

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	6
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	8
1. Wprowadzenie – cel, teza i zakres pracy	13
2. Frezy ślimakowe modułowe.....	17
2.1. Budowa modułowych frezów ślimakowych	17
2.2. Materiały narzędziowe stosowane na frezy ślimakowe.....	19
2.2.1. Stale szybko tnące (HS, P)	19
2.2.2. Węglik spiekany (HC).....	22
2.2.3. Powłoki ochronne stosowane na frezach ślimakowych.....	23
2.3. Podsumowanie.....	24
3. Regeneracja frezów ślimakowych modułowych	26
3.1. Zużycie frezów ślimakowych	26
3.1.1. Formy zużycia na zębach ostrzy frezu ślimakowego	26
3.1.2. Rozkład zużycia na poszczególnych zębach ostrzy frezu	27
3.1.3. Wskaźniki zużycia frezów ślimakowych	28
3.2. Ściernice do ostrzenia frezów ślimakowych.....	29
3.2.1. Ściernice elektrokorundowe	29
3.2.2. Ściernice CBN	31
3.3. Metoda zalewowa podawania PCS podczas ostrzenia frezów ślimakowych	32
3.4. Podsumowanie i wnioski	34
4. Metody ograniczania ilości płynu chłodząco-smarującego podczas szlifowania	35
4.1. Szlifowanie bez udziału płynu chłodząco-smarującego	35
4.2. Szlifowanie z minimalnym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego – metoda MQL.....	35
4.3. Chłodzenie kriogeniczne	38
4.4. Chłodzenie z użyciem schłodzonego sprężonego powietrza – metoda SSP	40
4.5. Hybrydowe metody podawania płynów chłodząco-smarujących.....	41
4.6. Podsumowanie i wnioski.....	43
5. MQL-SSP jako metoda podawania czynnika chłodzącego i smarującego podczas ostrzenia frezów ślimakowych	44
5.1. Wprowadzenie.....	44
5.2. MQL-SP/MQL-SSP – opis metody	46
5.3. Podsumowanie i wnioski	49
6. Analiza numeryczna przepływu czynnika chłodząco-smarującego w procesie szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych.....	51
6.1. Wprowadzenie	51
6.2. Podawanie wodnej emulsji olejowej – metoda WET	52
6.2.1. Warunki obróbki podczas szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych.....	52

6.2.2.	Numeryczna symulacja przepływu wodnej emulsji olejowej ...	54
6.2.3.	Wyniki symulacji numerycznych	60
6.2.4.	Model matematyczny opisujący wpływ kąta ε i wydatku nominalnego Q_{WET-IN} na wydatek skuteczny $Q_{WET-OUT}$	63
6.2.5.	Wnioski	67
6.3.	Podawanie schłodzonego sprężonego powietrza – metoda SSP.....	68
6.3.1.	Warunki obróbki podczas szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych.....	68
6.3.2.	Numeryczna symulacja przepływu schłodzonego sprężonego powietrza (SSP)	70
6.3.3.	Wyniki symulacji numerycznych	72
6.3.4.	Wnioski	78
6.4.	Podawanie mgły olejowej – metoda MQL	79
6.4.1.	Warunki obróbki podczas szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych.....	79
6.4.2.	Numeryczna symulacja przepływu mgły olejowej (MQL)	81
6.4.3.	Numeryczna symulacja przepływu powietrza w metodzie MQL.....	85
6.4.4.	Wyniki symulacji numerycznych	88
6.4.5.	Wnioski	91
6.5.	Podsumowanie i wnioski	92
7.	Eksperymentalna weryfikacja wyników symulacji numerycznych – pomiar zalepień na czynnej powierzchni ściernicy	94
7.1.	Wprowadzenie	94
7.2.	Cel i zakres badań.....	95
7.3.	Szlifowanie powierzchni natarcia frezów ślimakowych.....	95
7.4.	Pomiary zalepień ściernicy	98
7.5.	Wyniki badań.....	99
7.5.1.	Metoda zalewowa (WET).....	99
7.5.2.	Metoda MQL	100
7.5.3.	Metoda SSP	101
7.5.4.	Metoda MQL-SSP	102
7.6.	Podsumowanie i wnioski	104
8.	Ocena efektywności smarowania i chłodzenia strefy szlifowania metodą MQL-SSP – warsztatowe badania eksperymetalne.....	105
8.1.	Cel i zakres badań.....	105
8.2.	Szlifowanie ostrzy frezów ślimakowych	105
8.3.	Pomiary frezów ślimakowych po ostrzeniu.....	107
8.3.1.	Pomiary mikrotwardości	107
8.3.2.	Pomiary chropowatości	107
8.4.	Skaningowy mikroskop elektronowy (SEM)	108
8.5.	Wyniki badań i ich analiza	108
8.5.1.	Mikrotwardość.....	108
8.5.2.	Chropowatość powierzchni	112

8.6. Podsumowanie i wnioski	116
9. Badania eksploatacyjne frezów ślimakowych	118
9.1. Cel i zakres badań	118
9.2. Badanie przebiegu zużycia frezów ślimakowych	118
9.2.1. Stanowisko badawcze i metodyka badań	118
9.2.2. Pomiary mikrotwardości, chropowatości oraz obserwacje mikroskopowe SEM powierzchni frezów ślimakowych po ostrzeniu	121
9.3. Frezowanie obwiedniowe kół zębatych.....	122
9.3.1. Stanowisko badawcze i metodyka badań	122
9.3.2. Pomiary zużycia frezów ślimakowych	124
9.4. Wyniki badań powierzchni natarcia frezów ślimakowych po szlifowaniu	125
9.4.1. Wyniki pomiarów mikrotwardości.....	125
9.4.2. Wyniki pomiarów chropowatości.....	127
9.4.3. Obrazy SEM krawędzi skrawających.....	131
9.5. Wyniki badań zużycia frezów ślimakowych po frezowaniu	133
9.5.1. Liczba zębów frezu objętych mierzalnymi śladami zużycia ...	133
9.5.2. Przebieg zużycia najbardziej obciążonego zęba frezu.....	135
9.6. Podsumowanie i wnioski	136
10. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	138
LITERATURA	141
SUMMARY.....	153
CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA.....	154

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono nowy sposób podawania płynu chłodząco-smarującego (PCS) do strefy szlifowania podczas ostrzenia frezów ślimakowych, oznaczony akronimem MQL-SSP. Polega on na jednoczesnym wprowadzaniu do strefy obróbki minimalnej ilości czynnika smarującego metodą MQL oraz czynnika chłodzącego w postaci schłodzonego sprężonego powietrza (SSP). Zastosowanie tego alternatywnego do konwencjonalnego sposobu dostarczania płynu obróbkowego jest podyktowane względami ekonomicznymi, ekologicznymi oraz technicznymi. Dąży się bowiem, zgodnie z zasadami zrównoważonej produkcji, do ekonomicznie opłacalnego wytwarzania produktów przy jednoczesnym minimalizowaniu negatywnego oddziaływania na środowisko. Jednocześnie, osiągnięcie tych rezultatów nie może wpływać negatywnie na jakość wytwarzanych przedmiotów czy drastyczne zmniejszenie wydajności produkcji.

W związku z powyższym, w niniejszej monografii określono, na podstawie symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych, takie warunki podawania czynnika chłodzącego i smarującego metodą MQL-SSP podczas ostrzenia frezów ślimakowych, które umożliwiają przywrócenie, z możliwie dużą dokładnością, pierwotnych właściwości warstwy wierzchniej szlifowanych ostrzy. Rozważania prowadzono w trzech etapach.

Po pierwsze, przeanalizowano teoretyczno-doświadczalne prace dostępne w literaturze naukowej, a następnie zaprojektowano i wykonano symulacje numeryczne przepływu czynników chłodzących i smarujących w strefie szlifowania podczas ostrzenia frezów ślimakowych. Symulacjami objęto podawanie PCS: metodą zalewową (WET), metodą MQL oraz schłodzonego sprężonego powietrza (SSP). Na podstawie analizy uzyskanych wyników ustalono najbardziej efektywne położenie dyszy rozpylającej PCS względem czynnej powierzchni ściernicy (CPS) dla każdego z badanych przypadków. Następnie w celu weryfikacji wyników symulacji numerycznych, przeprowadzono pomiary zalepienia ściernicy i wyznaczono wskaźnik jej zalepienia.

Po drugie, na podstawie wyznaczonych warunków obróbki przeprowadzono badania eksperymentalne, polegające na ostrzeniu frezów ślimakowych i analizie stanu warstwy wierzchniej szlifowanych ostrzy. Analizie poddano takie parametry jak chropowatość powierzchni oraz mikrotwardość, a także oceniano stan krawędzi skrawającej na podstawie obrazów mikroskopowych SEM.

W końcowym, trzecim etapie badań, przeprowadzono badania eksploatacyjne, polegające na wytworzeniu kół zębatych przy użyciu ostrzonych uprzednio frezów ślimakowych z zastosowaniem badanych metod podawania PCS. Następnie dokonano oceny przydatności poszczególnych metod, porównując takie parametry jak liczba zębów frezu ślimakowego objętych mierzalnymi śladami zużycia oraz przebieg i wartość zużycia najbardziej obciążonego zęba frezu ślimakowego.

Zaprezentowane wyniki badań potwierdziły skuteczność zaproponowanego sposobu ostrzenia frezów ślimakowych w warunkach podawania płynów obróbkowych metodą MQL-SSP.

Przeprowadzone badania mogą stanowić podstawę do optymalizacji procesu szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych, stosowanego zarówno przy użyciu konwencjonalnych ostrzerek, jak i sterowanych numerycznie centrów ostrzarskich.

1. Wprowadzenie – cel, teza i zakres pracy

Głównym celem ostrzenia¹ stępionych narzędzi skrawających jest przywrócenie im właściwości skrawnych. W tym wypadku, właściwości skrawne ostrza skrawającego zależą przede wszystkim od prawidłowego kształtu geometrycznego oraz fizycznych i mechanicznych właściwości warstwy wierzchniej (WW). Jedną z metod obróbki, w której prawidłowo przeprowadzony proces ostrzenia wywiera decydujący wpływ na dokładność i jakość wytworzonych części jest frezowanie obwiedniowe kół zębatych frezami ślimakowymi modułowymi² [80]. Dzieje się tak, ponieważ w trakcie obróbki kolejne ostrza skrawające narażone są na nierównomierne i zmienne w czasie obciążenia siłami skrawania [13, 121, 125]. W strefie kontaktu wióra i przedmiotu obrabianego z ostrzami narzędzia występują znaczne obciążenia mechaniczne (naprężenia normalne i styczne) oraz cieplne [49, 106]. Biorąc to pod uwagę, proces regeneracji narzędzia powinien przywracać z możliwie dużą dokładnością pierwotną geometrię oraz właściwości warstwy wierzchniej szlifowanych ostrzy.

Podstawowymi materiałami stosowanymi na ostrza frezów ślimakowych są węgliki spiekane oraz stal szybko tnąca. Należy przy tym zauważyć, że pomimo stale zwiększającego się popytu na narzędzia skrawające z węglików spiekanych, narzędzia ze stali szybko tnącej są nadal powszechnie stosowane jako ich tańsza alternatywa [105]. Podczas ostrzenia stali szybko tnących, na skutek wysokich prędkości szlifowania wydzielają się duże ilości ciepła. W tych warunkach w warstwie wierzchniej ostrzonych narzędzi powstają bardzo duże naprężenia cieplne [63]. Naprężenia te prowadzą do powstania siatki pęknięć, która często jest niewidoczna przy obserwacji powierzchni narzędzia okiem nieuzbrojonym [80]. Na skutek wysokiej temperatury, w warstwie wierzchniej narzędzi mogą również wystąpić zmiany strukturalne obniżające znacznie właściwości skrawne ostrza [75]. Przy niewłaściwych warunkach ostrzenia stali szybko tnącej warstwa wierzchnia może się składać z warstwy wtórnie zahartowanej i leżącej pod nią strefy odpuszczonej lub tylko jednej wtórnie zahartowanej strefy o nieznacznej grubości [28, 89, 145, 147, 148].

Najbardziej efektywnym sposobem na obniżenie temperatury podczas szlifowania jest zastosowanie płynu chłodząco-smarującego (PCS) [118, 142]. Spośród wielu metod jego dostarczania w strefę szlifowania, najpopularniejsza jest metoda zalewowa [17] z zastosowaniem wodnych emulsji olejowych (WEO) [26, 119]. Metoda ta jest w dalszym ciągu uważana za najbardziej efektywny sposób na obniżenie wysokiej temperatury w strefie szlifowania poprzez zmniejszenie tarcia w wyniku smarowania strefy kontaktu ściernicy z materiałem

¹ W dalszej części monografii ostrzenie przywracające właściwości skrawne frezu ślimakowego będzie wymiennie stosowane z terminem regeneracja. Należy przy tym pamiętać, że w rzeczywistości pojęcie regeneracji jest znacznie szersze i może obejmować także ponowne nanoszenie powłok ochronnych, wymianę stępionych ostrzy na nowe itd. Innym zastępczym terminem dla ostrzenia będzie szlifowanie powierzchni natarcia.

² Dalsza część monografii dotyczy frezów ślimakowych modułowych lub krócej, frezów ślimakowych służących do wykonywania kół zębatych.

obrabanym oraz chłodzenie tej strefy. Inną jej zaletą jest wypłukiwanie wiórów ze strefy szlifowania oraz zwilżanie i czyszczenie ściernicy.

Zasadniczą niedogodnością zastosowania metody zalewowej są duże wydatki PCS oraz fakt, że tylko niewielka część jego objętości wnika w strefę styku ściernicy z materiałem obrabanym. Ocenia się [33, 58, 102, 142], że koszty stosowania płynów chłodząco-smarujących stanowią do 17% całkowitych kosztów wytwarzania i są wyraźnie wyższe od kosztów narzędziowych (2-4%). Dąży się zatem do całkowitej eliminacji lub zmniejszenia wydatku PCS z powodów ekonomicznych. Ponadto ograniczanie to podyktowane jest względami ekologicznymi i koniecznością dostosowania się do coraz bardziej rygorystycznych przepisów związanych z ochroną środowiska i BHP [18, 20, 66, 73, 108].

Obok wymienionych powyżej niedogodności środowiskowych i ekonomicznych związanych ze stosowaniem metody zalewowej i konwencjonalnych PCS, należy pamiętać o ograniczeniach technicznych w ich wykorzystaniu podczas szlifowania. W tym przypadku przykładem na nieefektywne oddziaływanie konwencjonalnej metody zalewowej jest zjawisko występowania tzw. poduszki powietrznej. Zjawisko to wywołane jest ruchem obrotowym ściernicy i objawia się w postaci wirującego strumienia powietrza otaczającego ściernicę wokół jej obwodu [31, 117]. Na skutek jego występowania następuje odchylenie i rozpylenie strumienia PCS, co w rezultacie utrudnia kontakt PCS z czynną powierzchnią ściernicy (CPS), a także ogranicza dostęp PCS do strefy szlifowania. Zatem, tylko niewielka część objętości dostarczonego płynu obróbkowego wnika w strefę styku ściernicy z przedmiotem obrabanym, zmniejszając w ten sposób efektywność chłodzenia strefy szlifowania.

Biorąc pod uwagę powyżej wymienione niedogodności środowiskowe i techniczne związane ze stosowaniem konwencjonalnych PCS podawanych metodą zalewową, dąży się do ich wyeliminowania poprzez zastosowanie alternatywnych metody smarowania i chłodzenia. W dostępnej literaturze brak jest danych na temat zastosowania metod eliminujących lub zmniejszających ilość podawanego PCS podczas ostrzenia frezów ślimakowych, co w połączeniu z jednoczesnym brakiem opracowań naukowych dotyczących zastosowania w tym przypadku metody zalewowej, skłoniło autora do podjęcia tego tematu.

W niniejszej monografii omówiono znaczące oraz zyskujące na znaczeniu metody alternatywne do metody zalewowej, będące przedmiotem badań w różnych ośrodkach naukowych. Następnie zaprezentowano nową autorską metodę MQL-SSP, polegającą na jednoczesnym podawaniu PCS z minimalnym wydatkiem metodą MQL oraz schłodzonego sprężonego powietrza (SSP) na czynną powierzchnię ściernicy (CPS) podczas szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych wykonanych ze stali szybkoobrotowej. Metoda ta podlega ochronie patentowej [123].

W związku z powyższym, celem niniejszej monografii jest określenie takich warunków podawania czynnika chłodzącego i smarującego metodą MQL-SSP podczas ostrzenia frezów ślimakowych, które umożliwią przywrócenie, z możliwie dużą dokładnością, pierwotnych właściwości warstwy wierzchniej szlifowanych ostrzy. Ponadto, celem monografii jest także określenie wpływu warunków

podawania wodnej emulsji olejowej (WEO) podczas ostrzenia frezów ślimakowych na stan warstwy wierzchniej szlifowanych ostrzy.

Cele pracy zostały sformułowane w taki sposób, aby możliwe było udowodnienie następującej tezy:

Istnieje możliwość określenia na drodze symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych, takich warunków podawania czynnika chłodzącego i smarującego metodą MQL-SSP podczas ostrzenia frezów ślimakowych, które umożliwią przywrócenie, z możliwie dużą dokładnością, pierwotnych właściwości warstwy wierzchniej szlifowanych ostrzy.

Rozdział 2 i 3 monografii poświęcono zebraniu i uporządkowaniu skąpych i rozproszonych w literaturze techniczno-naukowej informacji dotyczących m.in.:

- materiałów narzędziowych stosowanych do produkcji frezów ślimakowych,
- wytycznych doboru ściernic do szlifowania narzędzi wykonanych ze stali szybkotnącej,
- zaleceń doboru parametrów szlifowania podczas ostrzenia frezów ślimakowych,
- przyczyn i form zużycia eksploatacyjnego na zębach ostrzy frezów ślimakowych.

Rozdział 3 zakończono opisem metody zalewowej – konwencjonalnego sposobu dostarczania PCS podczas szlifowania powierzchni natarcia frezów ślimakowych. W rozdziale 4 przedstawiono metody ograniczania ilości PCS w procesie szlifowania. Z uwagi na wspomniany brak danych literaturowych dotyczących ostrzenia frezów ślimakowych, zagadnienie to omówiono na przykładzie innych odmian procesu szlifowania. W rozdziale 5 przedstawiono autorskie, oryginalne rozwiązanie sposobu podawania mediów chłodząco-smarujących z zastosowaniem metody określonej akronimem MQL-SSP.

W rozdziale 6 przedstawiono analizę numeryczną przepływu czynnika chłodząco-smarującego w trakcie ostrzenia frezów ślimakowych. Analizie poddano płyny wykorzystywane w trzech metodach dostarczania PCS, czyli:

- wodną emulsję olejową (WEO) w metodzie zalewowej (WET),
- schłodzone sprężone powietrze w metodzie SSP,
- mgłę olejową w metodzie MQL.

Dodatkowo wykonano także analizę numeryczną przepływu samego powietrza w metodzie MQL, bez podawania oleju. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyznaczono:

- wydatek skuteczny Q_{OUT} płynu obróbkowego, czyli ilość PCS dostającego się bezpośrednio w strefę kontaktu ściernicy z frezem ślimakowym,
- sprawność η_{ws} układu dostarczania płynu obróbkowego, czyli parametr określający stosunek ilości PCS dostarczanego dyszą do strefy szlifowania do ilości PCS dostającego się bezpośrednio w strefę kontaktu ściernicy z frezem ślimakowym,
- wartość stycznego naprężenia ścinającego τ_w , występującego na powierzchni stożkowej ściernicy w obszarze czynnej powierzchni ściernicy, w wyniku oddziaływania strumienia PCS,

- pole powierzchni P_τ na czynnej powierzchni ściernicy, na jakie oddziałują styczne naprężenia ścinające.

Powyższe parametry umożliwiły, dla każdej z metod dostarczania PCS, ustalenie takiego kąтового ustawienia dyszy względem CPS, które zapewnia możliwie najbardziej efektywne podawanie czynnika chłodząco-smarującego w strefę szlifowania, a także oczyszczenie czynnej powierzchni ściernicy.

W rozdziale 7 dokonano eksperymentalnej weryfikacji wyników symulacji numerycznych. Jako parametr weryfikujący przyjęto procentowy wskaźnik zalepień $Z\%$ uzyskany na podstawie pomiaru zalepień na czynnej powierzchni ściernicy. Przeprowadzona w ten sposób weryfikacja pozwoliła na ostateczne ustalenie ustawienia kąтового dyszy podającej PCS, dla każdej z metod jego dostarczania.

Rozdział 8 poświęcono ocenie efektywności chłodzenia i smarowania strefy szlifowania podczas ostrzenia frezów ślimakowych przy wykorzystaniu metody MQL-SSP. Ocenę tę przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów warstwy wierzchniej, mierząc chropowatość powierzchni natarcia oraz jej mikrotrwardość, a także analizując obrazy SEM krawędzi skrawającej. Wyniki otrzymane dla metody MQL-SSP porównywano z wynikami uzyskanymi dla metody zalewowej (WET), a także dla metody SSP i metody MQL stosowanych niezależnie od siebie.

W rozdziale 9 zaprezentowano wyniki badań eksploatacyjnych, w których zastosowano frezy ślimakowe szlifowane uprzednio z wykorzystaniem różnych metod podawania PCS. Ocenę przydatności poszczególnych metod oceniano na podstawie dwóch parametrów:

- liczby zębów frezu ślimakowego objętych mierzalnymi śladami zużycia,
- przebiegu i wartości zużycia najbardziej obciążonego zęba frezu ślimakowego.

Każdy z wymienionych rozdziałów jest zakończony podsumowaniem i wnioskami, zaś cała praca zakończona jest podsumowaniem wszystkich wyników i wynikających z nich wniosków.