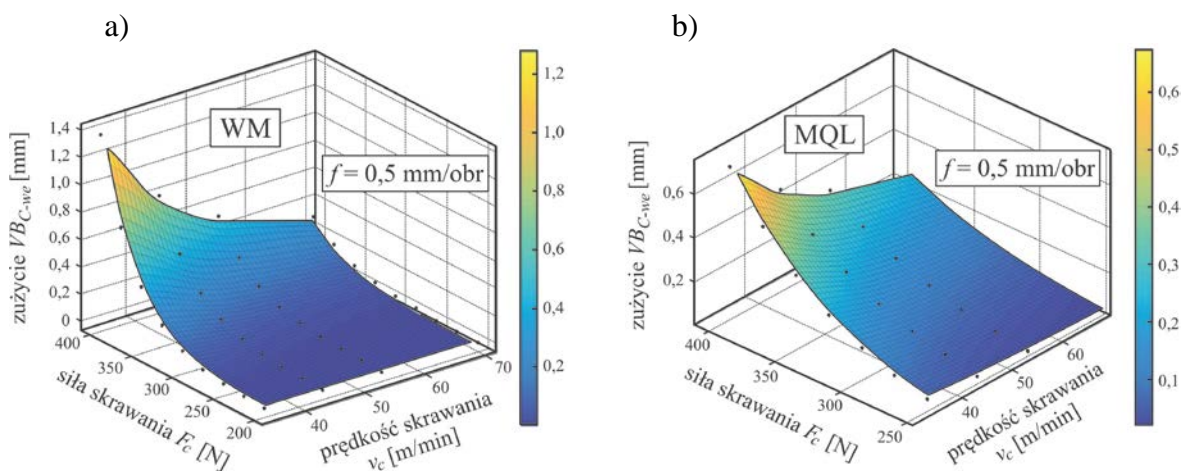
Ilustrację graficzną przedstawiającą wpływ parametrów ( $v_c$ ,  $F$ ) najbardziej zależnych od sposobu podawania cieczy obróbkowej na zużycie  $VB_{c-we}$  zamieszczono na rys. 2. Wykresy wykonano dla posuwu  $f=0,5$  mm/obr. Wykresy dla posuwu  $f=1,25$  mm/obr mają zbliżony charakter.

Powierzchnie na wykresie przedstawiają poziom wartości zużycia jakiego należy oczekiwać w zależności od zmieniających się warunków obróbki.

Jak wynika z rys. 2 oraz zależności (2) i (3) zastosowanie większej prędkości skrawania  $v_c$  powoduje, że w każdym przypadku osiągnięciu założonego zużycia kryterialnego  $VB_{c-kr}$  towarzyszą większe siły skrawania  $F_c$ . Spostrzeżenie to potwierdzają wartości zestawione w tabeli 3.

Należy zauważyć, że dla obfitego podawania cieczy obróbkowej (WM) wzrost prędkości skrawania (zwłaszcza do  $v_c=54$  m/min i  $v_c=69,9$  m/min) powoduje, że osiągnięciu założonego zużycia kryterialnego towarzyszą mniejsze siły  $F_c$  niż w przypadku metody MQL. Dla zużycia 0,3 mm różnica pomiędzy wartościami siły skrawania dla skrajnych prędkości skrawania wynosi 64 N, podczas gdy dla MQL jest ona o 25 % większa i wynosi 80 N. Analogicznie dla zużycia 0,5 mm różnica pomiędzy wartościami siły skrawania dla skrajnych prędkości skrawania wynosi 68 N, podczas gdy dla MQL jest ona o 29 % większa i wynosi 88 N. Potwierdza to wcześniejsze uwagi dotyczące większej wrażliwości zużycia

$VB_{c-we}$  na zmiany prędkości skrawania  $v_c$  i siły skrawania  $F_c$  dla frezowania na mokro (WM) w porównaniu do metody MQL.



Rys. 2. Zależność zużycia od prędkości skrawania i sił skrawania: a) WM, b) MQL;  $f=0,5$  mm/obr

Tabela 3. Wartości sił dla założonego zużycia kryterialnego.

$f$ [mm/obr]	$VB_{c-kr}$ [mm]	$v_c$ [m/min]	WM	MQL
			$F_c$ [N]	
0,5	0,3	34,4	338	340
		44,4	359	367
		54,0	377	389
		69,9	402	420
	0,5	34,4	357	375
		44,4	380	404
		54,0	399	429
		69,9	425	463

#### 4. Weryfikacja modelu matematycznego

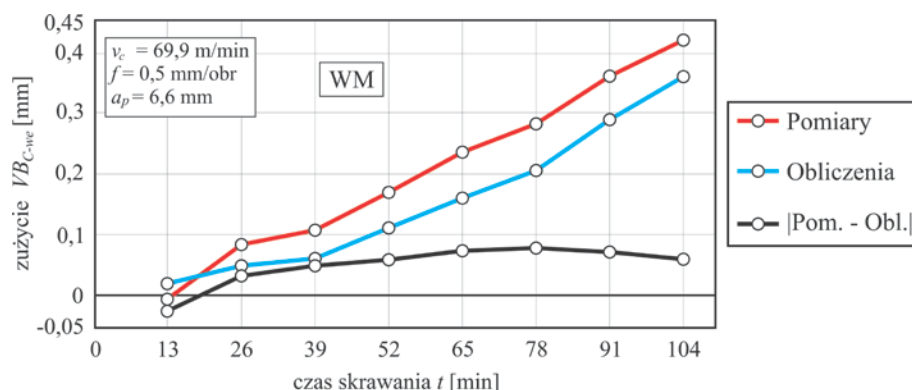
Pomimo zadowalających wartości współczynników korelacji wielorakiej dla opracowanego modelu matematycznego, dokonano również jego weryfikacji polegającej na porównaniu pomierzonych wartości zużycia  $VB_{c-we}$  z wartościami obliczonymi w oparciu o ten model.

Na rys. 3 przedstawiono porównanie obliczonych i pomierzonych wartości zużycia  $VB_{c-we}$  podczas frezowania obwodniowego kół zębatych z zastosowaniem podawania cieczy obróbkowej w trybie obfitym (rys. 3a) oraz z minimalnym wydatkiem (rys. 3b). Wykresy wykonano dla stałych parametrów skrawania:  $v_c = 69,9$  m/min,  $f = 0,5$  mm/obr,  $a_p = 6,6$  mm.

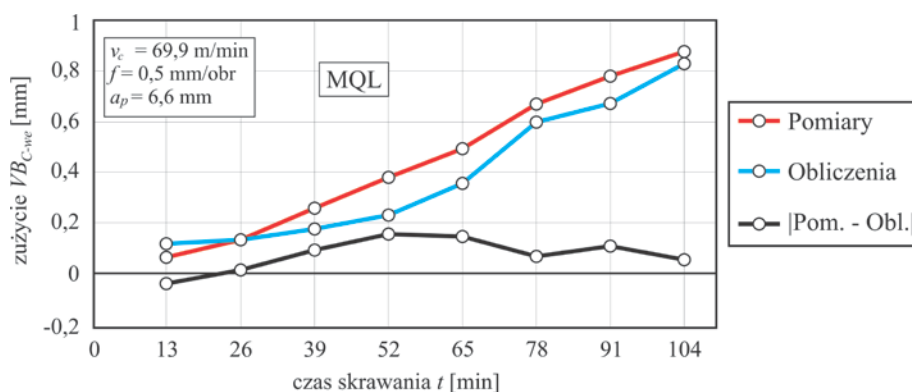
Różnice pomiędzy wielkościami zmierzonymi i obliczonymi wartościami zużycia wahają się w granicach 0,03–0,08 mm dla frezowania z podawaniem cieczy obróbkowej w trybie obfitym (WM) i w granicach 0,02–0,12 mm dla frezowania z wykorzystaniem metody MQL. Należy zauważyć, że dla obu metod różnice te zmniejszają się wraz z upływem czasu obróbki. W przypadku metody WM w końcowej fazie przebiegu krzywej zużycia różnica wynosi 14% i analogicznie dla metody MQL różnica spada do 6%. W obu przypadkach krzywe zużycia wykreślone na podstawie obliczeń przebiegają poniżej krzywych rzeczywistych.

Podobne właściwości krzywych zużycia dla wartości pomierzonych i obliczonych uzyskano dla innych prób. Potwierdza to prawidłowość opracowanego modelu.

a)



b)



Rys. 3. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów zużycia  $VB_{c-we}$ : a) WM, b) MQL;  
 $v_c=69,9$  m/min,  $f=0,5$  mm/obr,  $a_p=6,6$  mm.

## 5. Wnioski

Celem pracy było opracowanie zależności matematycznych umożliwiających prognozowanie wielkości starcia  $VB_c$  najbardziej zużytego ostrza frezu ślimakowego. Możliwość przewidywania zużycia narzędzia jest istotnym czynnikiem wpływającym na poprawność planowania procesu obróbki kół zębatych metodą frezowania obwiedniowego. Na podstawie analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowano model matematyczny w postaci funkcji regresji wielorakiej umożliwiający obliczanie wielkości starcia  $VB_{c-we}$  najbardziej zużytego zęba.
2. Metoda dołączania i odrzucania, wykorzystana do opracowania modelu, jest stosunkowo łatwa do zastosowania, a z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania, przy stałym pomiarze sił skrawania, możliwe jest nadzorowanie stanu zużycia frezu ślimakowego w trakcie obróbki.
3. Weryfikacja eksperymentalna uzyskanych zależności potwierdziła ich poprawność dla obu przypadków podawania cieczy obróbkowej (WM i MQL).
4. Opracowany model stwarza dobre podstawy do analizy procesu frezowania kół zębatych. Dzięki wyznaczonym zależnościom matematycznym można, przynajmniej w pewnym zakresie, uniknąć pracochłonnych badań eksperymentalnych.

Ponadto na podstawie przeprowadzonych prac i uzyskanych wyników należy zauważyć, że:

1. Analiza wykładników potęgowych określających wpływ poszczególnych warunków obróbki na poziom zużycia wykazała, że prędkość skrawania  $v_c$  i siła skrawania  $F_c$  są parametrami najbardziej czułymi na sposób podawania cieczy obróbkowej (WM, MQL).
2. W przypadku podawania cieczy w trybie obfitym (WM) występuje większa wrażliwość zużycia na zmiany prędkości skrawania  $v_c$  w porównaniu do metody MQL. Ta sama zależność dotyczy towarzyszącym zużyciu siłom skrawania  $F_c$ .
3. Wpływ posuwu  $f$  na wartość zużycia nie jest zależny od sposobu podawania cieczy obróbkowej.
4. Zastosowanie metody MQL podczas frezowania obwiedniowego jest możliwe tylko w postaci zewnętrznego doprowadzenia cieczy obróbkowej do strefy skrawania. Wydaje się, że doprowadzenie mgły olejowej bezpośrednio do strefy skrawania poprzez narzędzie poprawiłoby warunki obróbki i spowolniło proces jego zużycia. Powinno to być celem dalszych prac konstrukcyjnych i badań eksperymentalnych.

## Literatura

1. Azizpour Jalali M., Majd Mohammadi H. Wear mechanisms in high speed steel gear cutting tools. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 2010; 4: 739-741.
2. Belis T., Antoniadis A. Hobbing wear prediction model based on 3D chips determination. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi* 2010; LXI(LX) 2: 9-20.
3. Bouzakis K.-D., Kombogiannis S., Antoniadis A., Vidakis N. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2001; 124(1): 42-51.
4. Bouzakis K.-D., Lili E., Michalidis N., Friderikos O. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2008; 57: 676-696.
5. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2003; 52/2: 483-507.
6. Claudin C., Rech J. Development of a new rapid characterization method of hob's wear resistance in gear manufacturing-Application to the evaluation of various cutting edge preparations in high speed dry gear hobbing. *Journal of Materials Processing Technology* 2009; 209: 5152-5160.
7. Fratila D. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency. *Journal of Cleaner Production* 2009; 17: 839-845.
8. Gawlik J., Karbowski K. Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających-Nadzorowanie stanu narzędzi. Kraków: Politechnika Krakowska, Monografia 231, seria Mechanika, 1998.
9. Grzesik W. Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych. Warszawa: WNT, 2010.
10. Ren Q., Balazinski M., Baron L., Jemielniak K. TSK fuzzy modeling for tool wear condition in turning processes: An experimental study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2011; 24/2: 260-265.
11. Kiepuszewski B., Legutko S., Wieczorowski K. Skrawanie metali. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1980.
12. Korzyński M. Metodyka eksperymentu-Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. Warszawa: WNT, 2013.



13. Królczyk G., Gajek M., Legutko S. Predicting the tool life in the dry machining of duplex stainless steel. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15 (1): 62-65.
14. Kruszyński B., Midera S., Kaczmarek J. Forces in generating gear grinding-theoretical and experimental approach. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1998; 47: 287-290.
15. Mańczak K. *Technika planowania eksperymentu*. Warszawa: WNT, 1976.
16. Matsuoka H., Tsuda Y., Suda S., Yokota H. Fundamental research on hobbing with minimal quantity lubrication of cutting oil (effect of quantity of oil supply). *JSME International Journal* 2006; C 49/2: 590-599.
17. 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; C 49/4: 1140-1150.
18. Rech J. Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing. *Wear* 2006; 261: 505-512.
19. Stachurski W. Wpływ warunków podawania cieczy obróbkowej w strefę skrawania z minimalnym wydatkiem na zużycie frezu ślimakowego. Łódź: Praca doktorska, 2008.
20. Stachurski W. Application of minimal quantity lubrication in gear hobbing. *Mechanics and Mechanical Engineering* 2012; 16/2: 133-140.