



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji

PRACA DOKTORSKA

mgr inż. Joanna Lisowicz

**ANALIZA TOCZENIA WYKOŃCZENIOWEGO STOPU TYTANU
Ti-6Al-4V W WARUNKACH MQL
Z ZASTOSOWANIEM DODATKU MIKROMETRYCZNEGO
PROSZKU Z GRAFITU PŁATKOWEGO**

Promotor:

dr hab. inż. Witold Habrat, prof PRz

Promotor pomocniczy:

dr inż. Krzysztof Krupa

Rzeszów 2023

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	5
WSTĘP.....	7
1. ANALIZA LITERATURY	9
1.1. Tytan i jego stopy.....	9
1.1.1. Właściwości.....	9
1.1.2. Zastosowanie konstrukcyjne	13
1.1.3. Skrawalność.....	17
1.2. Chłodzenie i smarowanie w procesach obróbki skrawaniem.....	19
1.2.1. Systemy doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej do strefy obróbki	20
1.2.2. Rodzaje cieczy chłodząco-smarujących stosowanych w obróbce skrawaniem	21
1.2.3. Skład chemiczny cieczy chłodząco-smarujących do obróbki metali	23
1.2.4. Ciecze chłodząco-smarujące stosowane podczas skrawania w warunkach MQL...25	
1.3. Obróbka skrawaniem w warunkach MQL	26
1.3.1. Obróbka skrawaniem w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarujących z dodatkiem mikro- i nanocząstek.....	36
1.3.2. Obróbka stopów tytanu w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy z dodatkiem mikro- i nanocząstek	50
1.4. Wnioski z analizy literatury	53
2. CEL I ZAKRES PRACY	55
2.1. Cel pracy	55
2.2. Hipoteza naukowa pracy	55
2.3. Zakres pracy	56
3. WARUNKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH.....	57
3.1. Stanowisko badawcze i układy pomiarowe	57
3.2. Materiał obrabiany	59
3.3. Narzędzie użyte do badań	60
3.4. Oleje zastosowane na cieczy bazowe z dodatkami funkcyjnymi oraz charakterystyka mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego	61

4. BADANIA WSTĘPNE	65
4.1. Plan i warunki badań wstępnych	65
4.2. Wyniki i analiza badań wstępnych	67
5. BADANIA ZASADNICZE	75
5.1. Metodyka badań zasadniczych	75
5.1.1. Badania w zakresie zużycia ostrza.....	75
5.1.2. Badania w zakresie składowych całkowitej siły skrawania i topografii powierzchni	76
5.1.3. Badania w zakresie kształtowania wióra	80
5.2. Wyniki i analiza badań zasadniczych.....	81
5.2.1. Trwałość ostrza.....	81
5.2.2. Kształtowanie składowych siły skrawania	83
5.2.3. Kształtowanie chropowatości powierzchni	106
5.2.4. Kształtowanie wiórów	122
5.2.5. Mikrostruktura technologicznej warstwy wierzchniej.....	127
6. POSUMOWANIE I WNIOSKI.....	131
LITERATURA	135
Załącznik A Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania	149
Streszczenie	159
Abstract	161

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

a_p	głębokość skrawania [mm]
$C.V.$	współczynnik zmienności resztkowej [%]
f	posuw [mm/obr]
F	całkowita siła skrawania [N]
F_c	główna siła skrawania [N]
F_f	siła posuwowa [N]
F_p	siła odporowa [N]
p	ciśnienie powietrza w układzie zasilania MQL [MPa]
q	wydatek cieczy w metodzie MQL [ml/h]
R^2	współczynnik determinacji
R^2_{koryg}	skorygowany współczynnik determinacji
s	odchylenie standardowe składnika resztkowego
Sa	średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia [μm]
Sz	maksymalna wysokość nierówności powierzchni [μm]
u	stężenie masowe GMP w cieczy [%]
V	objętość usuniętego materiału [mm^3]
VB_c	szerokość pasma zużycia naroża (wskaźnik zużycia powierzchni przyłożenia) [mm]
\bar{y}	wartość średnia
3D	trójwymiarowy
GMP	mikrometryczny proszek z grafitu płatkowego (mikroproszek grafitowy)
GnP	nanopłatki grafitowe
hBN	heksagonalny (sześciokątny) azotek boru
HPC	chłodzenie wysokociśnieniowe
MQCL	chłodzenie i smarowanie minimalną ilością cieczy
MQL	smarowanie minimalną ilością cieczy
MWCNT	wielościennie nanorurki węglowe
ND	nanodiament
NMQL	smarowanie minimalną ilością cieczy z dodatkiem nanocząstek
RSM	metoda powierzchni odpowiedzi

SQL	smarowanie małą ilością ciecży
SWCNT	jednościenne nanorurki węglowe

WSTĘP

Tytan oraz jego stopy znalazły szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu (m.in. w przemyśle lotniczym, samochodowym, medycznym i morskim) dzięki doskonałym właściwościom: wysokiej wytrzymałości, także w wysokich temperaturach, doskonałej odporności na korozję oraz niskiemu modułowi sprężystości. Jednakże te same właściwości sprawiają, że stopy tytanu uważane są za materiały trudnoobrabialne. Główne problemy, jakie pojawiają się podczas obróbki skrawaniem to szybkie zużywanie narzędzi oraz wysoka temperatura skrawania.

Jednym ze sposobów poprawy efektywności obróbki materiałów konstrukcyjnych, w tym także stopów tytanu, jest chłodzenie i smarowanie strefy skrawania. Doprowadzenie cieczy do strefy obróbki pozwala na zmniejszenie współczynnika tarcia pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym i wiórem. Ciecz taka odbiera także znaczne ilości ciepła ze strefy skrawania, co skutkuje istotnym obniżaniem temperatury skrawania. Konwencjonalnie stosuje się chłodzenie zalewowe, w którym ciecz podawana jest w ilości kilkudziesięciu lub nawet kilkuset litrów na godzinę. Podejście takie prowadzi do potrzeby logistycznego zarządzania taką ilością cieczy, a mianowicie organizacji zbiorników do przechowywania oraz montażu odpowiednich systemów pozwalających na filtrację cieczy. Ponadto, poszczególne składniki cieczy mogą prowadzić do reakcji alergicznych u operatorów oraz różnego rodzaju chorób układu oddechowego i trawiennego. Nie mniej istotna jest także kwestia utylizacji cieczy po zakończonej eksploatacji.

Podejściem uwzględniającym zarówno aspekt zdrowotny pracowników, jak i kwestie środowiskowe jest obróbka w warunkach minimalnego smarowania (MQL). W metodzie tej niewielkie ilości cieczy smarującej podawane są w strumieniu powietrza do strefy obróbki. Ze względu na niewielkie ilości cieczy, nie jest ona w stanie tak efektywnie odprowadzać ciepła ze strefy skrawania, dlatego też główne znaczenie ma tutaj aspekt smarowania. Naukowcy pracują jednak także nad możliwością polepszenia zdolności odbierania ciepła przez ciecze stosowane w warunkach MQL i w tym celu testowane są ciecze z dodatkiem różnego rodzaju mikro- i nanocząstek, których współczynnik przewodności cieplnej jest znacznie większy niż cieczy bazowych.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono szereg badań doświadczalnych mających na celu analizę wpływu zawartości i stężenia masowego mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego na obrabialność stopu tytanu Ti-6Al-4V. Efektem niniejszej pracy są modele przedstawiające zależności pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem i stężeniem masowym mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej, a składowymi siły skrawania oraz podstawowymi parametrami chropowatości powierzchni.

Praca składa się z sześciu głównych rozdziałów. W pierwszym rozdziale przedstawiono analizę aktualnego stanu wiedzy dotyczącą z jednej strony tytanu i stopów tytanu – ich właściwości,

zastosowania i skrawalności, a z drugiej chłodzenia i smarowania podczas obróbki skrawaniem – sposobów doprowadzenia chłodziwa, rodzajów cieczy chłodząco-smarujących i ich składów. Ponadto przedstawiono zestawienie prac badawczych dotyczących obróbki stopów metali w warunkach MQL z czystymi cieczami bazowymi oraz z cieczami z mikro- i nanododatkami. W szczególności sposób rozpatrywano także publikacje dotyczące obróbki stopów tytanu w warunkach MQL z cieczami z dodatkiem mikro- i nanocząstek. W rozdziale drugim sformułowano cel pracy, hipotezę badawczą oraz zakres pracy niezbędny do osiągnięcia założonego celu oraz udowodnienia przedstawionej hipotezy. Rozdział trzeci przedstawia warunki badań doświadczalnych – stanowisko badawcze, urządzenia pomiarowe oraz materiał, narzędzia i ciecze użyte do badań. W rozdziale czwartym przedstawiono plan i warunki badań wstępnych, a także wyniki i ich analizę. Badania wstępne obejmowały określenie sposobu doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej w pobliże strefy skrawania podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL, określenie wydatku cieczy oraz dobór cieczy bazowych. Rozdział piąty przedstawia wyniki badań zasadniczych. Przedstawiono analizę dotyczącą wpływu masowego stężenia mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej na trwałość narzędzia oraz sposób zwijania i łamania wiórów. Ponadto opracowano modele przedstawiające związek pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem i stężeniem masowym mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej a składowymi siłami skrawania oraz podstawowymi parametrami chropowatości powierzchni. Przedstawiono także analizę statystyczną i graficzną uzyskanych wyników. Przeprowadzono także kontrolę mikrostruktury warstwy wierzchniej po obróbce. Rozdział szósty przedstawia podsumowanie otrzymanych wyników oraz wnioski.

1. ANALIZA LITERATURY

1.1. Tytan i jego stopy

1.1.1. Właściwości

Dzięki znakomitym właściwościom, takim jak: wysoka wytrzymałość, nawet w wysokiej temperaturze, mała gęstość i doskonała odporność na korozję, stopy tytanu znajdują bardzo wiele zastosowań w wielu gałęziach gospodarki. Pod względem zawartości w skorupie ziemskiej, tytan zajmuje dziewiąte miejsce wśród wszystkich pierwiastków i czwarte wśród metali konstrukcyjnych, większa jest jedynie zawartość aluminium, żelaza i magnezu [1–3].

Tytan klasyfikuje się jako nieżelazny, lekki metal. Gęstość tytanu wynosi 4,507 g/cm³. Podstawowe właściwości mechaniczne i fizyczne tytanu zostały zaprezentowane w tabeli 1.1 [1,4].

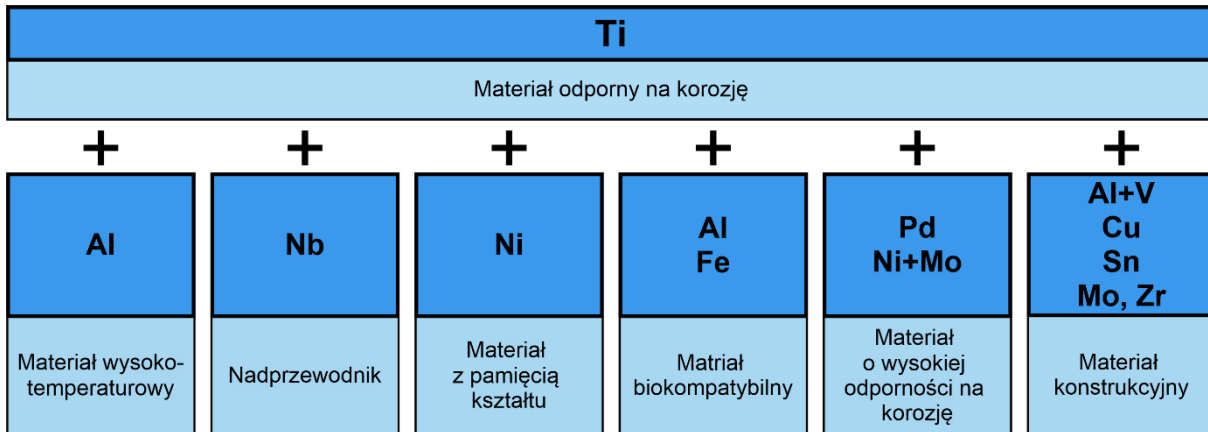
Tabela 1.1 Podstawowe właściwości mechaniczne i fizyczne czystego tytanu (na podstawie [4,5]).

Właściwości		Wartość
Fizyczne	Gęstość ⁽¹⁾ ρ , g/cm ³	4,507
	Przewodność cieplna λ , W/(m·K)	18,9
	Ciepło właściwe C_w , J/(g·K)	0,54
	Temperatura topnienia T_t , °C	1668
Mechaniczne	Moduł Younga ⁽¹⁾ E , GPa	112
	Wytrzymałość na rozciąganie ⁽¹⁾ R_m , MPa	240
	Granica plastyczności ⁽¹⁾ R_e , MPa	140
	Twardość HRB	70
	Współczynnik Poissona ν	0,34
⁽¹⁾ w temperaturze pokojowej		

Tytan występuje w dwóch odmianach alotropowych: Ti(α) (odmiana niskotemperaturowa) oraz Ti(β) (odmiana wysokotemperaturowa). Temperatura przemiany polimorficznej dla czystego metalu wynosi 882,5°C.

Polimorfizm tytanu, dobra rozpuszczalność w nim wielu pierwiastków oraz tworzenie związków chemicznych o zmiennej rozpuszczalności pozwala na stosowanie tytanu jako składnika podstawowego do wielu stopów o różnorodnej strukturze i właściwościach (rys. 1.1). Pierwiastki dodawane do stopów tytanu to na przykład: aluminium, wanad, cynk, molibden, cyrkon. Można je podzielić na trzy podstawowe grupy [6–8]:

- neutralne (Sn, Zr, Hf, Ge, Th) – nieznacznie wpływają na temperaturę przemiany $\alpha \leftrightarrow \beta$,
- pierwiastki stabilizujące fazę α (Al, Ga, Ge and O, N, C) – wpływają na podwyższenie temperatury przemiany $\alpha \leftrightarrow \beta$,
- pierwiastki stabilizujące fazę β – pierwiastki izomorficzne (V, Mo, Nb, Ta), eutektoidalne (Cu, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Si) oraz pseudoizomorficzne (Ru, Rh, Re, Ir) – wpływają na obniżenie temperatury przemiany alotropowej $\alpha \leftrightarrow \beta$.



Rys. 1.1 Wpływ dodatków stopowych na właściwości stopów tytanu (na podstawie [7]).

Konwencjonalne stopy tytanu charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem właściwości mechanicznych, w zależności od składu fazowego, obróbki cieplnej i składu chemicznego (tabela 1.2). Można je sklasyfikować następująco [1,4,5,8]:

- stopy α – mikrostruktura po odkształceniu plastycznym i wyżarzaniu składa się z ponad 95% ziaren roztworu stałego α . Stopy te są stosowane głównie w przemyśle chemicznym i inżynierii procesowej, ze względu na wysoką odporność na korozję i odkształcalność, (tutaj wysoka (specyficzna) wytrzymałość ma mniejsze znaczenie). Charakteryzują się one dobrymi właściwościami odlewniczymi, spawalnością, odpornością na pełzanie, odpornością na kruche pękanie w temperaturze pokojowej i stabilnością termiczną.
- stopy pseudo- α – obok mikrostruktury fazowej α występuje również niewielka ilość fazy β . Właściwości stopów pseudo- α są zbliżone do właściwości stopów α . Charakteryzują się one dobrą spawalnością, plastycznością i stabilnością termiczną. Dodatek pierwiastków stabilizujących fazę β powoduje wzrost wytrzymałości i odporności cieplnej.
- stopy $\alpha+\beta$ – mikrostruktura składa się z 5 do 50% fazy β . Ponad 50% wszystkich używanych obecnie stopów tytanu posiada taką mikrostrukturę. Charakteryzują się one większą plastycznością (po wyżarzaniu normalizującym) i lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi (po obróbce cieplnej). Otrzymywane są przez dodanie pierwiastków stabilizujących fazę α i β . Właściwości wytrzymałościowe tych stopów zależą od względnej objętości i morfologii poszczególnych składników fazowych mikrostruktury.

- stopy β i pseudo- β – mają wysoką zawartość (ponad 20%) pierwiastków stabilizujących fazę β . W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat znaczenie metastabilnych stopów β systematycznie wzrasta. Stopy te mogą być hartowane do ekstremalnie wysokich wartości wytrzymałości, przekraczających 1400 MPa. Złożona mikrostruktura pozwala konstruktorowi na optymalizację zarówno pod kątem wysokiej wytrzymałości, jak i wysokiej ciągliwości.

Tabela 1.2 Gęstość i właściwości mechaniczne wybranych konwencjonalnych stopów tytanu po wyżarzaniu, w temperaturze pokojowej (na podstawie [4]).

Grupa stopów	Oznaczenia przykładowych stopów	Gęstość ρ , g/cm ³	Moduł Younga E , GPa	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa
stopy α oraz pseudo- α	Ti-0,2Pd (Grade 7)	4,51	103	345–483	276–352
	Ti-3Al-2,5V	4,50	91–107	621–740	483–607
	Ti-5Al-2,5Sn	4,48	110	828–972	793–897
	Ti-8Al-1Mo-1V	4,36	124	1020	931
stopy $\alpha+\beta$	Ti-6Al-4V	4,42	106–114	987–1205	828–1075
	Ti-6Al-6V-2Sn-0,5Fe-0,5Cu	4,53	115	1035–1150	950–1021
	Ti-4Al-4Mo-4Sn-0,5Si	4,60	113–130	1205–1300	1065–1140
stopy β oraz pseudo- β	Ti-11V-3Al-2Fe	4,65	112	1040–1310	970–1228
	Ti-5Al-4Mo-2Sn-2Zr-4Cr	4,65	109	1125	1055–1193
	Ti-8V-6Cr-4Mo-4Zr-3,5Al	4,81	103	793	759

Maksymalna temperatura pracy konwencjonalnych stopów tytanu, wynosząca około 600°C, ogranicza ich zastosowania w wysokich temperaturach. Dlatego też przedmiotem większego zainteresowania stały się stopy tytanu oparte na fazach międzymetalicznych [4].

Aluminidki tytanu (stopy na podstawie fazy międzymetalicznej TiAl) mają doskonały potencjał, aby stać się jednym z najważniejszych materiałów stosowanych w technice lotniczej ze względu na ich małą gęstość (3,9–4,2 g/cm³, w zależności od składu i struktury), wysoką temperaturę topnienia, dobrą wytrzymałość i utrzymanie modułu sprężystości w podwyższonej temperaturze, wysoką odporność na utlenianie i absorpcję wodoru oraz doskonałe właściwości pełzania. Główną przeszkodą w ich zastosowaniu jest słaba ciągliwość w niskich i średnich temperaturach, co skutkuje zmniejszeniem odporności na kruche pęknięcie i wytrzymałości zmęczeniowej [9].

Aluminidki tytanu występują w trzech różnych fazach, a mianowicie $Ti_3Al(\alpha_2)$, $TiAl(\gamma)$ i $TiAl_3$. Spośród tych faz tylko fazy $Ti_3Al(\alpha_2)$ i $TiAl(\gamma)$ okazały się mieć jakiegokolwiek znaczenie inżynierskie [10,11]. Faza $Ti_3Al(\alpha_2)$ zawiera od 22% do 39% (% at.) aluminium, podczas gdy faza $TiAl(\gamma)$ zawiera od 48,5% do 66% (% at.) aluminium. Stopy posiadające mikrostrukturę będącą mieszaniną dwóch faz $Ti_3Al(\alpha_2)$ i $TiAl(\gamma)$ mają zawartość aluminium od 37% do 49%. Faza $Ti_3Al(\alpha_2)$ wykazuje dobrą wytrzymałość w wysokiej temperaturze, ale ma bardzo małą plastyczność. Ponadto, ma również wysoki wskaźnik absorpcji tlenu i wodoru, co z kolei prowadzi do kruchości w wysokiej temperaturze. Z drugiej strony, faza $TiAl(\gamma)$ wykazuje doskonałą odporność na utlenianie i ma bardzo niską absorpcję wodoru, ale jej ciągliwość w temperaturze pokojowej jest bliska zeru. Prowadzono badania nad udoskonaleniem mikrostruktury tych faz. Jednak żaden z problemów związanych z tymi fazami nie został całkowicie rozwiązany. Stąd też, te dwie fazy same w sobie nie mają większego znaczenia inżynierskiego. Ale mieszanina dwóch faz, która istnieje pomiędzy 40% a 48% stężenia masowego aluminium okazała się bardzo przydatna do wielu zastosowań konstrukcyjnych. Stopy dwufazowe $\alpha_2+\gamma$ wykazują plastyczność sięgającą 6%. Dodatkowo, stopy dwufazowe wykazują również wytrzymałość równoważną wytrzymałości nadstopów, zarówno w temperaturze pokojowej jak i w wysokich temperaturach. Wykazano również, że odporność na pełzanie i utlenianie jest akceptowalna dla temperatur do 850°C [11].

Tabela 1.3 przedstawia porównanie właściwości fizycznych czystego tytanu, konwencjonalnych stopów tytanu oraz stopów tytanu na osnowie faz międzymetalicznych.

Tabela 1.3 Porównanie właściwości fizycznych czystego tytanu, konwencjonalnych stopów tytanu i stopów tytanu na osnowie faz międzymetalicznych (na podstawie [4,8]).

Właściwości	Czysty tytan Ti	Stopy tytanu na osnowie faz międzymetalicznych	
		Ti_3Al	$TiAl(\gamma)$
Gęstość ρ , g/cm ³	4,6	4,1–4,7	3,7–4,0
Moduł Younga E , GPa	103	110–145	160–180
Granica plastyczności R_e , MPa	170–480	700–1000	400–650
Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	240–560	800–1140	450–800
Wydłużenie A , %	15–24	2–10	1–4

1.1.2. Zastosowanie konstrukcyjne

Szerokie zastosowanie stopów tytanu w przemyśle wynika z ich wysokiej wytrzymałości nawet w wysokiej temperaturze oraz odporności na korozję. Stopy tytanu znajdują zastosowanie w następujących gałęziach przemysłu:

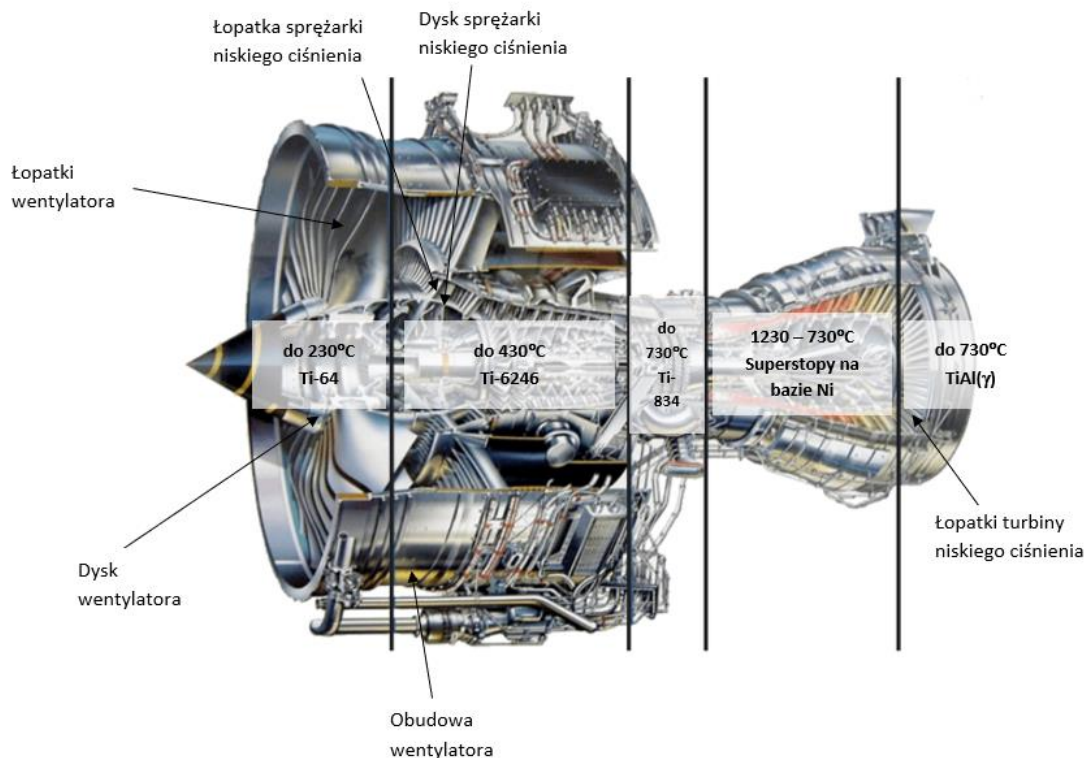
- lotnictwo,
- medycyna,
- przemysł samochodowy,
- przemysł morski,
- architektura i budownictwo,
- przemysł chemiczny,
- przemysł energetyczny,
- przemysł optyczny.

Głównym obszarem zastosowania stopów tytanu jest lotnictwo, szczególnie na części lotniczych silników turbowentylatorowych oraz elementy płatowców, gdzie stanowią one odpowiednio 36% i 7% [12,13].

Tabela 1.4 przedstawia wybrane systemy i części lotnicze wraz z zastosowanym gatunkiem tytanu. Rys. 1.2 przedstawia przykłady zastosowania stopów tytanu w silniku V2500 montowanym w Airbus A320.

Tabela 1.4 Przykłady zastosowania stopów tytanu w technice lotniczej (na podstawie [13]).

	Systemy i części	Materiały
Struktury płatowca	Rury hydrauliczne	Ti-3Al-2,5V
	Podłogi	CP-Ti
	Podwozie	Ti-10V-2Fe-3Al; Ti-6-6-2
	Ramy okien	Ti-6Al-4V
	Sprężyny	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
Silniki turbinowe	Dyski i łopatki wentylatora	Ti-6Al-4V; Ti-6-2-4-2S
	Dysk kompresora	Ti-6Al-4V; Ti-6-2-4-2S
	Łopatki sprężarki	Ti-6Al-4V; Ti-6-2-4-2S
	Stojany sprężarki	Ti-35V-15Cr
	Zespół dysz	TIMETAL21S



Rys. 1.2 Przykłady zastosowania stopów tytanu w budowie silników lotniczych (na podstawie [14,15]).

Główną przyczyną stosowania tytanu w przemyśle lotniczym jest zmniejszenie masy (głównie jako zamiennik stali, ale także jako zamiennik stopów aluminium) [13]. W porównaniu z systemami transportu lądowego, znacznie wyższe jednostkowe zużycie energii pozwala projektantom tolerować o rząd wielkości wyższe koszty dla oszczędności masy. Podczas gdy akceptowalny koszt jednego zaoszczędzonego kilograma masy w przemyśle samochodowym wynosi w przybliżeniu do 10 Euro, przemysł lotniczy jest skłonny zapłacić do około 1 000 Euro, a w przypadku zastosowań kosmicznych, ponad 10 000 Euro może często być nadal ekonomicznie atrakcyjne [12].

Inne argumenty przemawiające za zastosowaniem stopów tytanu w przemyśle lotniczym są następujące [13,16]:

- Ograniczenie objętości materiału (zastępowanie stopów Al) – doskonałym przykładem zastosowania tytanu z powodu ograniczenia objętości materiału są belki podwozia w Boeing 747 i 757.
- Temperatura pracy (zastępowanie stopów Al, Ni, stopów stali) – maksymalna temperatura pracy stopów aluminium wynosi 130 °C, w wyższych temperaturach aluminium może być zastąpione przez stopy tytanu; przykłady takich zastosowań stopów tytanu to: kadłub samolotu, pomocnicza jednostka mocy (APU) oraz systemy przeciwbloedzeniowe dla struktur płatowca. Stal i stopy niklu są oczywistą alternatywą, ale mają gęstość około 1,7 razy większą niż tytan.
- Odporność na korozję (zastępowanie stopów Al i stali niskostopowej) jest również ważnym elementem wykorzystania stopów tytanu w przemyśle lotniczym. Odporność tytanu na korozję

eliminuje konieczność stosowania powłok ochronnych lub farb. Znaczna część konstrukcji wsporczej podłogi pod kuchniami i toaletami znajduje się w bardzo korozyjnym środowisku, w związku z tym stopy tytanu są stosowane w tych obszarach.

- Kompatybilność kompozytowa tytanu - tytan jest kompatybilny galwanicznie z włóknami węglowymi w kompozytach, podczas gdy aluminium i węgiel generują znaczny potencjał galwaniczny. Tytan znalazł również zastosowanie w strukturach kompozytowych ze względu na dobre dopasowanie współczynników rozszerzalności cieplnej.

Ze względu na wysoką biogodność, a w ślad za nią określoną wytrzymałość i odporność na korozję, stopy tytanu są obecnie najbardziej atrakcyjnymi materiałami metalicznymi do zastosowań biomedycznych. W medycynie są one wykorzystywane do produkcji implantów zastępujących uszkodzone tkanki twarde. Przykładem mogą być sztuczne stawy kolanowe i biodrowe, płytki kostne, śruby do unieruchamiania złamań, protezy zastawek serca, rozruszniki serca i sztuczne serca. Są one również stosowane w stomatologii jako korzenie zębowe [17,18].

Ti-6Al-4V od dawna jest wykorzystywany do zastosowań biomedycznych. Jednakże, w przypadku zastosowań tego stopu w implantach stałych istnieje możliwość wystąpienia efektu toksycznego wynikającego z uwolnionego wanadu i aluminium. Z tego powodu do zastosowań implantacyjnych wprowadzono stopy wolne od wanadu i aluminium [17]. Niektóre właściwości mechaniczne wybranych stopów tytanu stosowanych jako biomateriały przedstawiono w tabeli 1.5.

Dobre właściwości tytanu dają także wiele potencjalnych zastosowań w pojazdach samochodowych – zarówno w układzie napędowym, jak i w podwoziu [19]. Rys. 1.3 przedstawia przykłady zastosowań tytanu w produkcji samochodów i motocykli.

W ostatnich latach wiele uwagi poświęca się redukcji masy podsystemów samochodowych ze względu na zmniejszenie zużycia paliwa. Ogólnie przyjmuje się, że zmniejszenie masy o 10% przekłada się na poprawę zużycia paliwa o około 6%, w zależności od wielkości pojazdu [20].

Największą przeszkodą w powszechnym stosowaniu tytanu jest jego koszt, który jest znacznie wyższy niż konkurencyjnych materiałów, takich jak stal i aluminium. Mimo to, tytan jest stosowany w wielu niszowych i wysokiej klasy komponentach samochodowych. Stopy tytanu są również stosowane w samochodach wyścigowych, gdzie koszty nie są problemem [21].

Tabela 1.5 Wybrane stopy tytanu stosowane w medycynie (na podstawie [22]).

Grupa stopów	Oznaczenia przykładowych stopów	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Moduł Younga E , GPa
stopy α	Ti grade 1	240	170	102,7
	Ti grade 2	345	275	102,7
	Ti grade 3	450	380	103,4
	Ti grade 4	550	485	104,1
stopy $\alpha+\beta$	Ti-6Al-4V	895–930	825–869	110–114
	Ti-6Al-4V ELI	860–965	795–875	101–110
	Ti-6Al-7Nb	900–1050	880–950	114
	Ti-5Al-2,5Fe	1020	895	112
stopy β	Ti-13Nb-13Zr	973–1037	836–908	79–84
	Ti-12Mo-6Zr-2Fe	1060–1100	1000–1060	74–85
	Ti-15Mo	874	544	78
	Ti-15Mo-5Zr-3Al	852–1100	838–1060	80
	Ti-15Mo-2,8Nb-0,2Si	979–999	945–987	80



Rys. 1.3 Przykłady części samochodowych wykonanych ze stopów tytanu.

Wysoka odporność na korozję, szeroki zakres wytrzymałości i właściwości użytkowych oraz odporność na niską temperaturę do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ pozwoliło na szerokie zastosowanie stopów tytanu w przemyśle stoczniowym. Przykłady zastosowania tytanu w konstrukcjach morskich są następujące [23,24]:

- głębinowe przewody pionowe i rurociągi zasilające,
- pompy, filtry i systemy wody morskiej, pitnej i wiertniczej,
- urządzenia do wymiany ciepła,
- konstrukcje kadłubowe urządzeń głębokowodnych,
- zbiorniki wysokociśnieniowe.

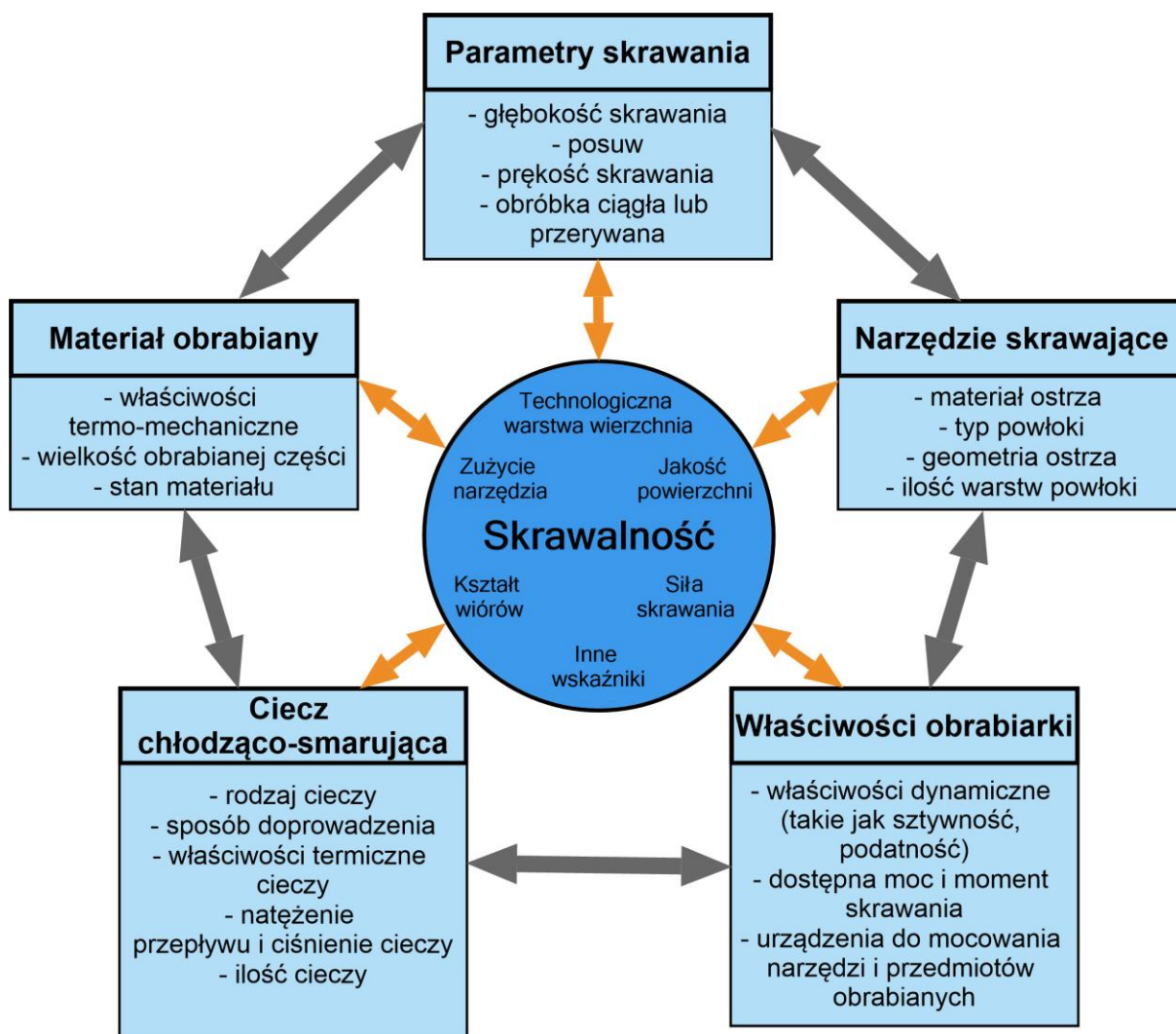
Tytan i jego stopy są również stosowane w architekturze jako zewnętrzne i wewnętrzne materiały okładzinowe do pokryć dachowych, ścian osłonowych, pokrycia kolumn, podsufitki, fasady, zadaszenia, ochronne okładziny pomostów, dzieł sztuki, rzeźb, tablic i pomników. W inżynierii procesów chemicznych, tytan jest stosowany na rury i elementy pojemników, mieszalników, pomp, kolumn, wymienników ciepła, zbiorników, mieszadeł, chłodnic, reaktorów ciśnieniowych, itp. [25]. Innym obszarem zastosowania tytanu jest renowacja zabytków [26].

1.1.3. Skrawalność

Skrawalność materiału można zdefiniować jako określenie podatności, z jaką może być on obrabiany, uwzględniając dane parametry obróbki, takie jak: prędkość skrawania, posuw, głębokość skrawania [27,28]. Oceny skrawalności materiału można dokonać na podstawie następujących kryteriów [29,30]:

- trwałości narzędzia – objętości materiału usuniętej przez narzędzie, w ustalonych warunkach skrawania, zanim wydajność narzędzia stanie się nieakceptowalna lub zużycie narzędzia osiągnie maksymalną dopuszczalną wartość;
- prędkości okresowej – maksymalnej prędkości, z jaką materiał może być usuwany, przy standardowej, krótkiej trwałości ostrza narzędzia;
- siły skrawania – siły działającej na narzędzie lub poboru mocy;
- jakości powierzchni – jakości powierzchni po obróbce osiągniętej w określonych warunkach skrawania;
- kształtu wiórów – kształtu wiórów i sposobu ich odprowadzenia ze strefy obróbki, w ustalonych warunkach skrawania.

Skrawalność materiału uzależniona jest od wielu czynników, takich jak: właściwości materiału obrabianego, materiału i geometrii ostrza narzędzia skrawającego, parametrów obróbki, sposobu chłodzenia strefy skrawania i rodzaju zastosowanej cieczy chłodząco-smarującej (rys. 1.4).



Rys. 1.4 Czynniki wpływające na skrawalność (na podstawie [8,31]).

Tytan i jego stopy powszechnie są uważane za materiały trudnoobrabialne. Ich słaba skrawalność spowodowana jest poprzez następujące właściwości: [27,28,32]:

- Mała przewodność cieplna – w porównaniu do stali i stopów aluminium. Prowadzi to do wzrostu temperatury na krawędzi skrawającej narzędzia.
- Wysoka reaktywność chemiczna w podwyższonej temperaturze z gazami (tlen, wodór i azot) oraz z materiałem narzędzia skrawającego. Powstawanie tlenków, wodoroków i azotków powoduje kruchość i zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej stopu. Reaktywność z materiałem narzędzia skrawającego prowadzi do zgrzewania się wiórów z narzędziem, co z kolei prowadzi do zużycia kraterowego i przedwczesnego zużycia narzędzia.
- Niski moduł sprężystości – mała sztywność, umożliwia ugięcie smukłego i cienkościennego przedmiotu obrabianego pod naciskiem narzędzia, prowadząc do powstawania drgań podczas obróbki i problemów z dokładnością kształtowo-wymiarową.
- Twardość i wytrzymałość w wysokiej temperaturze – powoduje odkształcenie narzędzia skrawającego ze względu na oddziaływanie dużej siły skrawania.

- Umocnienie warstwy wierzchniej – minimalizuje zjawisko narostu na krawędzi skrawającej i w konsekwencji prowadzi do zwiększenia kąta ścinania, co z kolei sprawia, że cienki wiór styka się z niewielką powierzchnią narzędzia, co generuje duże naprężenie. Wysokie obciążenia w połączeniu z tarciami pomiędzy wiórem a powierzchnią natarcia narzędzia prowadzą do znacznego nagrzewania się narzędzia skrawającego na bardzo małej powierzchni i powstawania wykruszeń w pobliżu krawędzi skrawającej, co prowadzi do szybkiego zużycia narzędzia. Jednakże tworzenie się narostu na krawędzi skrawającej jest uważane za szkodliwe dla powłoki narzędzia.

Ze względu na szerokie zastosowanie tytanu i jego stopów opracowywane są różne metody poprawy skrawalności. Można tutaj wyróżnić dwa główne kierunki: zastosowanie nowych narzędzi skrawających wykonanych z zaawansowanych materiałów oraz zastosowanie różnych technik chłodzenia i smarowania strefy obróbki.

Powszechnym sposobem modyfikacji narzędzi jest poszukiwanie materiałów do produkcji narzędzi oraz powłok narzędziowych, które będą odporne na wysoką temperaturę, jednocześnie zachowując wysoką twardość i wytrzymałość oraz odporność na zużycie [33]. Przykładem modyfikacji narzędzi jest zastosowanie narzędzi obrotowych. Rozwiązanie takie jest sposobem na zminimalizowanie wpływu energii cieplnej i zużycia narzędzia w wyniku ciągłej zmiany położenia krawędzi skrawającej [34,35]. Dodatkowy ruch narzędzia obrotowego zapewnia, że część krawędzi skrawającej narzędzia jest zaangażowana w obróbkę przez krótki czas, po czym następuje wydłużony okres, który umożliwia odprowadzenie energii cieplnej ze strefy skrawania. Obrót narzędzia jest wspomagany albo przez zewnętrzny zabierak (w przypadku napędzanego narzędzia obrotowego) albo przez samonapędowe działanie składowych siły skrawania oddziałujących na narzędzie poprzez regulację jego osi pod kątem nachylenia względem skrawania prędkość [36].

1.2. Chłodzenie i smarowanie w procesach obróbki skrawaniem

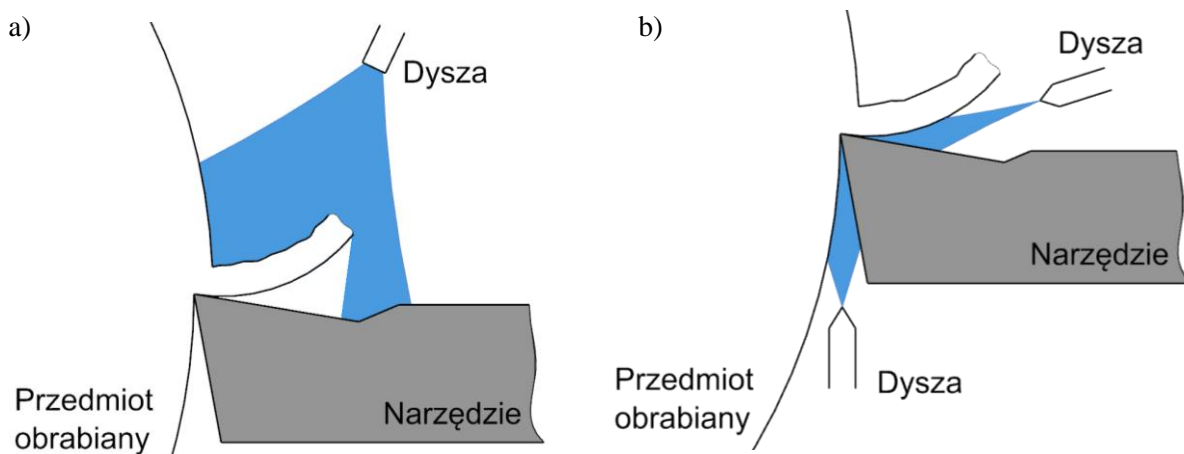
Obróbka na sucho minimalizuje zanieczyszczenie środowiska i zagrożenie dla zdrowia operatora maszyny, ale skrawanie bez cieczy chłodząco-smarującej może skutkować wysoką temperaturą skrawania, szybkim zużyciem narzędzia i pogorszeniem integralności powierzchni przedmiotu obrabianego [37–40].

Ciecze chłodząco-smarujące wpływają na poprawę wydajności obróbki oraz wspomagają odprowadzenie wiórów poza strefę obróbki, minimalizują narost na krawędzi skrawającej oraz chronią obrabiane elementy i części obrabiarek przed korozją [41].

1.2.1. Systemy doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej do strefy obróbki

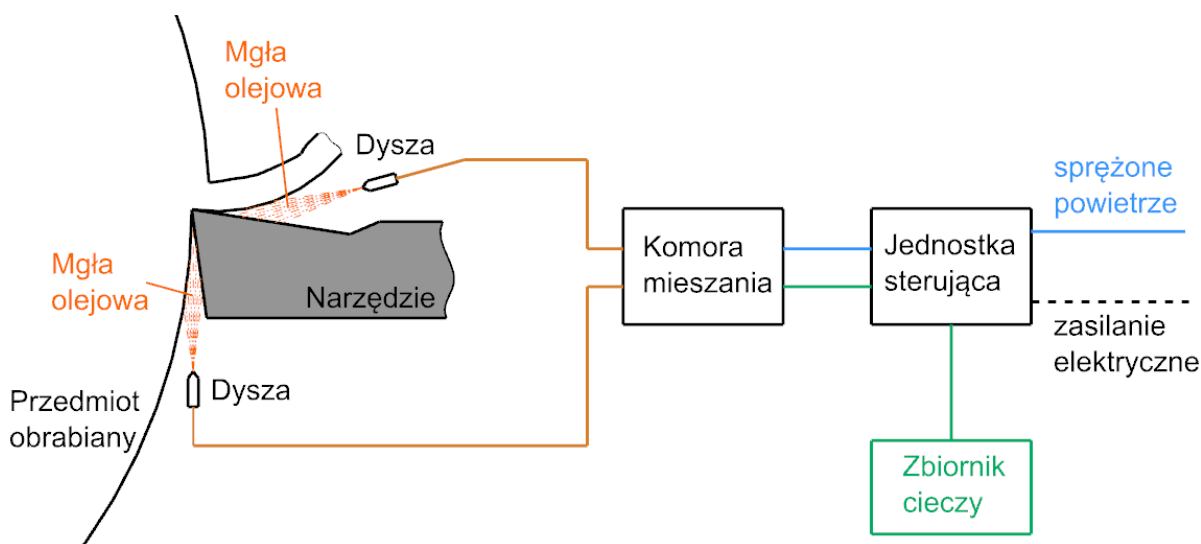
Standardowym sposobem dostarczania chłodziwa do strefy obróbki jest chłodzenia zalewowe (rys. 1.5 a). Taki sposób chłodzenia pozwala na efektywne zmniejszenie temperatury skrawania podczas obróbki z małą prędkością skrawania ze znacznym obszarem poślizgu, gdzie generowana jest mała wartość temperatury skrawania. Chłodziwo działa również jako środek smarny, zmniejszając w ten sposób tarcie oraz siłę skrawania, w konsekwencji wydłużając trwałość ostrza narzędzia [36,42–44]. Standardowo przyjmuje się natężenie przepływu powyżej 100 l/godz. [45].

Lepszą wydajność obróbki można uzyskać z zastosowaniem wysokociśnieniowych systemów dostarczania chłodziwa HPC (rys. 1.5 b). W tej metodzie strumień chłodziwa o dużej prędkości kierowany jest na powierzchnię styku wiór-narzędzie, dzięki czemu ciepło może być bezpośrednio odprowadzane z obszaru jego wytwarzania. Zastosowanie tej techniki pozwala na uzyskanie segmentowanych wiórów, niższej temperatury skrawania, wydłużonej trwałości ostrza oraz dobrej jakości powierzchni obrabianej [46–49]. Ciśnienie chłodziwa wynosi nawet 20,3 MPa, dla przepływu około 24 l/min [45].



Rys. 1.5 Schemat chłodzenia a) zalewowego, b) wysokociśnieniowego.

Alternatywą dla chłodzenia zalewowego i wysokociśnieniowego jest obróbka z minimalnym wydatkiem płynu smarującego MQL (z ang. Minimum Quantity Lubrication) (rys. 1.6), która polega na rozpyleniu niewielkiej ilości środka smarnego w strumieniu powietrza skierowanym w kierunku strefy skrawania. Standardowo stosowane natężenia przepływu środka smarnego wynoszą od 10 do 500 ml/h. Rozszerzeniem metody MQL jest metoda MQCL (z ang. Minimum Quantity Cooling Lubrication). W tej metodzie niewielka ilość środka smarnego lub chłodziwa jest mieszana ze sprężonym powietrzem. Dostarczanie środka smarnego może następować poprzez dysze zewnętrzne lub wewnętrznie poprzez obracające się wrzeciono obrabiarki. System zewnętrznego doprowadzania może być łatwo dopasowany do obrabiarek już funkcjonujących. Taki system może być używany do mniej wymagających zastosowań [43,50–52].



Rys. 1.6 Ogólna zasada działania systemu MQL.

Zastosowanie pary wodnej, powietrza lub gazów jako chłodziwa i środków smarnych to technika nie tylko ekonomiczna, przyjazna dla środowiska i zdrowia, ale także pozwalająca na uzyskanie niższej siły skrawania, dłuższej trwałości ostrza i chropowatość powierzchni obrabianej porównywalnej z obróbką na sucho i chłodzeniem zalewowym [53,54].

Inną przyjazną dla środowiska metodą chłodzenia strefy obróbki jest chłodzenie kriogeniczne. W metodzie tej płynny azot podawany w temperaturze -196°C absorbuje ciepło, szybko odparowuje i tworzy poduszkę z płynnym gazem pomiędzy wiórem a czołem narzędzia, która działa jak smar. Znaczne obniżenie temperatury w strefie skrawania prowadzi do zmniejszenia zużycia narzędzia, co z kolei wpływa na zmniejszenie siły skrawania oraz chropowatości powierzchni [54–57].

Niektórzy naukowcy donoszą również o stosowaniu smarów stałych w procesie obróbki. W tej metodzie grafit, dwusiarczek molibdenu lub kwas borowy w postaci suchego proszku są dostarczane do strefy skrawania. Wyniki eksperymentalne pokazują, że stosowanie stałego smaru jest korzystne i zauważalnie lepsze niż obróbka z konwencjonalnymi cieczami chłodząco-smarującymi i obróbka na sucho pod względem siły skrawania, zużycia narzędzia i jakości powierzchni [58–60].

1.2.2. Rodzaje cieczy chłodząco-smarujących stosowanych w obróbce skrawaniem

Ciecze chłodząco-smarujące to specjalne płyny przeznaczone do wszystkich mechanicznych procesów produkcyjnych. Tego typu płyny można stosować jako proste oleje, emulsje, roztwory, pasty, żele lub mgiełki [61].

Chłodziwa odgrywają ważną rolę w procesach obróbki skrawaniem. Służą do zmniejszania tarcia (smarowanie), odprowadzania ciepła (chłodzenie) oraz transportu wiórów lub opiłków metalowych. Prawidłowe zastosowanie zwykle skutkuje zwiększoną stabilnością procesu, lepszą

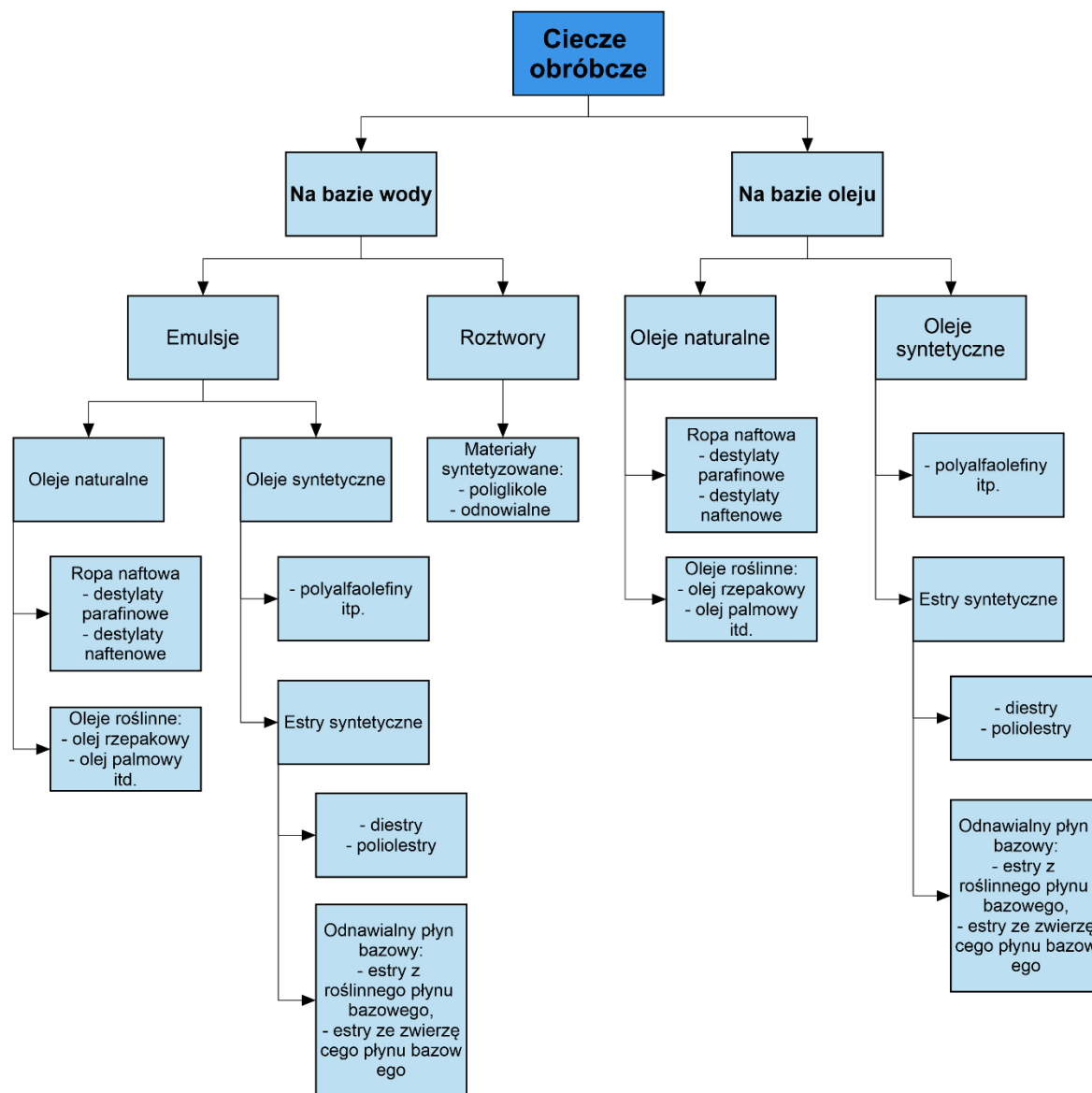
jakością powierzchni przedmiotu obrabianego i dokładnością wymiarową, a także zwiększeniem trwałości narzędzia [62,63].

Aby właściwie spełniać swoje funkcje, chłodziwa powinny charakteryzować się następującymi właściwościami [64–66]:

- wysoką przewodnością cieplną,
- wysokim ciepłem właściwym,
- dobrymi właściwościami smarnymi,
- wysoką wydajnością chłodzenia,
- brakiem szkodliwego wpływu na organizm ludzki,
- niską lepkością zapewniającą swobodny przepływ chłodziwa,
- stabilnością chemiczną,
- antykorozyjnością,
- wysoką temperaturą zapłonu, zmniejszającą ryzyko pożaru,
- antyalergiczną,
- niską zdolnością do parowania,
- łatwością w utylizacji,
- niskimi kosztami.

Różne rodzaje cieczy obróbkowych mogą być stosowane w celu poprawy wydajności procesu w odniesieniu do aspektów technologicznych, ekonomicznych i ekologicznych. Zgodnie z normą DIN 51385 ciecze do obróbki metali można podzielić na ciecze na bazie oleju – oleje obróbcze i ciecze na bazie wody – emulsje i roztwory (rys. 1.7). Zwykle do cieczy podstawowych dodaje się pewne dodatki (np. przeciwzużyciowe, antykorozyjne, do pracy pod wysokim ciśnieniem, przeciwmgielne), aby spełnić wymagania konkretnego przypadku.

Nawet podstawowy podział cieczy chłodząco-smarujących na produkty wodnorozcieńczalne i olejorozcieńczalne, zasadniczo nie daje wskazówek co do szczególnej kategoryzacji do konkretnego rodzaju operacji i łatwości obróbki. Zarówno produkty na bazie wody, jak i na bazie oleju mają zastosowanie do prawie wszystkich operacji obróbki skrawaniem. Wybór optymalnej cieczy chłodząco-smarującej do danej operacji jest szczególnie ograniczony względami ekonomicznymi [67].



Rys. 1.7 Podział cieczy chłodząco-smarujących (na podstawie [68]).

1.2.3. Skład chemiczny cieczy chłodząco-smarujących do obróbki metali

Większość cieczy chłodząco-smarujących, zarówno na bazie wody jak i na bazie oleju składa się z cieczy bazowej i dodatków. Rzadko stosuje się czyste oleje bez żadnych dodatków. Ostateczny skład cieczy zależy od rodzaju operacji, materiału obrabianego, narzędzia skrawającego itp. Jednakże można pogrupować poszczególne składniki według ich funkcji, jakie pełnią w cieczy chłodząco-smarującej.

Ciecz bazowa

Ciecze bazowe to zwykle oleje mineralne, oleje syntetyczne, estry syntetyczne, oleje tłuszczowe, polialfaolefiny. Oleje mineralne są zazwyczaj hydrorafinowanymi (uwodornionymi) destylatami ropy naftowej, zarówno frakcji ciężkiej, jak i lekkiej, o charakterze naftenowym lub parafinowym. Nawet jeśli oleje mineralne są głównymi składnikami, to część lub nawet cała zawartość

olejów mineralnych może być zastąpiona syntetycznymi węglowodorami, takimi jak polialfaolefiny lub alkilobenzeny, olejami tłuszczowymi lub nawet estrami syntetycznymi.

Emulgatory i środki powierzchniowo czynne

Przykładami emulgatorów i środków powierzchniowo czynnych są sulfoniany naftowe i produkty etoksylowane. Są one dodawane do cieczy chłodząco-smarujących na bazie wody w celu rozproszenia kropeł oleju w cieczy i zmniejszenia napięcia powierzchniowego cieczy. Zmniejszenie napięcia powierzchniowego powoduje, że emulsje są stabilne termodynamicznie, co oznacza, że zmniejszają one naturalną tendencję fazy zemulgowanej do zmniejszania powierzchni międzyfazowej. Gdy obecna jest wystarczająca ilość emulgatora, tworzy on sfery lub "micele" z hydrofobowymi końcami tych cząsteczek w rdzeniu i hydrofilowymi końcami na zewnętrznej powierzchni w kontakcie z wodą i pozwala na uzyskanie w pełni rozproszonej mieszaniny olejowo-wodnej.

Dodatki EP/AW (extreme pressure agents and anti-weld agents)

Dodatki EP/AW (np. związki siarki, chloru, fosforu lub ołowiu) stosowane są w celu ochrony przed spajaniem przedmiotu obrabianego z metalowym narzędziem podczas ciężkiej obróbki. W wysokiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem dodatki EP, jako związki chemicznie czynne, reagują z powierzchniami metalowymi tworząc warstwę ochronną.

Inhibitory korozji

Inhibitory korozji (np. sole kwasów tłuszczowych, sulfoniany, aminy, amidy, borany, krzemiany, fosforany i azotany) tworzą na powierzchniach metali błony składające się z polarnych związków organicznych lub tlenków nieorganicznych, które zapobiegają oddziaływaniu kwasów i nadtlenków.

Środki zmniejszające tarcie i zwilżające

Środki zmniejszające tarcie i zwilżające (np. oleje zwierzęce i roślinne, estry i amidy tłuszczowe, kwasy tłuszczowe i alkohole) zawierają małą grupę polarną, która jest przyciągana do powierzchni metalu i większą grupę węglowodorową, która rozpuszcza się w fazie olejowej, tworząc monomolekularną warstwę ochronną.

Stabilizatory, rozpuszczalniki

Słaba rozpuszczalność dodatków w oleju może być zniwelowana przez tzw. środki sprzęgające (glikol, alkohole). W ten sposób można również uzyskać stabilizację koncentratów do dłuższego przechowywania w niskiej temperaturze. Określenie stabilizatory w odniesieniu do tej samej grupy substancji odnosi się również do możliwości poprawy stabilności emulsji produktów mieszanych z wodą.

Produkty biobójcze

Biocydy mają za zadanie ograniczyć rozmnażanie się bakterii, grzybów, drożdży i pleśni w płynie. Komponenty stosowane w chłodziwach, oprócz zadań emulgatorów czy inhibitorów korozji, mogą mieć również charakter biobójczy. Przykładowo, badanie dużej liczby alkanolamin wykazało, że mają one bardzo różne właściwości biobójcze. Jednakże kilka biocydów zostało zidentyfikowanych jako źródła uczulenia skóry u ludzi.

Inne dodatki

Oprócz wymienionych grup dodatków do cieczy chłodząco-smarujących można dodawać również: środki sprzęgające, dyspergatory, polepszacze wskaźnika lepkości, środki chelatujące, plastyfikatory, pasywatory, środki przeciwpienne, środki zapachowe, środki przeciwmgielne i barwniki.

Obecne trendy w dodatkach obejmują eliminację związków zawierających chlor, fenole, azotyny, aminy, PCB i metale ciężkie. Dodatki chloru i siarki były szeroko stosowane w latach 70-tych, ale obecnie zostały w większości wyeliminowane z wyjątkiem chloroalkanów, o wyższej masie cząsteczkowej, jako środki do pracy w wysokich ciśnieniach i sulfonianów ropy naftowej jako emulgatorów [67,69].

1.2.4. Ciecze chłodząco-smarujące stosowane podczas skrawania w warunkach MQL

Ciecze przeznaczone do obróbki w warunkach minimalnego smarowania (MQL) mają następujące zadania [70]:

- smarowanie strefy kontaktu pomiędzy narzędziem, przedmiotem obrabianym i innymi powierzchniami trącymi,
- redukcja tarcia i obniżanie temperatury w strefie oddziaływania,
- zapobieganie powstawaniu narostu na krawędzi skrawającej,
- odprowadzenie ciepła ze strefy skrawania.

Ze względu na to, że w przypadku stosowania MQL chłodziwo jest z reguły całkowicie rozproszony w obszarze roboczym w postaci oparów i mgły, należy zwrócić szczególną uwagę na aspekty bezpieczeństwa. Z tego powodu stosowane są głównie oleje naturalne, estry kwasów tłuszczowych, alkohole tłuszczowe, jak również poliglikole i inne płyny na bazie syntetycznej. Szczególną uwagę należy zwrócić również na zawartość toksycznych dodatków, aby gotowy produkt był bezpieczny pod względem toksykologicznym i dermatologicznym.

Wadą naturalnych olejów i tłuszczów jest słaba stabilność oksydacyjna. Oleje estrowe i alkohole tłuszczowe powinny mieć pierwszeństwo w przypadku procesów, w których wytwarzane jest ciepło, aby uniknąć pozostałości na obrabianych przedmiotach i maszynach.

W porównaniu z olejami estrowymi działanie smarne równoważnych alkoholi tłuszczowych jest niewielkie. Łatwo odparowują i w związku z tym dają niski efekt chłodzący. Ponadto mają one niższą temperaturę zapłonu niż oleje estrowe. Dlatego też alkohole tłuszczowe są preferowane do operacji, w których efekt smarowania jest ważniejszy od efektu chłodzenia. Zaletą alkoholi tłuszczowych jest to, że obrabiane części są suche w wyniku szybkiego odparowania. Odparowanie to należy jednak traktować krytycznie ze względu na wartości progowe dla mgły olejowej i oparów olejowych w miejscu pracy.

Oleje estrowe znajdują zastosowanie głównie tam, gdzie ważny jest efekt smarowania pomiędzy narzędziem, przedmiotem obrabianym i wiórami (zapobieganie zużyciu ściernemu). Wysoki zakres wrzenia i temperatura zapłonu pomimo niższej lepkości olejów estrowych powoduje znacznie mniejszą emisję oparów do pomieszczenia roboczego. Jednocześnie cienka warstwa pozostająca na obrabianym przedmiocie ma działanie antykorozyjne. Oprócz wyżej wymienionych właściwości oleje estrowe ulegają szybkiej biodegradacji i dlatego są klasyfikowane jako nieszkodliwe dla wody lub jako 1 klasa zagrożenia dla wody.

Podsumowując, ciecze przeznaczone do MQL powinny spełniać następujące kryteria: niskoemisyjny płyn bazowy o przyjemnym zapachu, generujący stabilny aerozol, nie wchodzący w reakcje chemiczne z materiałem przedmiotu obrabianego [52,67,70].

1.3. Obróbka skrawaniem w warunkach MQL

Niewątpliwe zalety techniki MQL, jak zmniejszenie negatywnego wpływu na środowisko i pracowników, zmniejszenie problemów ze składowaniem i utylizacją, a co za tym idzie także zmniejszenie kosztów jednostkowych produkcji, sprawiają, że naukowcy w swoich badaniach często analizują wpływ zastosowania tej metody w obróbce skrawaniem różnych materiałów konstrukcyjnych. Tabela 1.6 przedstawia zestawienie przykładowych wyników takich badań z wykorzystaniem różnych cieczy obróbkowych podczas różnych procesów obróbki skrawaniem na podstawie przeglądu literatury.

Tabela 1.6 Przykłady wyników badań dotyczących zastosowania metody MQL podczas różnych procesów obróbki skrawaniem.

Rodzaj obróbki	Rodzaj oleju i wydatek	Materiał obrabiany	Wnioski	Poz.
Toczenie	60 ml/h	AISI 4340	Badano wpływ chłodzenia MQL na zużycie narzędzia i chropowatość powierzchni. Wykazano, że dzięki zmniejszeniu temperatury w strefie skrawania oraz zmianie interakcji wiór-narzędzie oraz przedmiot obrabiany-narzędzie MQL znacznie zmniejsza intensywność zużycia narzędzia oraz chropowatość powierzchni.	[71]
Wiercenie	olej palmowy 10,3 ml/h	Inconel 718	Porównano temperaturę skrawania, siłę skrawania, moment i trwałość ostrza podczas obróbki z zastosowaniem chłodzenia zalewowego (ciecz chłodząco-smarująca na bazie wody), chłodzenia strumieniem powietrza oraz z wykorzystaniem techniki MQL. Ciecze zastosowane w metodzie MQL to estry syntetyczne oraz olej palmowy. Wykazano, że dla oleju palmowego w warunkach MQL uzyskano najlepsze wyniki w porównaniu do estrów syntetycznych i pozostałych technik chłodzenia.	[72]
Frezowanie	olej borowy + woda 48 ml/h	AA7075-T6	Zbadano wpływ parametrów skrawania (prędkość skrawania i posuw), techniki chłodzenia (chłodzenie zalewowe i MQL) oraz materiału narzędzia na chropowatość powierzchni przedmiotu obrabianego. Podczas skrawania z niższą prędkością, chropowatość powierzchni przy chłodzeniu konwencjonalnym jest mniejsza niż przy obróbce w warunkach MQL. Konwencjonalne chłodzenie prowadzi do uzyskania gorszej jakości powierzchni przy wyższej prędkości skrawania. Chropowatość powierzchni w obróbce MQL zmniejsza się wraz z prędkością skrawania.	[73]

Toczenie	olej rzepakowy, olej kokosowy, olej sojowy 50 ml/h	AISI 4340 hartowana	<p>Przeanalizowano wpływ oleju rzepakowego, kokosowego oraz sojowego zastosowanych z wykorzystaniem techniki MQL na chropowatość powierzchni po obróbce oraz trwałość ostrza. Wyniki porównano do wyników uzyskanych podczas obróbki na sucho oraz z wykorzystaniem oleju syntetycznego w warunkach MQL.</p> <p>Przy wyższej prędkości, trwałość narzędzia uzyskana przy zastosowaniu oleju syntetycznego była prawie trzykrotnie większa niż oleju rzepakowego.</p> <p>W kategorii biodegradowalnych cieczy chłodząco-smarujących zastosowanie oleju rzepakowego zapewniało większą trwałość narzędzi niż oleju kokosowego i sojowego.</p>	[74]
Frezowanie	olej mineralny, syntetyczny, półsyntetyczny oraz olej pochodzenia roślinnego 25, 50, 75, 100 ml/h	Waspaloy	<p>W ramach badań poszukiwano optymalnych parametrów MQL oraz parametrów skrawania podczas frezowania nadstopu Waspaloy pod względem wydłużenia trwałości ostrza oraz obniżenia wartości siły skrawania. W wyniku optymalizacji otrzymano zestawienie optymalnych parametrów: olej roślinny, wydatek 100 ml/h, frezowanie przeciwbieżne, odległość dyszy 25 mm.</p>	[75]
Toczenie	ECOLUBRIC E200 168 ml/h	Ti-6Al-4V	<p>Badano przebieg zużycia narzędzi przy zastosowaniu sześciu technik chłodzenia i smarowania: chłodzenie zalewowe, obróbka na sucho, MQL z wykorzystaniem oleju roślinnego, chłodzenie powietrzem, chłodzenie kriogeniczne (ciekłym azotem), MQCL – z wykorzystaniem oleju roślinnego i powietrza. Stwierdzono, że olej roślinny jest ekologiczną alternatywą dla chłodzenia syntetycznego pod względem zużycia narzędzia i chropowatości powierzchni, szczególnie przy posuwie ok 0,1 mm/min i prędkości skrawania ok. 90 m/min.</p>	[76]

Toczenie	olej sojowy, olej słonecznikowy 50 ml/h	AISI 4130	Przeanalizowano wpływ zastosowania oleju sojowego i słonecznikowego z wykorzystaniem techniki MQL na siłę skrawania oraz zużycie energii. Wyniki porównano do wyników uzyskanych przy zastosowaniu Blasocut-4000. Przy zastosowaniu oleju sojowego zaobserwowano około 9% redukcję siły skrawania w porównaniu do cieczy na bazie oleju mineralnego. Obróbka z olejem słonecznikowym również wykazała mniejszą wartość siły skrawania w porównaniu do obróbki z cieczą na bazie oleju mineralnego. Zaobserwowano zmniejszenie zużycia energii w przypadku oleju sojowego o około 7% i 9% w porównaniu z olejem słonecznikowym i cieczą na bazie oleju mineralnego.	[77]
Wiercenie	SETOL ST-SHAD SETOL ST-SHAD 20A SETOL SOE 18 ml/h	stal węglowa	Z pracy wynika, że w porównaniu z ciągłym dostarczaniem minimalnej ilości środka smarnego, nieciągłe dostarczanie powodowało znaczne skrócenie trwałości ostrza, zwłaszcza w przypadku wiertel niepokrywanych, które są narażone na istotne oddziaływanie ciepła generowanego podczas procesu skrawania. Wykazano również, że ciecz o niskiej lepkości z wysoką zdolnością chłodzenia znacznie wydłużała trwałość narzędzia.	[78]
Wiercenie	5, 15, 23 ml/h	stal hartowana	Badania przeprowadzono dla chłodzenia techniką MQL, suchym sprężonym powietrzem i emulsją. Wykazano, że użycie MQL i sprężonego powietrza spowodowało mniejsze zużycie zarówno płytki środkowej, jak i peryferyjnej w porównaniu z wierceniem z emulsją. Dłuższe wióry powstawały podczas wiercenia z emulsją w porównaniu do wiercenia w warunkach MQL i wierceniem wspomaganego sprężonym powietrzem.	[79]

Wiercenie	UNIST Coolube 2210 60 ml/h	aluminium AA2024	Analizowano wpływ warunków chłodzenia oraz parametrów skrawania na temperaturę narzędzia w pobliżu strefy skrawania. Zaobserwowano, że obszar znajdujący się w pobliżu środka wiertła ma najwyższą temperaturę. Zastosowanie metody MQL pozwalało na bardziej efektywne zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy częścią środkową wiertła a częścią zewnętrzną w porównaniu do obróbki na sucho i chłodzenia powietrzem.	[80]
Toczenie	OPORTET RG-2 olej CUTSOL 1,8–3,6 g/min	stal nierdzewna X10CrNi18- 8	Porównano wpływ obróbki na sucho, chłodzenia metodą MQCL (Minimal Quantity Cooling Lubricat), chłodzenie metodą MQL (Minimum Quantity Lubricat) na kształt wiórów i chropowatość powierzchni. Stwierdzono, że w warunkach MQCL i MQL obszar powstawania wiórów elementowych oraz o kształcie krótkich spiral jest szerszy w porównaniu do toczenia na sucho. Przy zwiększonym przepływie masowym emulsji i oleju powstaje splątany wiór. Chłodzenie metodą MQCL i MQL powoduje zmniejszenie wybranych wartości parametrów chropowatości o 2% do 42% w stosunku do obróbki na sucho	[81]
Toczenie	EMULGOL-S 0,44 g/h	stal 2.4462	Stwierdzono, że obróbka z zastosowaniem MQCL obniżyła parametry chropowatości 2D o 14–22% w zakresie niskich wartości prędkości skrawania oraz 27–62% w zakresie wyższych prędkości skrawania w porównaniu do obróbki na sucho. Na podstawie analizy rozkładu pików stwierdzono, że po obróbce w warunkach MQCL uzyskana powierzchnia była gładsza w porównaniu do powierzchni uzyskanej po obróbce na sucho.	[82]

Toczenie	olej słonecznikowy olej rycynowy 250 ml/h	Inconel 718	Najmniejszą wartość zużycia narzędzia i chropowatości powierzchni osiągnięto dla obróbki w warunkach MQL z olejem słonecznikowym i wartości te były odpowiednio 26% i 52% lepsze w porównaniu do obróbki na sucho przy tych samych parametrach.	[83]
Toczenie	Microtrend 231L 50, 100, 200 ml/h	mosiądz CuZn39Pb3	Optymalizowano prędkość skrawania, posuw oraz wydatek cieczy smarującej podczas obróbki w warunkach MQL. Wyniki optymalizacji wykazały, że wydatek 200 ml/h, prędkość skrawania 200 m/min i posuw 0,05 mm/obr. są niezbędne do jednoczesnego zminimalizowania chropowatości powierzchni i siły skrawania.	[84]
Frezowanie	ISO VG 68 100, 150, 200 ml/h	AISI 4140	Przeprowadzono optymalizację wydatku cieczy chłodząco-smarującej oraz parametrów skrawania pod kątem minimalizacji wartości siły skrawającej i chropowatości powierzchni. Minimalną wartość odpowiedzi uzyskano dla małej wartości posuwu, wysokiej wartości prędkości skrawania oraz wydatku cieczy 150 ml/h.	[85]
Toczenie	ECOLUBRIC E200 168 ml/h	Ti-6Al-4V	Oceniane techniki smarowania i chłodzenia to: chłodzenie zalewowe, obróbka na sucho, MQL z wykorzystaniem oleju roślinnego, chłodzenie powietrzem, chłodzenie kriogeniczne (ciekłym azotem), MQCL – z wykorzystaniem oleju roślinnego i powietrza. Stwierdzono, że olej roślinny jako środek smarny do obróbki skrawaniem zarówno z zastosowaniem MQL jak i MQCL jest bardziej zrównoważoną alternatywą dla chłodzenia z wykorzystaniem cieczy syntetycznej pod względem zużycia narzędzia, jakości powierzchni i energii skrawania.	[86]

Wiercenie	Ester syntetyczny Olej palmowy 10,3 ml/h	Ti-6Al-4V	Zastosowano następujące metody chłodzenia i smarowania strefy skrawania: chłodzenie powietrzem, MQL i chłodzenie zalewowe. Podczas obróbki na sucho uzyskano niezadowalające wyniki pod względem trwałości narzędzia, dużych sił skrawania i temperatury obróbki. Zastosowanie techniki MQL, zarówno z estrem syntetycznym (MQLSE), jak i z olejem palmowym (MQLPO), oraz chłodzenie zalewowe wykazywały porównywalne wyniki w zakresie trwałości narzędzia. MQLPO spowodowało zmniejszenie siły skrawania i temperatury przedmiotu obrabianego w porównaniu do MQLSE – porównywalne z chłodzeniem zalewowym.	[87]
Toczenie	ECOCUT MIKKRO 20E 0,44 g/min	stal 316L	Przeprowadzono obróbkę na sucho, w warunkach MQL oraz w warunkach MQCL z cieczą z dodatkiem środków EP/AW (MQCL+EP/AW). Zużycie narzędzia podczas obróbki w warunkach MQL było mniejsze o 9% w porównaniu do obróbki w warunkach MQCL+EP/AW oraz 21% w porównaniu do obróbki na sucho.	[88]
Toczenie	brak informacji	stop tytanu (grade 2)	Zastosowano algorytm CI (Cohort Intelligence) oraz algorytm Multi-CI (algorytmy optymalizacyjne oparte na sztucznej inteligencji) do optymalizacji parametrów procesu toczenia stopu tytanu (grade 2) w warunkach MQL. Przy zastosowaniu algorytmu Multi-CI zmniejszono siłę skrawania F_c o 8%, zużycie narzędzia V_{Bmax} o 42%, długość kontaktu narzędzie-wiór L o 38% oraz chropowatość powierzchni o 20% w porównaniu do optymalizacji za pomocą roju cząstek (PSO).	[89]

Frezowanie	olej z nasion bawełny, palmowy, rycynowy, sojowy, z orzechów, ciecz syntetyczna 50 ml/h	AISI 1045	Wyniki eksperymentalne wykazały, że najniższą siłę skrawania, najniższy współczynnik tarcia oraz najmniejszą chropowatość powierzchni uzyskano dla obróbki w warunkach MQL z zastosowaniem oleju palmowego.	[90]
Toczenie	olej kokosowy olej z otrębów ryżowych	stal nierdzewna AISI 304	Stwierdzono, że obróbka w warunkach MQL z wykorzystaniem oleju z otrębów ryżowych pozwala na uzyskanie niższych wartości siły skrawania, niższej temperatury w strefie skrawania, zmniejszonego zużycia narzędzia i lepszej jakości powierzchni obrabianej w porównaniu do obróbki na sucho i w warunkach MQL z olejem kokosowym.	[91]
Toczenie	Olej roślinny	CP-Ti-grade 2	Obróbkę prowadzono w trzech środowiskach: obróbka na sucho, chłodzenie zalewowe oraz minimalne smarowanie (MQL). Zaobserwowano 46% i 16% redukcję siły skrawania z wykorzystaniem techniki MQL w porównaniu z obróbką na sucho i w środowisku zalewowym. Zużycie narzędzia na powierzchni czołowej było mniejsze o 57% i 34% przy obróbce MQL w porównaniu do warunków suchych i zalewowych. Również jakość powierzchni obrabianej była lepsze przy obróbce MQL na bazie oleju roślinnego w porównaniu do obróbki na sucho i w warunkach zalewowych.	[92]
Wiercenie	olej rycynowy, olej słonecznikowy 50 ml/h	stop aluminium 6063	Porównano wydajność wiercenia na sucho z wierceniem w warunkach MQL z zastosowaniem oleju rycynowego i słonecznikowego. Wykazano, że chłodzenie MQL z cieczami na bazie roślinnej pozwalają na lepsze wykończenie powierzchni przedmiotu obrabianego oraz zmniejszenie siły skrawania i momentu obrotowego.	[93]

Frezowanie	Olej roślinny, 50% oleju roślinnego + 50% wody 60 ml/h	GH4099	Badano wpływ środowiska skrawania na siłę frezowania, zużycie powierzchni przyłożenia oraz topografię powierzchni przedmiotu obrabianego. Analizie poddano obróbkę na sucho, w warunkach MQL z czystym olejem oraz MQL – olej zmieszany z wodą. W warunkach MQL z czystym olejem i MQL olej z wodą siła skrawania uległa zmniejszeniu odpowiednio o 12,8% oraz 28,2% w porównaniu z frezowaniem na sucho. Osiągnięto również zmniejszenie temperatury skrawania, odpowiednio o 9,2% oraz 17,5%. Ponadto obróbka w warunkach MQL pomogła skutecznie poprawić jakość powierzchni przedmiotu obrabianego oraz ograniczyć wartość zużycia narzędzia.	[94]
Toczenie	Oliwa z oliwek 150 ml/h	stop aluminium 6026-T9	Poddano analizie i wielopoziomowej optymalizacji parametry skrawania stopu aluminium 6026-T9 w warunkach MQL i podczas skrawania na sucho. Stwierdzono, że najważniejszym parametrem procesu skrawania dla parametrów profilu chropowatości, zarówno w warunkach suchych, jak i MQL jest posuw, dla trwałości narzędzia prędkość skrawania i posuw.	[95]
Frezowanie	olej KT 2000 50 ml/h	stal AISI 1040	Analizowano wpływ prędkości skrawania, posuwu oraz środowisko obróbki (na sucho i MQL) na zużycie narzędzi, temperaturę w strefie skrawania i moc skrawania. Uzyskane wyniki pokazały, że system MQL zapewnia lepszą wydajność procesu w porównaniu z frezowaniem na sucho dzięki zmniejszeniu zużycia narzędzia, temperatury skrawania i zużycia energii.	[96]

Toczenie	rozpuszczalny w wodzie olej obróbczy skomponowany z estrów roślinnych i specjalnych dodatków 50 ml/h	stop na bazie niklu 625	Zbadano wpływ chłodzenia techniką MQL, chłodzenia kriogenicznego ciekłym azotem (LN2) i hybrydowej metody CryoMQL na zużycie narzędzia, temperaturę w strefie skrawania, chropowatość powierzchni i morfologię wiórów. Zastosowanie CryoMQL pozwoliło na zmniejszenie chropowatości powierzchni o 24,82% w porównaniu z chłodzeniem kriogenicznym. Zużycie narzędzia zmniejszyło się o 50,67% i 79,60% dzięki zastosowaniu MQL i CyroMQL w porównaniu z obróbką kriogeniczną.	[97]
Toczenie	emulsja OPORTET RG-2 (stężenie 4%) 1,5–3,5 g/min	stop AISI 1010 A53	Porównano wpływ obróbki na sucho, obróbki z chłodzeniem skompresowanym powietrzem oraz obróbki w warunkach MQCL. Wykazano, że zastosowanie MQCL poszerza zakres parametrów skrawania, w którym wiór ma kształt akceptowalny pod względem bezpieczeństwa pracy. Zastosowanie MQCL pozwoliło na obniżenie parametru chropowatości powierzchni <i>Ra</i> o około 20% w porównaniu do obróbki na sucho i z chłodzeniem sprężonym powietrzem.	[98]
Frezowanie	SKF LubriOil Wysecut VNX 32 Olej sojowy (świeży) (SBO _f) Olej sojowy (1 roczny) (SBO _o) SBO (świeże) z dodatkiem antyzużyciowym 45-50 ml/h	stal SA516	Zużycie narzędzia podczas obróbki na sucho i obróbki w warunkach MQL było znacznie niższe niż w przypadku stosowania chłodzenia zalewowego. Obecność dodatku przeciwzużyciowego poprawiła redukcję zużycia narzędzi przy stosowaniu oleju sojowego o kolejne 20%. Na chropowatość powierzchni obrabianej w niewielkim stopniu wpływały właściwości smarne badanych olejów.	[99]

Wiercenie	olej rycynowy, kokosowy, sojowy, rzepakowy, palmowy, słonecznikowy, woda destylowana 120 ml/h	stal nierdzewna AISI 321	Porównano wydajności różnych strategii chłodzenia: chłodzenie zalewowe, MQL z siedmioma różnymi cieczami oraz obróbkę na sucho w zakresie siły skrawania, momentu obrotowego chropowatości powierzchni obrabianej, współczynnika tarcia, morfologii wiórów i mechanizmu zużycia. Wykazano, że chłodzenie MQL pozwala na uzyskanie lepszej wydajności wiercenia w porównaniu do obróbki na sucho i przy chłodzeniu zalewowym. Wśród cieczy najlepsze właściwości wykazywał olej słonecznikowy.	[100]
Toczenie	oliwa z oliwek 100 ml/h	stal hartowana	Wykazano, że obróbka w warunkach MQL z oliwą z oliwek pozwala na zmniejszenie zużycia powierzchni przyłożenia narzędzia oraz obniżenie temperatury i chropowatości powierzchni w porównaniu z obróbką na sucho.	[101]
Toczenie	emulsja OPORTET RG-2 (stężenie 4%) 1,5–3,5 g/min	AISI 1045	Wykazano, że zastosowanie metody MQCL pozwoliło na obniżenie całkowitej siły skrawania odpowiednio o 7% i 18% w porównaniu do obróbki z chłodzeniem sprężonym powietrzem i na sucho.	[102]

1.3.1. Obróbka skrawaniem w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarujących z dodatkiem mikro- i nanocząstek

Obecnie prowadzone badania skupiają się na poszukiwaniu różnych metod poprawy właściwości cieczy chłodząco-smarujących. Opracowano nową klasę cieczy chłodząco-smarujących nazywaną nanocieczami chłodząco-smarującymi [103]. Nanociecz to mieszanina cieczy bazowej i cząsteczek (cząstki metali, tlenków metali, ceramiki lub nanorurek węglowych) wielkości rzędu kilku nanometrów zawieszonych w płynie bazowym w celu poprawy jego właściwości [104,105]. Najczęściej stosowane nanocząstki to [106,107]:

- dwusiarczek molibdenu (MoS_2),
- wielościenne nanorurki węglowe (Multi Walled Carbon Nano Tubes MWCNT),
- jednościenne nanorurki węglowe (Single Walled Carbon Nano Tubes SWCNT),
- tlenek glinu (Al_2O_3),
- ditlenek tytanu (TiO_2),
- tlenek miedzi (CuO),
- ditlenek krzemu (SiO_2),
- ditlenek cyrkonu (ZrO_2),
- sześciokątny azotek boru (hBN),
- nanopłatki grafitowe (GnP),
- nano kwas borowy (NBA),
- nanodiament (ND).

Frakcje metali i tlenków metali mają wyższą przewodność cieplną niż materiały i ciecze organiczne (tabela 1.7), dlatego nanocząstki dodane do płynu bazowego zwiększają zdolność przenoszenia ciepła przez mieszaninę. Zawieszenie nanocząstek stałych o rozmiarze <100 nm w płynie bazowym daje lepszy współczynnik wymiany ciepła ze względu na ich wyższą przewodność cieplną i większą stabilność w porównaniu z płynem bazowym. Inne zalety nanocieczy można podsumować następująco [103,106]:

- wyższa stabilność dyspersji,
- zmniejszenie wymaganego wydatku w porównaniu z cieczami bazowymi (dla tego samego stopnia wymiany ciepła),
- zwiększona zdolność do przewodzenia ciepła dzięki dużej powierzchni i wyższemu współczynnikowi kształtu nanocząstek,
- lepsze właściwości reologiczne i tribologiczne,
- poprawa procesu obróbki skrawaniem dzięki kształtowi, rozmiarowi i koncentracji nanocząstek.

W tabeli 1.8 przedstawiono publikacje dotyczące zastosowania nanocieczy w procesach obróbki skrawaniem.

Tabela 1.7 Przewodność cieplna wybranych materiałów i cieczy (na podstawie [108,109]).

Material/ciecz	Przewodność cieplna λ, W/(m·K)
Nanorurki węglowe	3000
Diamant	2300
Miedź	401
Aluminium	237
Krzem	148
Tlenek cynku	100
Tlenek glinu	40
Tlenek miedzi	19,6
Woda	0,613
Glikol etylenowy	0,253
Olej rzepakowy	0,165
Olej silnikowy	0,145

Tabela 1.8 Zestawienie przykładowych prac dotyczących zastosowania mikro- i nanocieczy w procesach obróbki skrawaniem.

Rodzaj obróbki	Materiał obrabiany	Rodzaj i wielkość nanocząstek	Ciecz bazowa, wydatek	Procentowy udział nanocząstek w cieczy bazowej	Wnioski	Poz.
Mikrowiercenie	stop aluminium 7075-T6	nanodiament	olej roślinny 25 ml/h	1,0 oraz 2,0% wag.	Zastosowanie 2-procentowej nanocieczy z wykorzystaniem techniki MQL w procesie mikrowiercenia może zmniejszyć siłę skrawania, moment obrotowy oraz temperaturę w strefie skrawania w porównaniu do wiercenia na sucho i MQL z cieczą bez dodatku nanocząstek. Ponadto nanociecz w warunkach MQL może znacząco poprawić jakość otworu w procesie mikrowiercenia.	[110]
Mikrowiercenie	stop aluminium	nanodiament 30 nm	olej parafinowy, olej roślinny 7,5 ml/h	2,0 oraz 4,0% obj.	Minimalny moment obrotowy i siłę skrawania uzyskano przy wysokiej prędkości obrotowej wrzeciona (60000 obr/min) i stężeniu objętościowym nanocieczy ok. 2%. Uzyskane optymalne wartości współczynników procesu mikrowiercenia z wykorzystaniem nanocieczy w warunkach MQL były podobne w obu przypadkach cieczy bazowej (oleju parafinowego i roślinnego).	[111]
wiercenie	stop aluminium 6063	Al ₂ O ₃ 20 nm	olej sojowy 200 ml/h	1,5% obj.	Wykazano, że nanociecz zastosowana w warunkach MQL znacząco zwiększa trwałość narzędzia oraz zmniejsza moment obrotowy skrawania wiertła i siłę skrawania w porównaniu do obróbki na sucho, chłodzenia zalewowego i MQL bez dodatku nanocząstek.	[112]

wiercenie	stal AISI 321	Al ₂ O ₃ 30 nm	olej słonecznikowy 120 ml/h	0,5, 1,0 oraz 1,5% mas.	Siła skrawania, moment obrotowy, chropowatość powierzchni i temperatura w strefie skrawania uległy zmniejszeniu odpowiednio o 44%, 67%, 56% i 26% podczas wiercenia 30. otworu w warunkach MQL z zastosowaniem nanocieczy (1,5% mas. Al ₂ O ₃) w porównaniu do obróbki z chłodzeniem zalewowym.	[113]
wiercenie	stal AISI 321	MoS ₂ 50-100 nm	olej słonecznikowy 120 ml/h	0,5, 1,0 oraz 1,5% mas.	Najlepsze wyniki osiągnięto dla obróbki w warunkach MQL z zastosowaniem nanocieczy o stężeniu 1,5% MoS ₂ . W powyższych warunkach w 30. otworze siła skrawania, moment obrotowy, chropowatość powierzchni obrabianej i współczynnik tarcia były niższe o 43,2%, 68,9%, 56,8% i 41,6% w porównaniu do chłodzenia zalewowego. Zastosowanie nanocieczy pozwoliło także na poprawę morfologii wiórów i zmniejszenie szybkości zużycia narzędzia.	[114]
wiercenie	stal AISI 321	nanografen gr. 5–10 nm dł. 5–10 μm	olej słonecznikowy 120 ml/h	0,5, 1,0 oraz 1,5% mas.	Wykazano, że wiercenie MQL z 1,5% wag. nanocząstek grafenu znacznie zmniejszyło siłę skrawania (27,4%), moment obrotowy (64,9%), chropowatość powierzchni (33,8%) i współczynnik tarcia (51,7%) przy 30. otworze w porównaniu z MQL z czystym olejem bazowym, a także wpłynął na poprawę trwałości ostrzy narzędzia.	[115]
frezowanie	stop aluminium Al6061-T6	MoS ₂ 20–60 nm	olej mineralny ECOCUT HSG 905S 30 ml/min	0,2, 0,5 oraz 1,0% mas.	Minimalną siłę skrawania i minimalną temperaturę skrawania uzyskano stosując odpowiednio 1 i 0,5% mas. zawiesiny nanocząstek w oleju mineralnym, przy optymalnym zestawie parametrów i zastosowaniu techniki MQL.	[116]

frezowanie	stal AISI 1045	nanopłatki grafitowe (GnP) 1 μm	olej roślinny 90 ml/h	0,1 oraz 1,0% mas.	Ogólna efektywność oleju o zawartości 0,1% mas. GnP w warunkach MQL była lepsza niż oleju o zawartości 1,0% mas. Dodatek 0,1% mas. nanocząstek GnP do oleju roślinnego poprawia kontakt narzędzia z przedmiotem obrabianym, co zmniejsza współczynnik tarcia. Przy zawartości 1,0% mas. GnP, uzyskanie równomiernie rozłożonego środka smarnego w strefie skrawania nastęrczało pewne trudności, co prowadziło do zmniejszenia skuteczności środka smarnego z dodatkiem GnP.	[117]
frezowanie	stop aluminium AA6061-T6	SiO ₂ 5–15 nm	olej mineralny 120 ml/h	0,2% mas.	Nanocząstki SiO ₂ zawieszony w oleju mineralnym podawanym w warunkach MQL poprawiają wydajność procesu obróbki poprzez zmniejszenie współczynnika tarcia i sił skrawania w porównaniu do MQL z olejem mineralnym bez dodatku nanocząstek. Energia jednostkowa i moc skrawania są mniejsze przy zastosowaniu nanocieczki w porównaniu do MQL z olejem mineralnym bez dodatku nanocząstek .	[118]
frezowanie	stop aluminium Al6061-T6	SiO ₂ 5–15 nm	olej mineralny ECOCUT SSN 322 120 ml/h	0,2, 0,5 oraz 1,0% mas.	Siłę skrawania i temperaturę skrawania można zminimalizować stosując 0,2% mas. stężenie zawiesiny nanocząstek w oleju mineralnym w warunkach MQL przy optymalnym zestawie parametrów. Najlepszą chropowatość powierzchni obrabianej można uzyskać przy większym stężeniu nanocząstek.	[119]

frezowanie	stop aluminium Al6061-T6	SiO ₂ 5–15 nm	olej mineralny ECOCUT SSN 322 67 ml/h	0,2, 0,5 oraz 1,0% mas.	Najniższą wartość siły skrawania, temperatury skrawania i chropowatości powierzchni uzyskano przy stężeniach SiO ₂ w oleju mineralnym wynoszących odpowiednio 0,2, 0 i 1,0% mas (z wykorzystaniem MQL). Ponadto stwierdzono, że zwiększanie stężenia SiO ₂ poprawia jakość powierzchni.	[120]
frezowanie	stop aluminium Al6061-T6	MoS ₂ 20–60 nm	olej mineralny ECOCUT HSG 905S 30 ml/min	0,2, 0,5 oraz 1,0% mas.	Jakość powierzchni obrabianej była lepsza w przypadku zastosowania nanocząstek o stężeniu 0,5% mas. W porównaniu z czystym olejem lub innymi stężeniami nanocząstek w warunkach MQL.	[121]
frezowanie	miękka stal	SiO ₂	SoLCUT 2 ml/min	0,1% mas.	Zastosowanie nanocieczki o stężeniu 0,1% mas. SiO ₂ w warunkach MQL pozwoliło na zmniejszenie chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego.	[122]
frezowanie	stop aluminium AA6061	TiO ₂ 40 nm	woda 28,8 ml/h 49,8 ml/h	1,5% obj.	Zużycie ostrzy narzędzia uzyskane w przypadku obróbki nanocieczą na bazie wody w warunkach MQL było zbliżone do wyniku uzyskanego przy zastosowaniu oleju przy technice MQL.	[123]
frezowanie	stop aluminium AA6061	TiO ₂ 40 nm	woda 28,8 ml/h 49,8 ml/h	1,5% obj.	Zastosowanie nanocieczki na bazie wody (MQL) powoduje mniejszy efekt wykruszania i pęknięcia krawędzi ostrzy narzędzi skrawających w porównaniu do chłodzenia zalewowego i konwencjonalnego MQL (na bazie oleju).	[124]

frezowanie	stop aluminium AA6061	TiO ₂ 40 nm	woda 39 ml/h 60 ml/h	0,5, 2,5 oraz 4,5% obj.	Zużycie narzędzia zostało zminimalizowane przy zastosowaniu nanocieczy o stężeniu 2,5% obj. TiO ₂ w warunkach MQL.	[125]
frezowanie	stal 60Si ₂ Mn	Al ₂ O ₃ 30 nm	olej sojowy, emulsja chłodząca 5% 13,8–15 ml/h	0,5% mas.	Zastosowanie cieczy z dodatkiem nanocząstek w warunkach MQL zwiększa trwałość narzędzia odpowiednio o 177% (z olejem sojowym) i 230% (z chłodziwem emulsyjnym 5%) w porównaniu do MQL bez nanocieczy. Wartości siły skrawania i chropowatości powierzchni obrabianej są mniejsze przy zastosowaniu nanocieczy.	[126]
frezowanie	stal 60Si ₂ Mn	Al ₂ O ₃ 30 nm	olej sojowy 13,8–15 ml/h	0,5, 1,0 oraz 1,5% mas.	Zwiększenie stężenia nanocząstek (MQL) obniżało temperaturę skrawania i siłę skrawania oraz wydłużało trwałość narzędzia.	[127]
frezowanie	Inconel 718	nanocząstki miedzi 60 nm	woda destylowana ze środkiem antykorozyjnym 400, 600, 800 ml/h	0,2% obj.	Modele matematyczne chropowatości powierzchni, temperatury, szybkości usuwania materiału i mocy zostały opracowane przy użyciu metodologii powierzchni odpowiedzi. Wyniki wykazały, że głębokość skrawania jest najważniejszym parametrem procesu dla MQL z czystą cieczą bazową, jak i dla cieczy z dodatkiem nanocząstek miedzi. Wyniki pokazują, że MQL z nanocieczą jest lepszą alternatywą, co skutkowało zmniejszeniem o 20,1%, 14,7% i 13,3% odpowiednio chropowatości powierzchni obrabianej, temperatury w strefie skrawania i mocy skrawania.	[128]

frezowanie	stal hartowana 60Si ₂ Mn	Al ₂ O ₃ , MoS ₂ 30 nm	emulsja, olej sojowy	1,0% mas.	Wykazano, że zastosowanie mniejszego ciśnienia powietrza i większego natężenia przepływu powietrza zmniejsza siłę skrawania i poprawia jakość powierzchni obrabianej. Nanocząstki Al ₂ O ₃ wykazują lepsze wyniki niż nanocząstki MoS ₂ .	[129]
toczenie	stal AISI 1040	kwask nanoborowy 100 nm	olej kokosowy 10 ml/min	0,25, 0,5, 0,75 oraz 1,0% mas.	Nanociecz o stężeniu 0,5% kwasu nanoborowego (MQL) wykazała lepsze wyniki w zakresie parametrów obróbki, takich jak temperatura skrawania, zużycie narzędzia i chropowatość powierzchni.	[130]
toczenie	stal AISI 1040	nano-kryształiczny grafit	olej SAE 40 600 ml/h	0,25, 0,5, 2,0, 4,0, 6,0, 8,0, 10,0% mas.	Stwierdzono, że optymalny udział wagowy środka smarnego, który należy wymieszać z medium nośnym wynosi 0,5% przy obróbce stali hartowanej w warunkach MQL.	[131]
toczenie	stal AISI 1040	nanogracit 80 nm, kwask nanoborowy (NBA) 100 nm, nano dwusiarczek molibdenu (nMoS ₂) 100 nm	ciecz na bazie wody i oleju 600 ml/h	0,3% mas.	Stwierdzono, że obróbka z zastosowaniem nanocieczy z dodatkiem nMoS ₂ w warunkach MQL pozwala na uzyskanie lepszych wyników w zakresie zużycia narzędzia, chropowatości powierzchni obrabianej i siły skrawania, a NBA wykazuje lepsze właściwości w zakresie odprowadzania ciepła.	[132]

toczenie	stal AISI 4140	SiO ₂ 5–15 nm	olej mineralny 750 ml/h	0,2, 0,5 oraz 1,0% mas.	Zastosowanie 0,5% mas. stężenia nanocząstek w oleju mineralnym pozwoliło na zminimalizowanie zużycia narzędzia i chropowatości powierzchni obrabianej przy optymalnym zestawie parametrów.	[133]
toczenie	stal AISI 1040	MoS ₂	olej kokosowy, sezamowy i rzepakowy 600 ml/h	0,25, 0,5, 0,75 oraz 1,0%	Wszystkie nanociecze wykazywały lepszą wydajność obróbki w porównaniu z toczeniem na sucho, toczeniem z chłodzeniem konwencjonalnym oraz wspomaganym czystym olejem. Zaobserwowano, że dodatek 0,5% MoS ₂ do oleju kokosowego wykazuje lepsze efekty niż inne warunki smarowania.	[134]
toczenie	stal AISI 1040	nanografit 80 nm	emulsja oleju w wodzie 600 ml/h	0,3% mas.	W porównaniu do chłodzenia zalewowego i MQL z konwencjonalną cieczą, zastosowanie MQL z nanocieczą wpłynęło na zmniejszenie siły skrawania, temperaturę skrawania, zużycie narzędzia, chropowatość powierzchni oraz poprawiło morfologię wióra.	[135]
toczenie	stal EN 48	wielościenna nanorurka węglowa	Velvex- Cutvel'S' 600 ml/h	0,3% mas.	Zastosowanie nanocieczy przyniosło znaczące korzyści w postaci zmniejszenia zużycia narzędzia i poprawy chropowatości powierzchni.	[136]
toczenie	stal AISI 4140	wielościenna nanorurka węglowa śr. 40–60 nm, dł. 6–15 μm Al ₂ O ₃ 50–70 nm	woda deminera- lizowana	1% obj. 3% obj.	Stwierdzono, że zastosowanie nanocieczy może zmniejszyć chropowatość powierzchni i składowe siły skrawania w porównaniu z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu konwencjonalnej cieczy chłodząco-smarującej. Lepsze wyniki uzyskano dla nanocieczy z wielościennymi nanorurkami węglowymi w warunkach SQL (small quantity lubrication).	[137]

toczenie	stal AISI 1045	nanografity 35 nm	LB2000 (na bazie oleju roślinnego) PriEco6000 (ester poliolu) 7,5 ml/h	0,1 oraz 0,5% mas.	Zastosowanie nanocieczy w warunkach MQL na bazie oleju z dodatkiem grafitu spowodowało zmniejszenie siły skrawania i temperatury skrawania w porównaniu z obróbką na sucho i MQL z olejem bez dodatku nanocząstek. Zaobserwowano również, że wzrost zawartości nanografity powodował zmniejszenie siły i temperatury skrawania, niezależnie od rodzaju oleju bazowego.	[138]
toczenie	stal EN24	nanocząstki miedzi	glikol etylenowy	1g/250 ml glikolu	Zastosowanie nanocieczy w warunkach MQL z dodatkiem nanocząstek miedzi zmniejszyło chropowatość powierzchni, zużycie powierzchni bocznej oraz zminimalizowało powstawanie wiórów piłowych.	[139]
toczenie	stal AISI 1040	Al ₂ O ₃ 45 nm	emulsja olej roślinny + woda 50 ml/min	1,0% obj.	Stwierdzono, że efektywność nanocieczy z dodatkiem Al ₂ O ₃ w warunkach MQL jest lepsza pod względem chropowatości powierzchni, zużycia narzędzia, siły skrawania i morfologii wiórów w porównaniu z obróbką na sucho, obróbką na mokro przy użyciu konwencjonalnego płynu obróbkowego i MQL przy użyciu konwencjonalnego płynu obróbkowego.	[140]
toczenie	stal narzędziowa AISI O1	MoS ₂ 60–80 nm	olej rycynowy 70 ml/h	0,5% mas.	Wyniki dowiodły, że zastosowanie MQL z nanocieczą zwiększyło trwałość narzędzia o 15–49% przy lepszym wykończeniu powierzchni w porównaniu do obróbki na sucho i chłodzenia zalewowego.	[141]

toczenie	Inconel 718	wielościenna nanorurka węglowa śr. 12–20 nm, dł. 10–30 μm Al_2O_3 20 nm	ECOLUBRIC E200 40 ml/h	2,0 oraz 4,0% mas.	Obie nanociecze zapewniły lepszą jakość powierzchni obrabianej i mniejsze zużycie energii w procesie skrawania. Wykazano również, że procent wagowy nanododatków ma istotny wpływ na chropowatość powierzchni obrabianej i zużycie energii w przypadku obu rodzajów nanocząstek.	[142]
toczenie	Inconel 625	wielościenna nanorurka węglowa śr. 10–15 nm, dł. 1–5 μm	olej sojowy 75 ml/h	1,0% mas.	Zużycie narzędzia zmniejszyło się odpowiednio o 18,17% i 4,54% dzięki zastosowaniu nanocieczy w warunkach minimalnego smarowania (NMQL) w porównaniu do obróbki na sucho i skrawania z chłodzeniem zalewowym. Wartość parametru chropowatości powierzchni R_a po obróbce w warunkach NMQL była o 55,58% i 5,48% mniejsza w porównaniu z wartościami uzyskanymi odpowiednio po obróbce na sucho i w warunkach konwencjonalnego chłodzenia zalewowego.	[143]
toczenie	aluminium AA 2024 T3	MoS_2 80 nm	olej mineralny 100 ml/h	0,6% obj.	Zastosowanie nanocieczy w warunkach MQL pozwoliło na znaczną poprawę chropowatości powierzchni i zmniejszenie maksymalnej temperatury skrawania w porównaniu do obróbki na sucho oraz w warunkach MQL z czystą cieczą bazową. Zastosowanie nanocieczy pozwoliło także na eliminację narostów na narzędziu skrawającym i zmniejszenie zużycia krawędzi skrawającej.	[144]

toczenie	stop aluminium AL319	TiO ₂	konwencjonalne chłodziwo	0,5, 1,0 oraz 1,5% obj.	Stwierdzono, że najniższą temperaturę w strefie skrawania i chropowatość powierzchni obrabianej uzyskano dla MQL z cieczą z dodatkiem 1,5% TiO ₂ . Ponadto wykazano, że pod względem chropowatości powierzchni, temperatury w strefie skrawania i zużycia narzędzia zastosowanie cieczy z dodatkiem TiO ₂ w warunkach MQL pozwala uzyskać lepsze efekty obróbki niż obróbka na sucho i obróbka w warunkach MQL z zastosowaniem czystej cieczy bazowej.	[145]
toczenie	stal AISI 304	MoS ₂ 10–20 nm wielościennie nanorurki węglowe (MWCNT) śr. 9,5 nm dł. 1,5 μm nanografen gr. 5–8 nm śr. 5–10 μm MoS ₂ +MWCNT MoS ₂ +nanogra- fen	olej roślinny 30 ml/h	0,1% mas. 0,5%+0,5% mas.	Badano wpływ warunków skrawania na wydajność procesu skrawania. Badanie przeprowadzono dla obróbki na sucho, w warunkach MQL z czystą cieczą bazową, MQL z dodatkiem cząstek MoS ₂ , MQL z dodatkiem (MWCNT), MQL z dodatkiem nanografenu, hybrydowego MQL z dodatkiem MoS ₂ i MWCNT oraz hybrydowego MQL z dodatkiem MoS ₂ i nanografenu. Wykazano, że chropowatość powierzchni, siła skrawania i temperatura w strefie skrawania, a także zużycie powierzchni przyłożenia VB były najniższe w przypadku obróbki w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy z dodatkiem nanografenu.	[146]

toczenie	żeliwo sferoidalne hartowane ADI grade 2	Al ₂ O ₃ 18 nm	ECOLUBRIC E200 40 ml/h	4,0% mas.	Zastosowanie MQL z nanocieczą zapewniło znaczną poprawę zużycia narzędzi w porównaniu z MQL z zastosowaniem cieczy bez nanododatków.	[147]
toczenie	stal AISI 4340	Al ₂ O ₃ , CuO	olej z otrębów ryżowych 150 ml/h	0,1%	Badano wpływ prędkości skrawania, głębokości skrawania i posuwu, na siłę skrawania, chropowatość powierzchni, zużycie narzędzia. Zastosowanie nanocieczы z dodatkiem CuO jako płynu obróbkowego zapewnia mniejszą chropowatość powierzchni obrabianej przy niewielkim zużyciu narzędzia w porównaniu z nanocieczą z dodatkiem Al ₂ O ₃ .	[148]
toczenie	stal AISI 4340	ZnO, CuO, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	woda demineralizowana 150 ml/h	0,1% obj.	Najlepsze wyniki pod względem morfologii obrabianej powierzchni, kształtu wióra, jakości powierzchni, zużycia powierzchni przyłożenia, mikrotwardości i naprężeń szczątkowych uzyskano podczas obróbki z zastosowaniem nanocieczы z dodatkiem tlenku miedzi jako chłodziwa. (MQL)	[149]

1.3.2. Obróbka stopów tytanu w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy z dodatkiem mikro- i nanocząstek

Szerokie zastosowanie i jednocześnie ograniczona skrawalność stopów tytanu sprawiają, że są one przedmiotem wielu badań. Wzrost świadomości ekologicznej i zdrowotnej prowadzi natomiast do poszukiwań rozwiązań przyjaznych środowisku i jednocześnie efektywnych, które mogą zastąpić konwencjonalną obróbkę stopów tytanu. Przykładem takiego nurtu jest obróbka stopów tytanu w warunkach MQL z wykorzystaniem nanocieczy chłodząco-smarujących.

Gupta i inni [150] ocenili wydajność obróbki stopu tytanu (grade-2) w warunkach MQL z wykorzystaniem nanocieczy podczas procesu toczenia. Do przygotowania nanocieczy wykorzystano trzy różne rodzaje nanocząstek: tlenek glinu (Al_2O_3), dwusiarczek molibdenu (MoS_2) oraz grafit o średniej średnicy 40 nm. Olejem bazowym był olej roślinny, a stężenie nanocząstek wynosiło 3% mas. Zastosowano następujące parametry MQL: ciśnienie powietrza 0,5 MPa i wydatek nanocieczy 30 ml/h. Minimalną wartość siły skrawania, zużycie narzędzia, chropowatość powierzchni i temperaturę skrawania uzyskano dla nanocieczy z dodatkiem nanocząstek grafitu przy optymalnym zestawie parametrów. Na podstawie analizy mikrostruktury warstwy wierzchniej po obróbce zaobserwowano również, że podczas stosowania nanocieczy na bazie grafitu wytworzona została drobniejsza struktura laminarna w porównaniu do dwóch pozostałych nanocieczy.

Hegab i inni [151] badali efektywność zastosowania cieczy chłodząco-smarującej z dodatkiem wielościennych nanorurek węglowych (MWCNT) w warunkach minimalnego smarowania (MQL) podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V. Średnia średnica MWCNT wynosiła od 13 do 20 nm, natomiast długość od 10 do 30 μm . Nanociecze przygotowano w stężeniach 0,2 i 4% mas. Olejem bazowym był ECOLUBRIC E200 – olej roślinny. Parametry systemu MQL zostały dobrane następująco: ciśnienie powietrza 0,5 MPa, wydatek cieczy 40 ml/h. Najlepszą jakość powierzchni uzyskano dla nanocieczy MQL o stężeniu 2% mas. przy optymalnym zestawie parametrów. Zużycie narzędzia zostało znacznie zmniejszone przy zastosowaniu nanocieczy. Zaobserwowano również mniejszą grubość wióra po zastosowaniu nanocieczy z dodatkiem MWCNT.

Gupta i Sood [152] badali wpływ trzech różnych nanocieczy na chropowatość powierzchni obrabianej podczas toczenia stopu tytanu (grade-2). Nanocząstkami użytymi do eksperymentu były: tlenek glinu (Al_2O_3), dwusiarczek molibdenu (MoS_2) oraz grafit o średniej średnicy 40 nm. Nanociecze sporządzono na bazie oleju roślinnego w stężeniu 3% mas. Nanociecze podawane były w warunkach MQL – wydatek cieczy 30 ml/h i ciśnienie powietrza 0,5 MPa. Stwierdzono, że wartości parametrów chropowatości powierzchni zmniejszają się wraz ze zmianą nanocieczy z nanocieczy na bazie tlenku glinu na nanociecze na bazie grafitu.

Kishawy i inni [153] przeprowadzili badania nanocieczy na bazie oleju roślinnego (ECOLUBRIC E200) podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL (wydatek cieczy

40 ml/h i ciśnienie powietrza 0,5 MPa). Do przygotowania nanocieczy użyto nanocząstek Al_2O_3 (średnia średnica równa 22 nm) w stężeniach 0,0, 2,0 i 4,0% mas. Zaobserwowano, że obróbka z zastosowaniem nanocieczy MQL charakteryzowała się lepszymi wynikami w zakresie zużycia narzędzia, chropowatości powierzchni obrabianej oraz mocy skrawania.

Kim i inni [154] przeprowadzili serię eksperymentów mikro-frezowania walcowo-czołowego stopu tytanu Ti-6Al-4V. Do badań wykorzystano nanociecz MQL z dodatkiem cząstek nanodiamentu (ND), o średniej wielkości 35 nm, oraz chłodzenie gazem CO_2 . Parametry chłodzenia MQL zostały dobrane następująco: wydatek cieczy 10 ml/h, ciśnienie powietrza 0,15 MPa. Nanociecze zostały przygotowane poprzez dodanie cząstek nanodiamentu do oleju roślinnego o stężeniach wagowych odpowiednio 0,1, 0,5 i 1,0% mas. Stwierdzono, że zarówno nanociecz MQL jak i chłodzenie gazem CO_2 są skuteczne w redukcji siły frezowania, współczynnika tarcia, chropowatości powierzchni i zużycia ostrzy narzędzia skrawającego.

Gaurav i inni [155] ocenili wydajność obróbki pod względem siły skrawania, zużycia ostrzy narzędzia skrawającego i chropowatości powierzchni podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V. Badania przeprowadzono dla pięciu środowisk skrawania: toczenie na sucho, MQL z czystymi cieczami bazowymi: olej jojoba i olej mineralny LRT 30, MQL z nanocieczami. Nanociecze sporządzono dodając do cieczy bazowych siarczek molibdenu MoS_2 (średnia średnica wynosiła 80-100 nm) w stężeniach 0,1, 0,5 i 0,9% mas. Parametry MQL były następujące: wydatek cieczy 60 ml/h, ciśnienie powietrza 0,6 MPa. Wyniki pokazują, że olej jojoba, w stanie czystym i z dodatkiem nanocząstek jest dobrym zamiennikiem dostępnego na rynku oleju mineralnego do toczenia MQL. Stwierdzono, że toczenie MQL z olejem jojoba + MoS_2 (0,1%) powoduje zmniejszenie siły skrawania, chropowatości powierzchni obrabianej i zużycia ostrzy narzędzia w zakresie 35-47%.

Hegab i inni [156] zbadali wpływ dodatku wielościennych nanorurek węglowych (MWCNT, średnia średnica 13–20 nm, średnia długość 10–30 μm) do oleju roślinnego (ECOLUBRIC E200) na wydajność procesu toczenia stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL (wydatek cieczy 40 ml/h, ciśnienie powietrza 0,5 MPa). Badanymi zmiennymi procesu były prędkość skrawania, prędkość posuwu i procentowy udział masowy nanododatków (2% i 4%). Stwierdzono, że nanociecz o stężeniu 2% wag. MWCNT zmniejszył zużycie energii skrawania o 11,5% w porównaniu z badaniami wykonanymi bez nanododatków oraz zmniejszyło zużycie powierzchni przyłożenia o 45%.

Singh i inni [157] analizowali wpływ hybrydowej nanocieczy na przebieg toczenia stopu tytanu grade 5. Hybrydowa nanociecz została opracowana poprzez zmieszanie w stałej proporcji objętościowej (50:50) nanocząstek grafitu (średni rozmiar 25–35 nm) i talku (średni rozmiar 20–40 nm) w czystym oleju kokosowym w stężeniach 0,25, 0,75 i 1,25% obj. Hybrydowa nanociecz podawana była w warunkach MQL z wydatkiem 2,5 ml/min i z ciśnieniem powietrza 0,4 MPa. Dzięki zastosowaniu

hybrydowej nanocieczy uzyskuje się znaczne zmniejszenie siły skrawania i chropowatości powierzchni w porównaniu z czystym olejem kokosowym odpowiednio o 21,19% i 18,9%.

Nguyen i inni [158] przeprowadzili eksperyment frezowania stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL. Ciecze zastosowane w warunkach MQL to czysty olej rzepakowy oraz olej rzepakowy wzbogacony o dodatek nanopłatków grafenowych xGnP, o średnicy mniejszej niż 2 μm i grubości kilku nanometrów. Ciecze zostały przygotowane w stężeniach 0,1, 1,0 i 5,0% mas. Parametry systemu MQL były następujące: wydatek cieczy 1,5 ml/min, ciśnienie powietrza 551,15 kPa. Wykazano, że nanopłatki obecne w oleju MQL zmniejszyły zużycie powierzchni przyłożenia i poprawiły trwałość ostrzy narzędzia skrawającego w porównaniu z tradycyjnym MQL z czystym olejem, a także obróbką na sucho. Obecność nanopłatków zmniejsza mikrowykruszanie i pękanie narzędzia spowodowane efektem uderzenia w obróbce przerywanej.

Zaman i inni [159] zbadali wpływ prędkości skrawania, posuwu, głębokości skrawania, stężenia nanocząstek i typu narzędzia skrawającego na temperaturę skrawania i chropowatość powierzchni podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem hybrydowej nanocieczy. Hybrydowa nanociecz o stężeniach 0,5, 1,0 i 1,5% została przygotowana poprzez zdyspergowanie 80% Al_2O_3 i 20% MWCNT w oleju bazowym VG68. Wielkość nanocząstek Al_2O_3 wynosiła <50 nm, podczas gdy MWCNT miały średnicę wewnętrzną 3–5 nm, średnicę zewnętrzną 8–15 nm i długość 3–12 μm . Ciecz podawana była z wydatkiem 50 ml/h, natomiast ciśnienie powietrza wynosiło 2 MPa. Do eksperymentów wykorzystano projekt eksperymentu Boxa-Behnkena. Następnie, w oparciu o dane eksperymentalne, sformułowano modele empiryczne metodą Response Surface Methodology (RSM) dla obu odpowiedzi. Wszystkie modele okazały się istotne ($p < 0,05$) i wysoce akceptowalne ($R^2 > 90\%$), natomiast brak dopasowania modeli okazał się nieistotny ($p > 0,05$). Funkcja celu została wykorzystana do znalezienia odpowiedniej kombinacji danych wejściowych procesu w celu minimalizacji temperatury skrawania i chropowatości powierzchni, indywidualnie i jednocześnie.

Anandan i inni [160] zbadali wpływ prędkości skrawania, posuwu, głębokości skrawania i warunków obróbki na chropowatość powierzchni, temperaturę i zużycie ostrzy narzędzia skrawającego podczas toczenia stopu tytanu grade 2. Warunki w jakich prowadzona była obróbka to: chłodzenie zalewowe, chłodzenie MQL z olejem z orzeszków ziemnych i MQL z nanocieczą (1g nanocząstek srebra zmieszano z 250 ml glikolu etylenowego). Do określenia optymalnych warunków w procesie toczenia wykorzystano analizę składowych głównych (PCA – ang. Principal Component Analysis). Zauważono, że kluczowym parametrem przy definiowaniu odpowiedzi jest środowisko obróbki. Zastosowanie cieczy z dodatkiem nanocząstek srebra pozwoliło na obniżenie parametrów chropowatości powierzchni, temperatury w strefie skrawania i zużycia narzędzia w porównaniu do chłodzenia zalewowego i MQL z olejem z orzeszków ziemnych.

Eltagaz i inni [161] badali wpływ zastosowania nanocieczy w warunkach MQL na zużycie ostrzy narzędzia skrawającego, jakość powierzchni i zużycie energii podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V. Jako nanododatki zastosowano nanocząstki tlenku glinu Al_2O_3 , o średniej średnicy równej 22 nm, w stężeniach wagowych 0,0, 2,0 i 4,0%. Nanociecz podawana była z wydatkiem 40 ml/h i ciśnieniem powietrza 0,5 MPa. Zaobserwowano, że przy MQL z czystą cieczą bazową występowała znaczna adhezja materiału na powierzchni natarcia narzędzia, podczas gdy adhezja była zmniejszona w obecności nanocieczy MQL na granicy narzędzie-wiór, co wskazuje na zmniejszenie długości kontaktu wióra i narzędzia. Wyniki wskazują, że wzrost koncentracji nanocząstek pozytywnie wpływa na trwałość narzędzia i jakość powierzchni.

Sahoo i Datta [162] analizowali wpływ zastosowania biodegradowalnego oleju jatropha z dodatkiem nanopłatków grafenowych (o długości 5–10 μm) w warunkach MQL na przebieg toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V. Stężenie masowe nanopłatków grafenowych w oleju bazowym wynosiło 0,1%. W przypadku MQL z czystym olejem bazowym i MQL z nanocieczą morfologia zużycia narzędzia wykrywa istnienie „stref nienaruszonych”, co wskazuje na utrzymywanie silnej hydrodynamicznej warstwy tribofilmowej płynu obróbkowego, chroniąc w ten sposób płytkę skrawającą przed zużyciem. Dla prędkości skrawania do 82 m/min, MQL z cieczą z dodatkiem nanocząstek powodowało mniejsze zużycie powierzchni przyłożenia narzędzia niż obróbka na sucho i MQL z czystym olejem. Przy MQL z nanocieczą uzyskano doskonałe wykończenie powierzchni przy prędkości skrawania do 106 m/min.

1.4. Wnioski z analizy literatury

Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy literatury można sformułować następująco:

1. Zastosowanie smarowania minimalną ilością cieczy (MQL) podczas obróbki skrawaniem prowadzi do polepszenia wskaźników jakościowych procesu skrawania – zmniejszenia siły skrawania oraz parametrów chropowatości powierzchni po obróbce, wydłużenia trwałości ostrza, zmniejszenia momentu obrotowego i mocy skrawania, obniżenia temperatury skrawania oraz poprawy kształtu wiórów – w porównaniu do obróbki na sucho.
2. Rodzaj cieczy zastosowany podczas obróbki skrawaniem w warunkach MQL ma istotny wpływ na wskaźniki jakościowe procesu.
3. Wzbogacenie cieczy zastosowanej w warunkach MQL o dodatek nano- lub mikrocząstek, takich jak: siarczku molibdenu MoS_2 , nanorurek węglowych (MWCNT), nanocząstek tlenku glinu (Al_2O_3), nanopłatków grafenowych, nanosrebra, nanodiamentu, nanocząstek grafitu w stężeniach 0,1–4,5% może wywierać istotny wpływ na wskaźniki jakościowe procesu skrawania. Polepszenie wskaźników jakościowych procesu skrawania obserwowano dla niższych stężeń – do około 2%, dalsze zwiększanie stężenia

nanododatków w cieczy bazowej nie prowadziło w większości badań do dalszego polepszania wskaźników jakościowych procesu.

4. Stosunkowo niewiele prac poświęconych jest badaniom wpływu nanocieczy zastosowanych w warunkach MQL na przebieg obróbki skrawaniem stopów tytanu.
5. Brak jest w dotychczasowych badaniach analizy wpływu cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego na przebieg obróbki skrawaniem w warunkach MQL.
6. Mając na uwadze cele poznawcze oraz aplikacyjne, istnieje potrzeba analizy wpływu cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego na przebieg toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V oraz zamodelowania zależności pomiędzy parametrami nastawnymi procesu (stężenie mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego, posuw i prędkość skrawania) a składowymi całkowitej siły skrawania oraz wybranymi parametrami chropowatości powierzchni podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Analiza literatury wykazała, że stopy tytanu, ze względu na swoje właściwości, znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle. Jednocześnie te same właściwości sprawiają, że stopy te uznawane są za trudnoskrawalne. Z drugiej strony, rosnąca świadomość ekologiczna dąży do zmniejszenia szkodliwych oddziaływań obróbki skrawaniem na ludzi i na środowisko. Jednym z trendów rysujących się w literaturze jest obróbka w warunkach MQL, która pozwala na polepszenie skrawalności m.in. stopów tytanu, jednocześnie minimalizując negatywne konsekwencje dla ludzi i środowiska. Aby jeszcze lepiej wykorzystać potencjał obróbki w warunkach minimalnego smarowania, do cieczy bazowych dodawane są różnego rodzaju mikro- i nanocząstki, o przewodności cieplnej znacznie przewyższającej przewodność cieplną cieczy bazowej, które poprzez odprowadzenie ciepła ze strefy obróbki oraz zmniejszenie współczynnika tarcia pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym i wiórem mają na celu polepszenie skrawalności materiałów konstrukcyjnych, w tym także stopów tytanu.

2.1. Cel pracy

Za cel pracy przyjęto:

1. określenie wpływu dodatku mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego o różnym stężeniu w różnych, biodegradowalnych cieczach bazowych, na wybrane wskaźniki skrawalności stopu tytanu Ti-6Al-4V i stan technologicznej warstwy wierzchniej, w procesie toczenia wykończeniowego w warunkach MQL oraz
2. analizę oddziaływań i modelowanie związków pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem i masowym stężeniem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej, a składowymi siły skrawania oraz parametrami chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego S_a i S_z .

2.2. Hipoteza naukowa pracy

Na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy sformułowano hipotezy badawcze pracy, zgodnie z którymi:

1. Dodatek mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego do cieczy bazowej podczas toczenia wykończeniowego w warunkach MQL może oddziaływać korzystnie na wybrane wskaźniki skrawalności stopu tytanu Ti-6Al-4V w wybranych obszarach technologicznych, bez pogorszenia stanu technologicznej warstwy wierzchniej;
2. Możliwe jest zamodelowanie związków pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem oraz masowym stężeniem dodatku mikrometrycznego

proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej, a składowymi siły skrawania oraz parametrami chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego Sa i Sz .

2.3. Zakres pracy

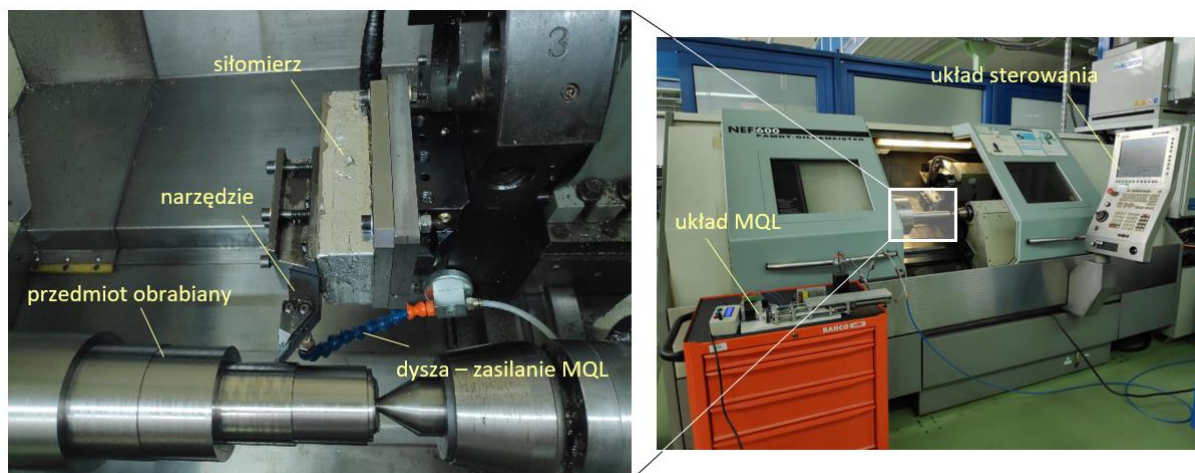
Zakres pracy niezbędnej do osiągnięcia wyznaczonego celu oraz potwierdzenia sformułowanych hipotez badawczych obejmował:

- przeprowadzenie badań wstępnych mających na celu określenie efektywnego sposobu doprowadzenia mgły olejowej do strefy skrawania,
- badania nad ustaleniem wartości wydatku cieczy chłodząco-smarującej do dalszych badań,
- badania mające na celu wyłonienie dwóch cieczy bazowych, do których w badaniach zasadniczych będzie dodawany mikrometryczny proszek z grafitu płatkowego,
- opracowanie konstrukcji i budowę systemu MQL umożliwiającego podawanie cieczy chłodząco-smarującej z dodatkiem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego oraz precyzyjne ustawianie wydatku cieczy chłodząco-smarującej niezależnie od lepkości cieczy i stężenia dodatków,
- badanie wpływu stężenia mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w dwóch cieczach bazowych na trwałość narzędzia skrawającego,
- badanie oddziaływania stężenia mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w dwóch cieczach bazowych na kształtowanie geometrii wiórów,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych na podstawie opracowanych planów badawczych,
- modelowanie związków pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem oraz masowym stężeniem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczach bazowych, a składowymi siły skrawania i parametrami chropowatości powierzchni Sa i Sz , oraz analiza uzyskanych wyników,
- podsumowanie badań oraz sformułowanie wniosków końcowych.

3. WARUNKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

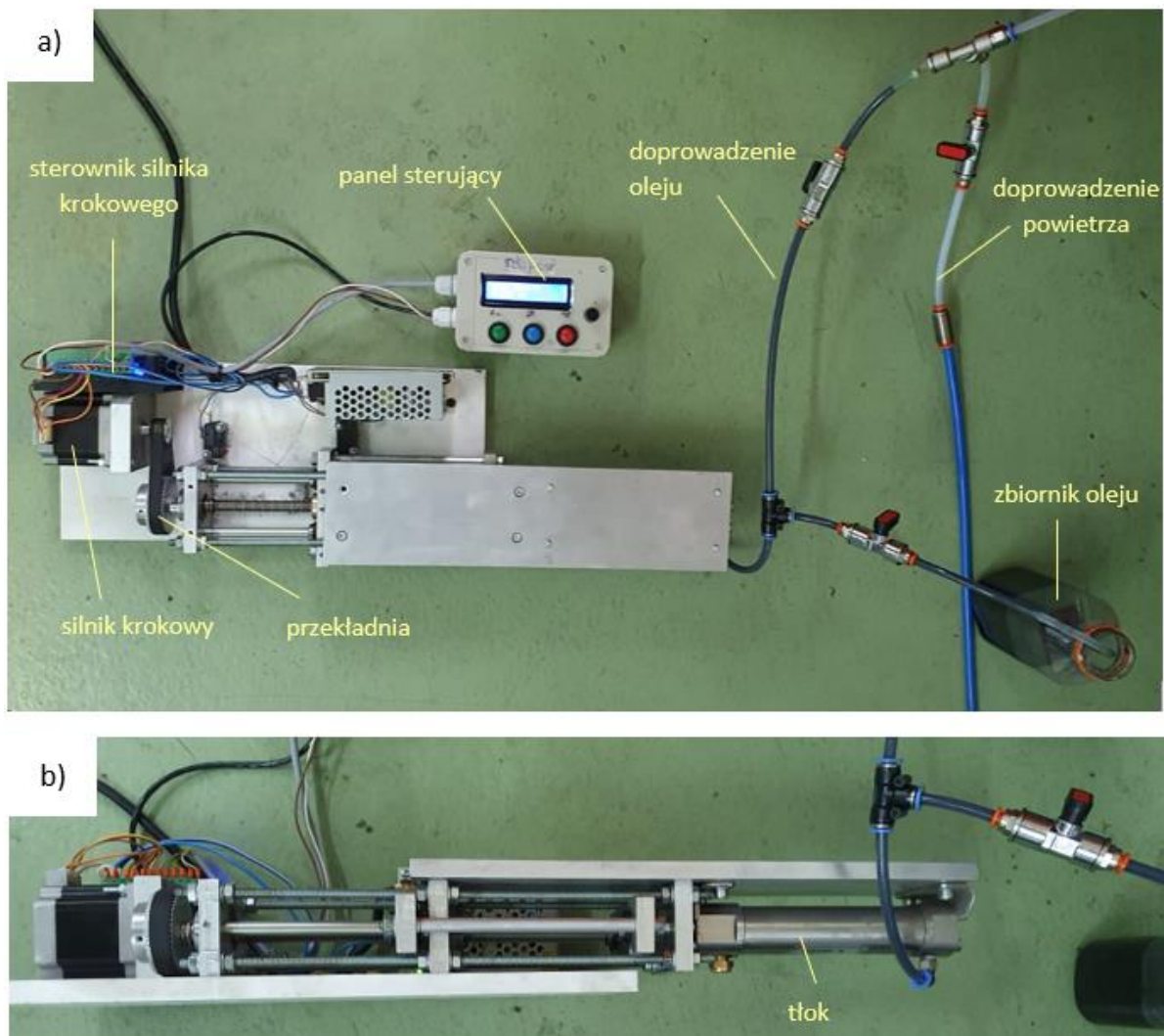
3.1. Stanowisko badawcze i układy pomiarowe

Badania zrealizowano w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej oraz w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji. Badania doświadczalne toczenia w warunkach MQL zrealizowano z zastosowaniem tokarki NEF 600 z autorskim układem zasilania MQL (rys. 3.1).



Rys. 3.1 Konfiguracja stanowiska roboczego.

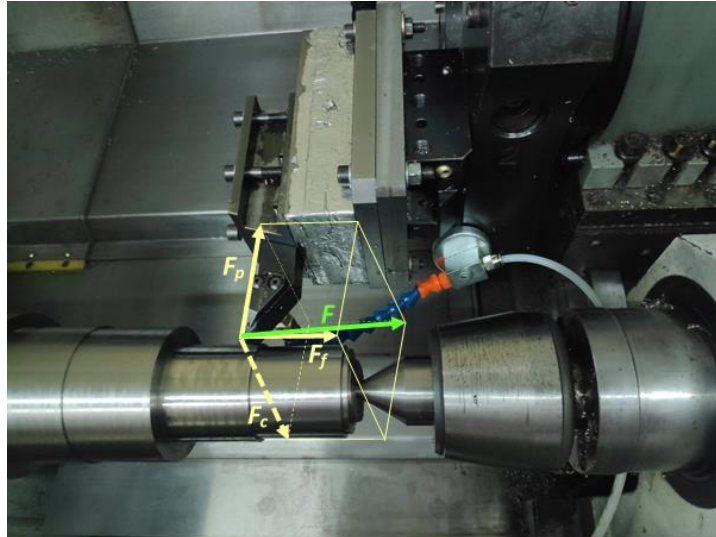
Do wytworzenia mgły olejowej, w pierwszym etapie badań, wykorzystano 1 modułowy agregat Miquel Base-i ze zbiornikiem o pojemności 1 litra. Ponieważ wydatek oleju w tym systemie był uzależniony od jego lepkości, każdorazowa wymiana oleju wiązała się z koniecznością ponownego ustawiania wydatku, co było zajęciem czasochłonnym i utrudniało zapewnienie stabilności badań. Dodatkowo dodatek mikroproszku grafitowego prowadził do zatykania zaworów i ograniczał lub uniemożliwiał przepływ oleju. Dlatego też, na potrzeby badań zasadniczych zaprojektowano i wykonano układ, który zapewnia utrzymanie wydatku oleju na stałym poziomie niezależnie od lepkości oleju oraz pozwala na stosowanie cieczy z dodatkiem mikroproszku grafitowego o różnym stężeniu (rys. 3.2). Wymagana wartość wydatku deklarowana jest na panelu sterującym, na tej podstawie sterownik silnika krokowego zapewnia poprzez przekładnię ruch tłoka. Ciecz chłodząco-smarująca doprowadzana jest do dyszy poprzez przewód wewnętrzny. Przewodem zewnętrznym doprowadzane jest sprężone powietrze. Mieszanie cieczy i sprężonego powietrza, a tym samym wytworzenie mgły olejowej, następuje na wylocie dyszy.



Rys. 3.2 Układ do wytwarzania mgły olejowej a) widok od góry, b) widok od boku.

Pomiary składowych całkowitej siły skrawania wykonano za pomocą siłomierza Kistler 9257B. Całkowita siła skrawania (siła wypadkowa) działająca na narzędzie skrawające może zostać rozłożona na trzy wzajemnie prostopadłe składowe (rys. 3.3). Składowa F_c , nazywana główną siłą skrawania lub siłą obwodową, działa na powierzchnię natarcia narzędzia prostopadle do powierzchni podstawowej P_r , w kierunku prędkości skrawania. Składowa siły działająca na narzędzie równoległe do kierunku posuwu jest określana jako siła posuwowa F_f . Siła ta działa prostopadle do głównej siły skrawania F_c . Trzecią składową całkowitej siły skrawania, mającą tendencję do odpychania narzędzia od przedmiotu obrabianego w kierunku promieniowym, jest siła odporowa F_p .

Wraz ze wzrostem zużycia narzędzia podczas skrawania, rosną także poszczególne składowe całkowitej siły skrawania. Pomiar tych składowych pozwolił na nadzór nad stopniem zużycia narzędzia oraz zatrzymanie procesu w chwili przekroczenia kryterium zużycia narzędzia (po uprzednim skorelowaniu wartości składowych całkowitej siły skrawania z wartościami wskaźnika zużycia narzędzia).



Rys. 3.3 Składowe całkowitej siły skrawania działającej na narzędzie skrawające podczas toczenia.

Do pomiarów topografii powierzchni obrabianej oraz parametrów chropowatości 3D zastosowano mikroskop różnicowania ogniskowej Infinite Focus firmy Alicona. Analizę topografii powierzchni, która obejmowała usuwanie szumów, filtrację profilu kształtu, obrazowanie za pomocą map 3D, wyznaczanie wybranych parametrów chropowatości powierzchni oraz ich ocenę statystyczną, przeprowadzono za pomocą oprogramowania Alicona IFM 3.3.1.5.

Pomiary zużycia ostrza narzędzia skrawającego realizowano za pomocą mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ 1000 przy użyciu oprogramowania NIS-Elements AR.

3.2. Materiał obrabiany

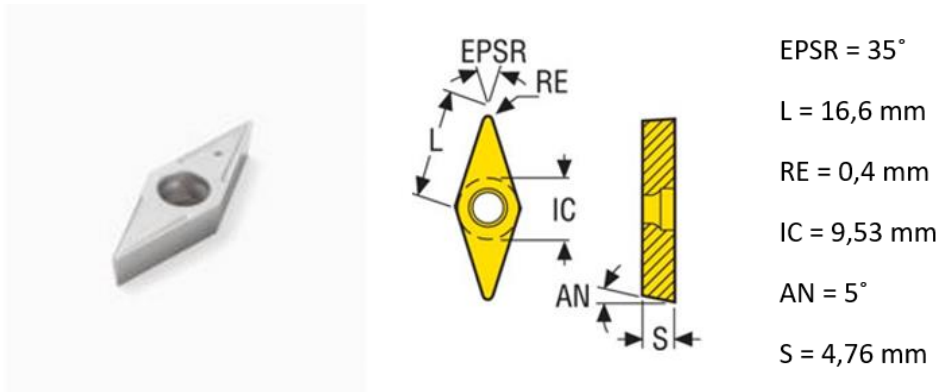
Obrabiano stop tytanu Ti-6Al-4V o strukturze dwufazowej ($\alpha+\beta$). Jest to jeden z powszechnie stosowanych gatunków w przemyśle lotniczym i elektrycznym. Skład chemiczny stopu przedstawiono w tabeli 3.1 na podstawie świadectwa kontroli dostarczonego przez producenta wykonanego zgodnie z normą EN 10204:04. Próbki do badań dostarczono w postaci prętów o średnicy $\phi 100$ mm.

Tabela 3.1 Skład chemiczny stopu Ti-6Al-4V.

Pierwiastek	Ti	C	Fe	N	Al	O	V	H	Y	Inne
Udział, % masowy	reszta	0,0111	0,105	0,0065	6,41	0,176	4,17	0,0015	-	<0,40

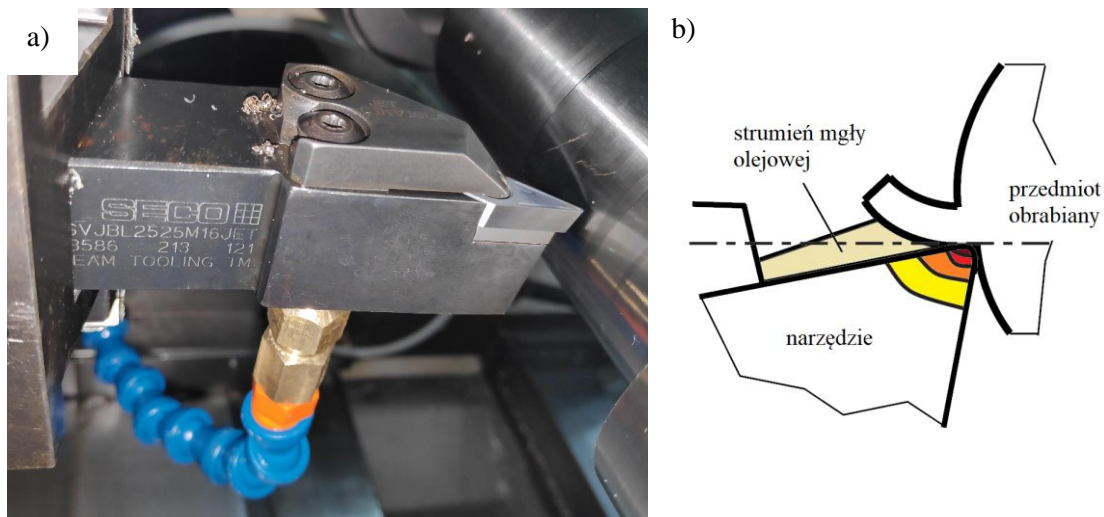
3.3. Narzędzie użyte do badań

Do badań zastosowano narzędzie z płytką skrawającą rombową VBGT160404-M3 wykonaną z niepokrywanego węgliką spiekanego HX (rys. 3.4). Ponieważ badania miały charakter porównawczy, zastosowanie niepokrywanego węgliką miało na celu zminimalizowanie oddziaływania powłoki na etapy zużycia narzędzia, a tym samym zmniejszenie zakłóceń w trakcie pomiarów.



Rys. 3.4 Charakterystyka płytki skrawającej użytej do badań VBGT160404-M3.

Do mocowania płytki skrawającej zastosowano oprawkę SVJBL2525M16 JET (rys. 3.5). Posiada ona możliwość wewnętrznego doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej lub mgły olejowej w kierunku powierzchni natarcia poprzez specjalnie przygotowane kanały wewnętrzne.



Rys. 3.5 a) oprawka narzędziowa SVJBL2525M16 JET, b) schemat podawania mgły olejowej.

3.4. Oleje zastosowane na ciecze bazowe z dodatkami funkcyjnymi oraz charakterystyka mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego

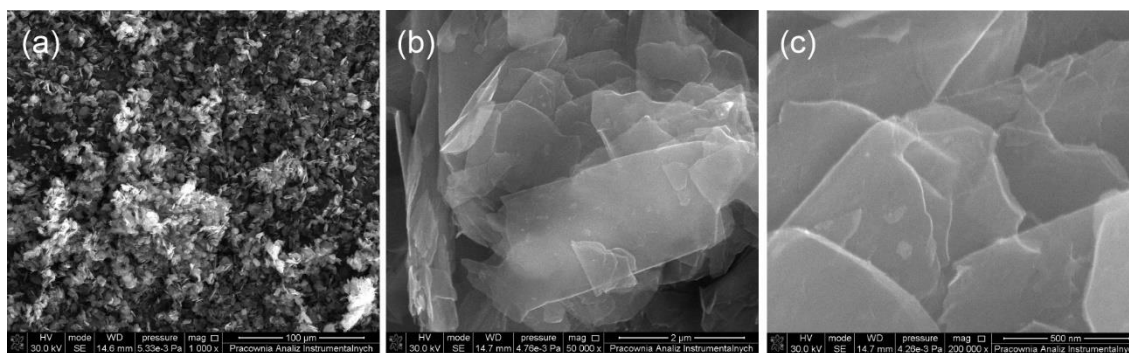
Ciecze zastosowane w badaniach składały się z oleju bazowego oraz dodatków funkcyjnych. Niekwestionowaną innowacją tych składów jest zastosowanie w miejsce powszechnie stosowanych węglowodorowych baz olejowych lub czystych olejów pochodzenia roślinnego, substancji otrzymanych na drodze syntezy chemicznej. Tego rodzaju substancje mogą zostać zaliczone jako bazy syntetyczne. Do badań zasadniczych wybrano dwie różne substancje (diestry): adypinian bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalan bis(2-etyloheksylu).

Dodatki funkcyjne zastosowane w badanych środkach smarnych to:

- dodatek EP/AW dedykowany do biodegradowalnych olejów smarowych o doskonałych właściwościach przeciwzużyciowych, przeciwzatarciowych oraz antyoksydacyjnych,
- dodatek antystatyczny mający na celu zwiększenie zwilżalności oraz poprawę zdolności przechodzenia olejów w stan aerozoli po wprowadzeniu ich w strugę sprężonego powietrza.

Ciecze bazowe zostały dodatkowo wzbogacone mikrometrycznym proszkiem z grafitu płatkowego w różnych stężeniach oraz dyspergatorem mającym na celu spowolnienie sedymentacji tego mikroproszku. Zastosowano mikrometryczny proszek z grafitu płatkowego C4N-98 (uziarnienie 3000 mesh, zawartość węgla 96%) określanej jako GMP (graphite micro-powder), dostarczony przez Instytut Technologii Węglowych Sp. z o.o. (Toruń, Polska).

Morfologia GMP została przedstawiona na rys. 3.6. Na obrazie SEM o małym powiększeniu (rys. 3.6 a)) widoczny jest jednorodny rozkład wielkości ziarna. Średni rozmiar boczny GMP wynosi $6 \pm 2 \mu\text{m}$. Uśredniona grubość płytki wynosi około 50 nm (oszacowana na podstawie poszerzenia refleksu (002) w XRD z równania Scherrera). Struktura płytkowa zastosowanego mikroproszku grafitowego staje się widoczna przy dużym powiększeniu (rys. 3.6 b), c)). Zastosowanie cząstek wielkości kilku mikrometrów w miejsce cząstek o rozmiarach nanometrycznych pozwala uniknąć problemu wnikanía tych cząstek do organizmu człowieka poprzez wdychanie i przenikanie przez skórę.



Rys. 3.6 Obrazy SEM GMP w różnych powiększeniach: a) 1000x, b) 50 000x, c) 200 000x.

Składy chemiczne próbek badawczych dobrano tak, aby lepkość kinematyczna w temp. 40°C wynosiła 30–40 mm²/s. Tabela 3.2 przedstawia składy poszczególnych cieczy chłodząco-smarujących wykorzystywanych podczas badań.

Tabela 3.2 Składy poszczególnych cieczy chłodząco-smarujących wykorzystywanych podczas testów.

Oznaczenie cieczy	Skład cieczy
A1G0	Adypinian bis(2-etyloheksylu) 50% Diester 50%
A2G0	Adypinian bis(2-etyloheksylu) 46% Diester 46% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4%
A3G0	Adypinian bis(2-etyloheksylu) 62% Diester 30% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4%
A3G15	Adypinian bis(2-etyloheksylu) 61,65% Diester 30% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4% Dyspergator 0,2% Mikroproszek grafitowy C4N-98 0,15%
A3G30	Adypinian bis(2-etyloheksylu) 61,5% Diester 30% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4% Dyspergator 0,2% Mikroproszek grafitowy C4N-98 0,3%
A3G60	Adypinian bis(2-etyloheksylu) 61,2% Diester 30% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4% Dyspergator 0,2% Mikroproszek grafitowy C4N-98 0,6%

T1G0	Tereftalan bis(2-etyloheksylu) 100%
T2G0	Tereftalan bis(2-etyloheksylu) 91,65% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4%
T2G15	Tereftalan bis(2-etyloheksylu) 91,65% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4% Dyspergator 0,2% Mikroproszek grafitowy C4N-98 0,15%
T2G30	Tereftalan bis(2-etyloheksylu) 91,5% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4% Dyspergator 0,2% Mikroproszek grafitowy C4N-98 0,3%
T2G60	Tereftalan bis(2-etyloheksylu) 91,2% Dodatek EP/AW 4% Dodatek antystatyczny 4% Dyspergator 0,2% Mikroproszek grafitowy C4N-98 0,6%

4. BADANIA WSTĘPNE

4.1. Plan i warunki badań wstępnych

Pierwszy etap badań wstępnych miał na celu określenie optymalnego sposobu doprowadzenia mgły olejowej do strefy skrawania – poprzez dyszę zewnętrzną lub przez oprawkę narzędziową. Kolejne fazy badań wstępnych koncentrowały się na określeniu wydatku cieczy na potrzeby obróbki MQL oraz doborze cieczy bazowych, które w badaniach zasadniczych wzbogacono o dodatek GMP. Wszystkie te badania zostały oparte na pomiarach zużycia narzędzia z uwzględnieniem zmian składowych całkowitej siły skrawania w okresie trwałości.

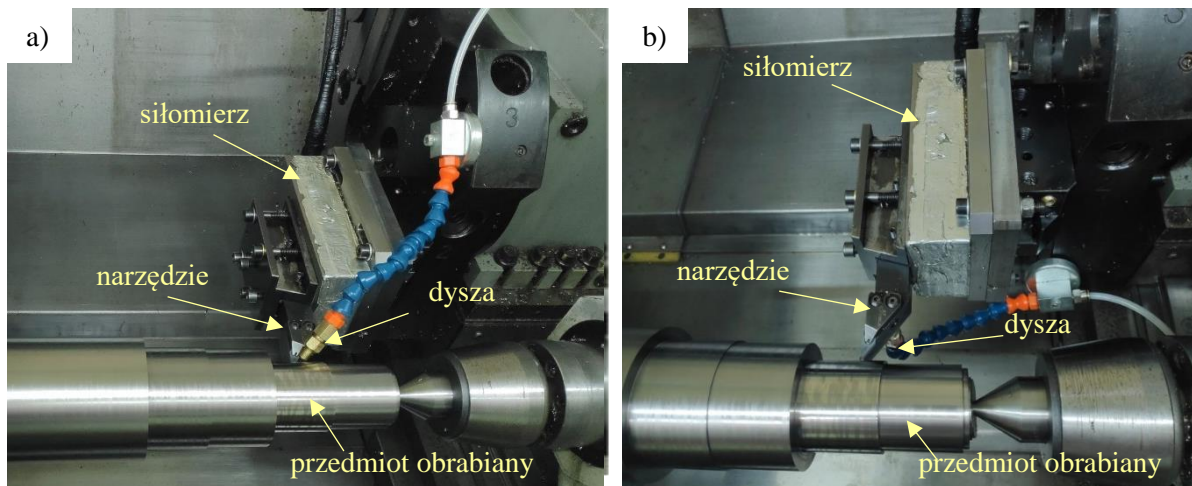
Trwałość narzędzia jest najważniejszym parametrem charakteryzującym skrawalność materiału i odnosi się do czasu, w którym narzędzie wykonuje pracę od rozpoczęcia skrawania do momentu, w którym staje się bezużyteczne z powodu osiągnięcia określonego kryterium trwałości ostrza w określonych warunkach obróbki [163]. Na potrzeby niniejszych badań, trwałość narzędzia określono objętością usuniętego materiału do osiągnięcia przez narzędzie krytycznej wartości wskaźnika zużycia VB_C (oznaczenie wg PN-ISO 3685:1996). Wskaźnik VB_C jest to szerokość pasma zużycia w strefie C obejmującej zaokrągloną część naroża. Wskaźnik ten najlepiej opisuje zużycie ostrza w przypadku, gdy promień naroża narzędzia jest większy od głębokości skrawania [8,164].

W przeprowadzonych badaniach, mających na celu określenie efektywnego sposobu doprowadzenia mgły olejowej do strefy obróbki, jako kryterium zużycia przyjęto wartość starcia na powierzchni przyłożenia $VB_C \approx 0,2$ mm.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania mające na celu określenie trwałości narzędzia dla obróbki z doprowadzeniem mgły olejowej poprzez zewnętrzną dyszę (rys. 4.1a) oraz poprzez oprawkę narzędzia (rys 4.1b). Dodatkowo wyniki badań odnoszono do obróbki na sucho. Badania przeprowadzono dla wydatku cieczy $q=30$ ml/h i ciśnienia powietrza $p=0,7$ MPa. Zastosowano ciecz A2G0.

Określenie wartości wydatku cieczy polegało na przeprowadzeniu badań trwałości narzędzia dla trzech wartości wydatku: 15 ml/h, 30 ml/h i 60 ml/h. Ciecz T2G0 w postaci mgły olejowej podawana była poprzez oprawkę narzędziową.

Dobór bazowych cieczy chłodząco-smarujących sprowadzał się do przeprowadzenia badań trwałości narzędzia dla pięciu różnych cieczy bazowych: A1G0, A2G0, A3G0, T1G0 i T2G0. Ciecze w postaci mgły olejowej podawane były poprzez oprawkę narzędziową z wydatkiem $q=30$ ml/h.



Rys. 4.1 Konfiguracja stanowiska badawczego do toczenia w warunkach MQL a) doprowadzenie cieczy poprzez dyszę zewnętrzną, b) doprowadzenie cieczy poprzez oprawkę narzędziową.

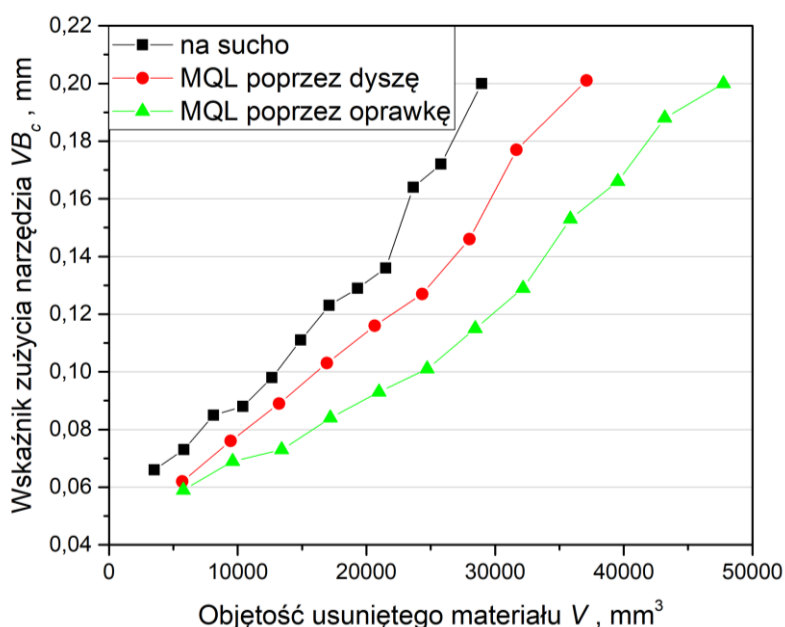
Tabela 4.1 przedstawia wartości parametrów nastawnych zastosowanych podczas kolejnych etapów badań wstępnych.

Tabela 4.1 Parametry nastawne zastosowane podczas badań wstępnych.

Parametry nastawne	Etapy badań wstępnych		
	Określenie sposobu doprowadzenia mgły olejowej	Określenie efektywnej wartości wydatku cieczy	Dobór cieczy bazowych
Prędkość skrawania v_c , m/min	120	120	120
Posuw f , mm/obr	0,1	0,1	0,1
Głębokość skrawania a_p , mm	0,25	0,25	0,25
Ciśnienie powietrza p , MPa	0,7	0,7	0,7
Sposób doprowadzenia mgły olejowej	poprzez zewnętrzną dyszę, poprzez oprawkę narzędziową	poprzez oprawkę narzędziową	poprzez oprawkę narzędziową
Wydatek cieczy q , ml/h	30	15, 30, 60	30
Ciecz bazowa	A2G0	T2G0	A1G0, A2G0, A3G0, T1G0, T2G0

4.2. Wyniki i analiza badań wstępnych

Na rys. 4.2 przedstawiono zależność wskaźnika zużycia narzędzia VB_c w funkcji objętości usuniętego materiału V dla obróbki na sucho oraz w różnych warunkach MQL – przy doprowadzeniu mgły olejowej poprzez dyszę zewnętrzną oraz poprzez oprawkę narzędziową. Zaobserwowano, że zastosowanie chłodzenia MQL podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V zmniejszyło istotnie intensywność zużycia ostrza narzędzia skrawającego w porównaniu z obróbką na sucho. Obecność środka smarnego w strefie skrawania powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia na styku narzędzie-wiór i narzędzie-przedmiot obrabiany, co z kolei prowadzi do wydłużenia trwałości narzędzia. Znacząco mniejsze zużycie osiągnięto przy doprowadzeniu MQL za pomocą oprawki narzędziowej. W tym przypadku bardziej precyzyjne dostarczenie mgły olejowej pozwoliło na wprowadzenie większej ilości środka smarnego w pobliże strefy skrawania – pomiędzy powierzchnie natarcia narzędzia i wiór.

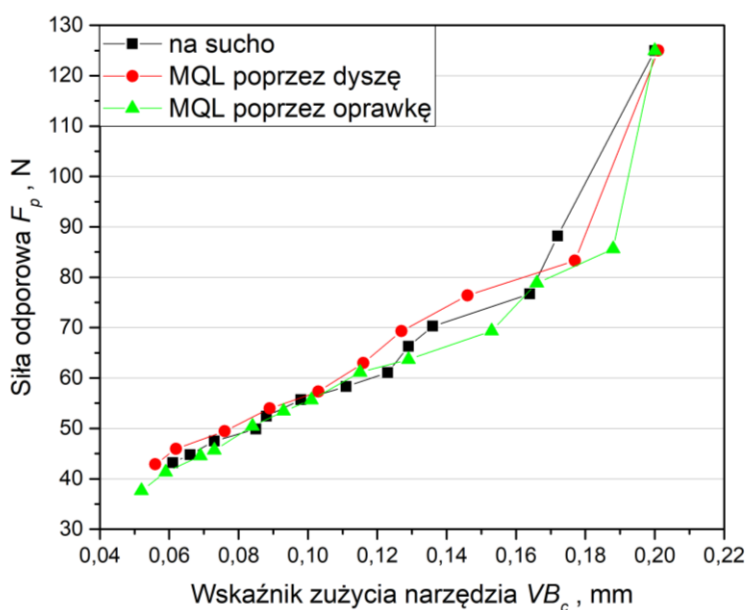


Rys. 4.2 Wskaźnik zużycia narzędzia VB_c w funkcji objętości usuniętego materiału V dla toczenia na sucho oraz w różnych warunkach doprowadzenia MQL.

Podczas badań zaobserwowano ścisłą zależność pomiędzy wartością odporowej siły skrawania F_p a wskaźnikiem zużycia narzędzia VB_c (rys. 4.3). Obserwacja ta pozwoliła na przyjęcie do dalszych badań wartości siły odporowej $F_p=125$ N jako kryterium zużycia narzędzia odpowiadającego wskaźnikowi zużycia VB_c około 0,2 mm.

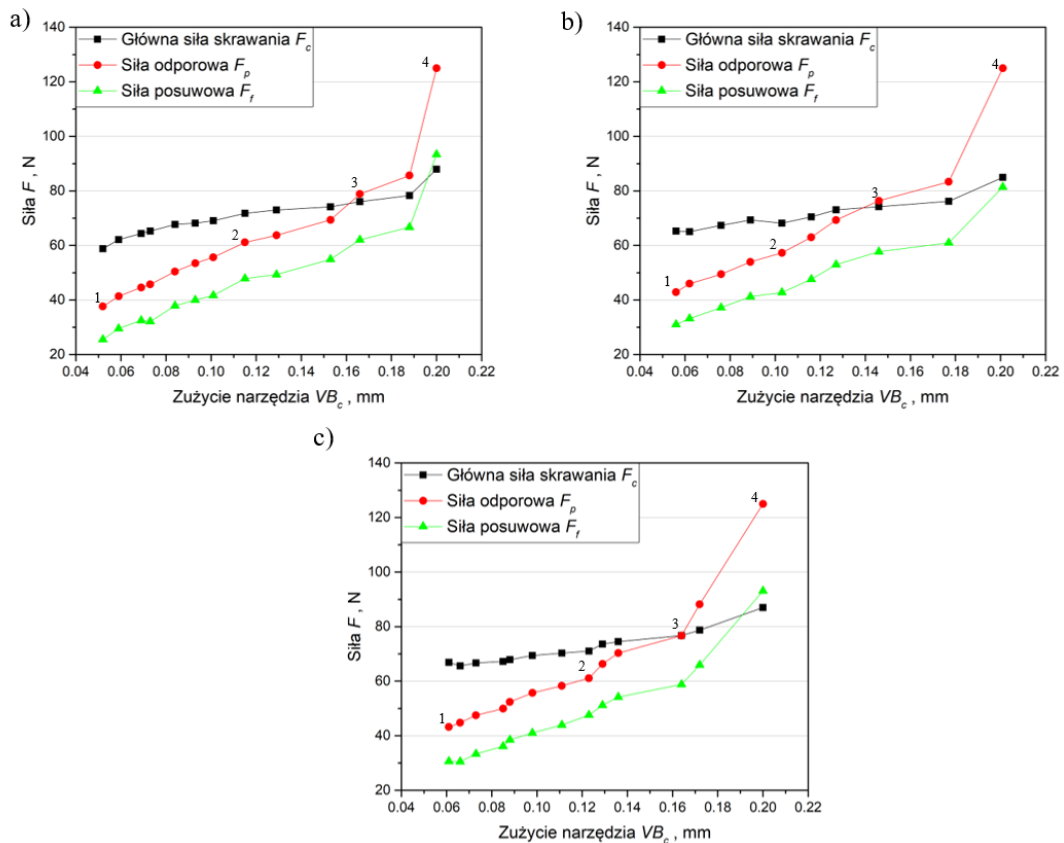
Rys. 4.4 przedstawia zależności poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania w funkcji wartości wskaźnika zużycia VB_c . Zaobserwowano, że w początkowej fazie obróbki największą wartość spośród wszystkich składowych ma główna siła skrawania F_c . Postępujące zużycie narzędzia powoduje intensywny wzrost siły odporowej F_p . Przy zużyciu $VB_c \geq 0,14$ mm dominuje już

siła odporowa, co jest niekorzystne ze względu na tendencję stopów tytanu do umacniania przez gniot. W przypadku toczenia z zastosowaniem MQL poprzez oprawkę narzędziową, wartości składowych siły skrawania dla tej samej wielkości zużycia są nieco mniejsze niż dla obróbki na sucho i z zastosowaniem MQL za pomocą zewnętrznej dyszy. Wynika to najprawdopodobniej z faktu, że skierowanie mgły olejowej na powierzchnię natarcia pod formowany wiór powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia na styku wióra z narzędziem skrawającym, który bezpośrednio wpływa na siłę tarcia. Dla pozostałych warunków skrawania, wartości składowych siły skrawania dla tego samego zużycia narzędzia (wskaźnika zużycia VB_c), były zbliżone.

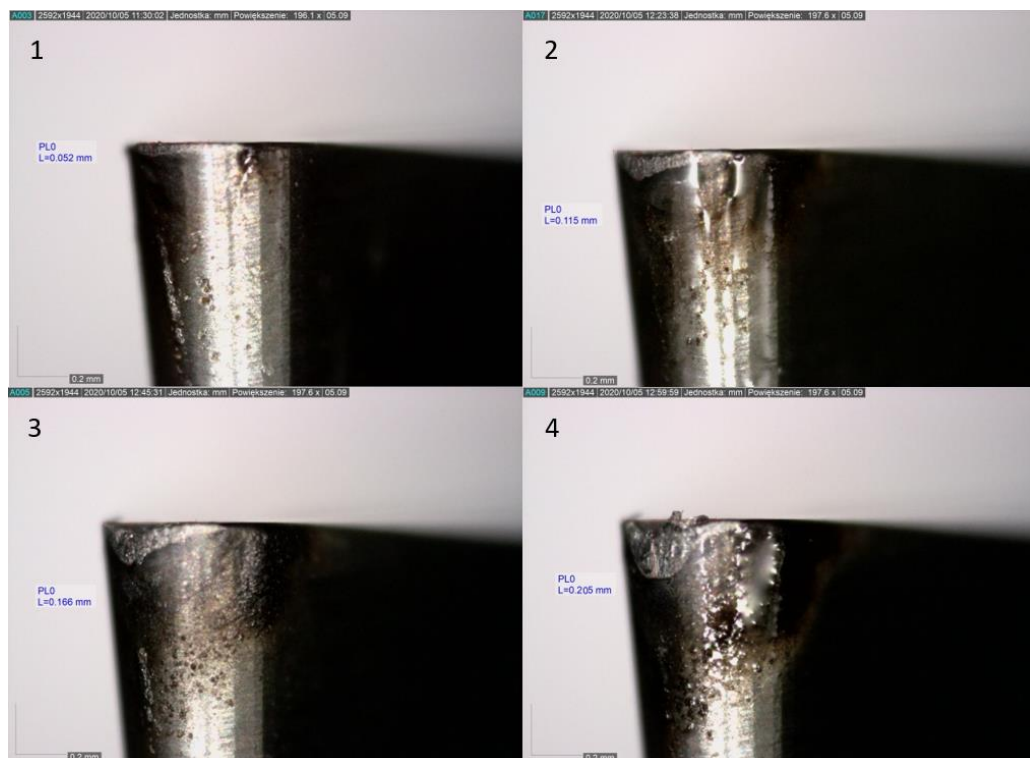


Rys. 4.3 Zależność odporowej siły skrawania F_p od wartości wskaźnika zużycia narzędzia VB_c dla różnych warunków obróbki.

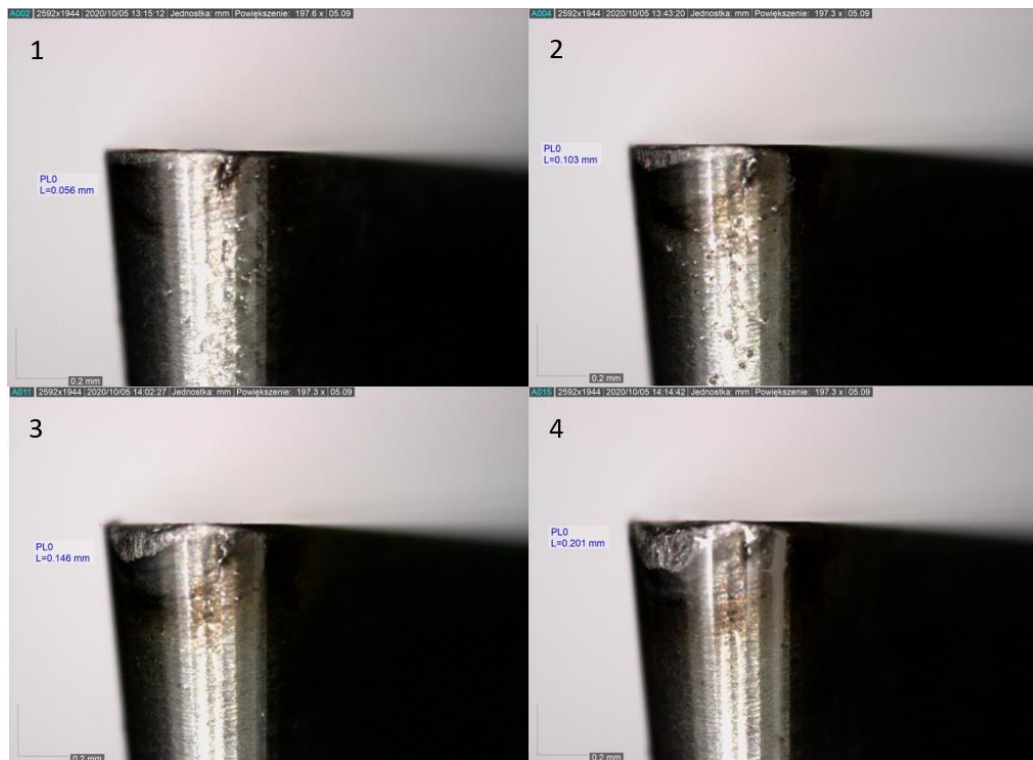
Rys. 4.5–4.7 przedstawiają obrazy płytek skrawających dla różnych wartości wskaźnika zużycia narzędzia (punkty 1–4 zaznaczone na wykresach na rys. 4.4) dla obróbki w warunkach MQL poprzez oprawkę narzędziową, MQL poprzez dyszę zewnętrzną oraz na sucho. Zaobserwowano, że mechanizm zużycia narzędzia jest bardzo podobny dla wszystkich badanych warunków obróbki. Jedynie w przypadku obróbki na sucho badania wykazały większą tendencję materiału obrabianego do adhezji do powierzchni natarcia i przyłożenia płytki skrawającej.



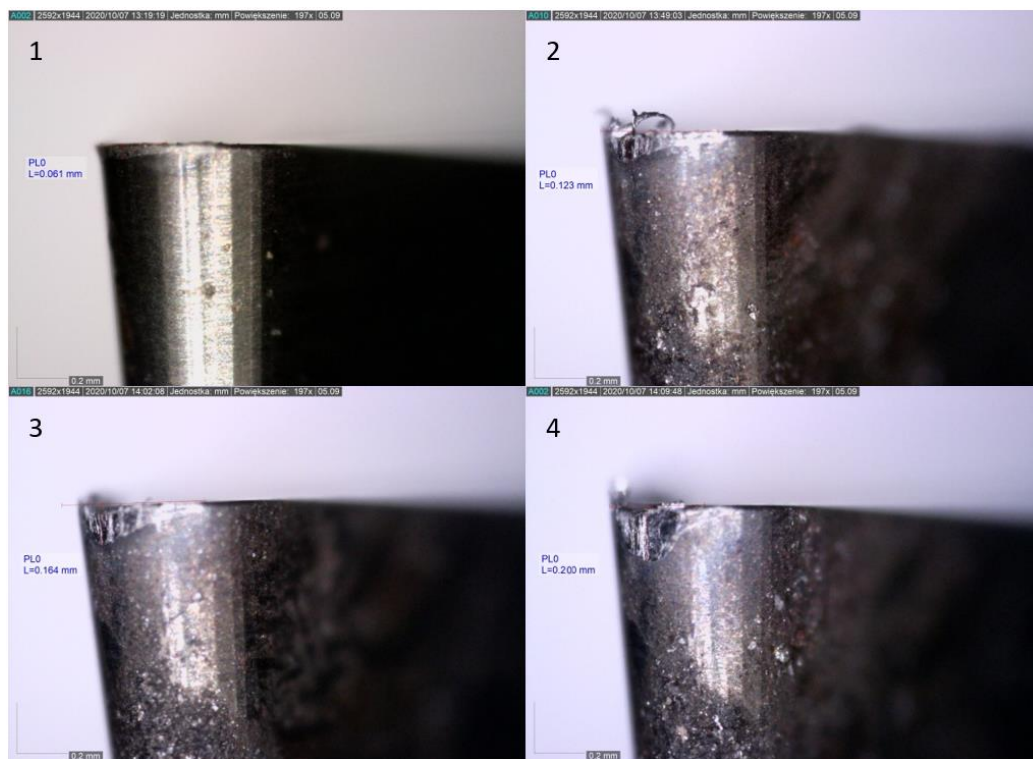
Rys. 4.4 Zależność poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania od zużycia narzędzia dla obróbki w warunkach a) MQL poprzez oprawkę narzędzia, b) MQL poprzez dyszę zewnętrzną, c) skrawania na sucho.



Rys. 4.5 Obrazy płytki skrawającej dla różnych wartości zużycia narzędzia VB_c podczas obróbki w warunkach MQL poprzez oprawkę narzędzia (punkty na wykresie rys. 4.4a).



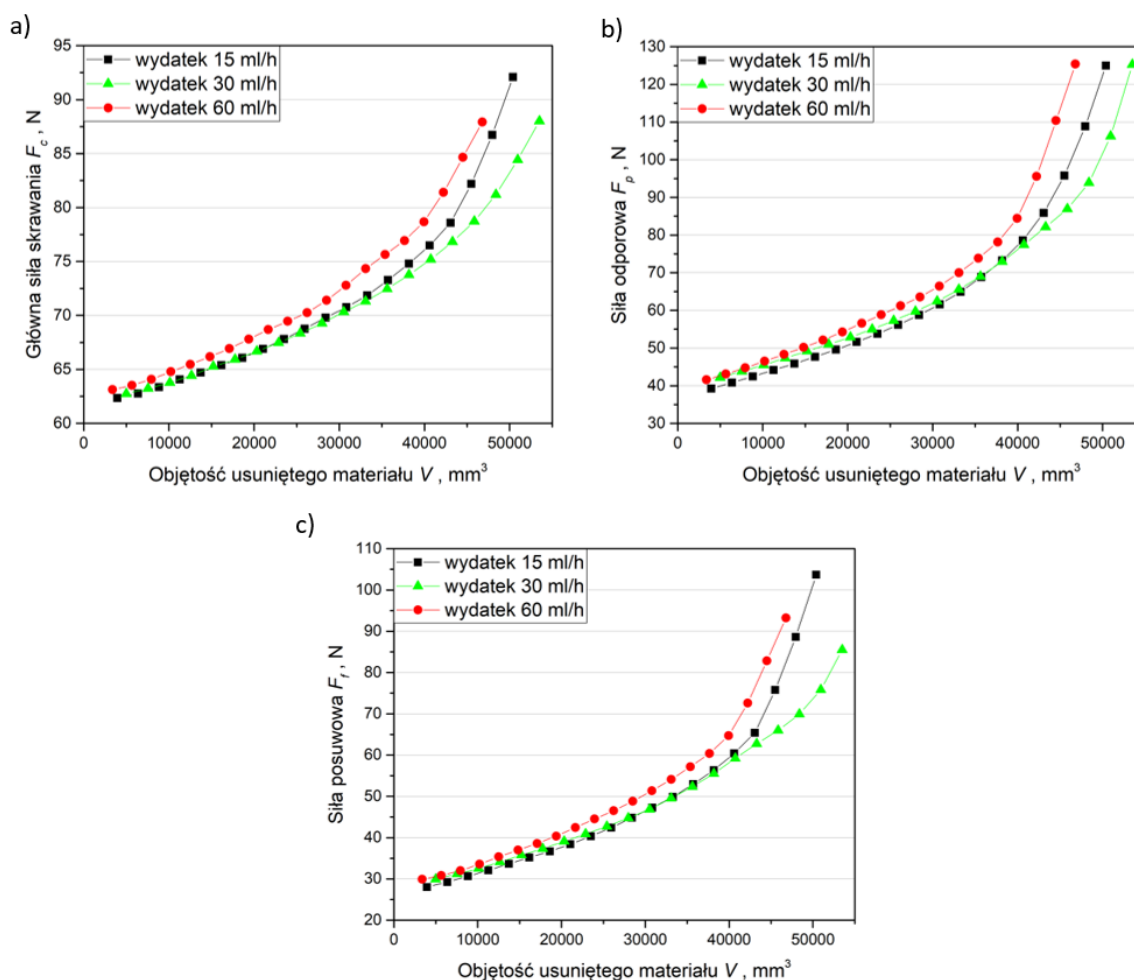
Rys. 4.6 Obrazy płytki skrawającej dla różnych wartości zużycia narzędzia VB_c podczas obróbki w warunkach MQL poprzez zewnętrzną dyszę (punkty na wykresie rys. 4.4b).



Rys. 4.7 Obrazy płytki skrawającej dla różnych wartości zużycia narzędzia VB_c podczas obróbki na sucho (punkty na wykresie rys. 4.4c).

Zaprezentowane wyniki badań dotyczące doboru bardziej efektywnego sposobu doprowadzenia mgły olejowej do strefy skrawania były także przedmiotem współautorskiej publikacji [165].

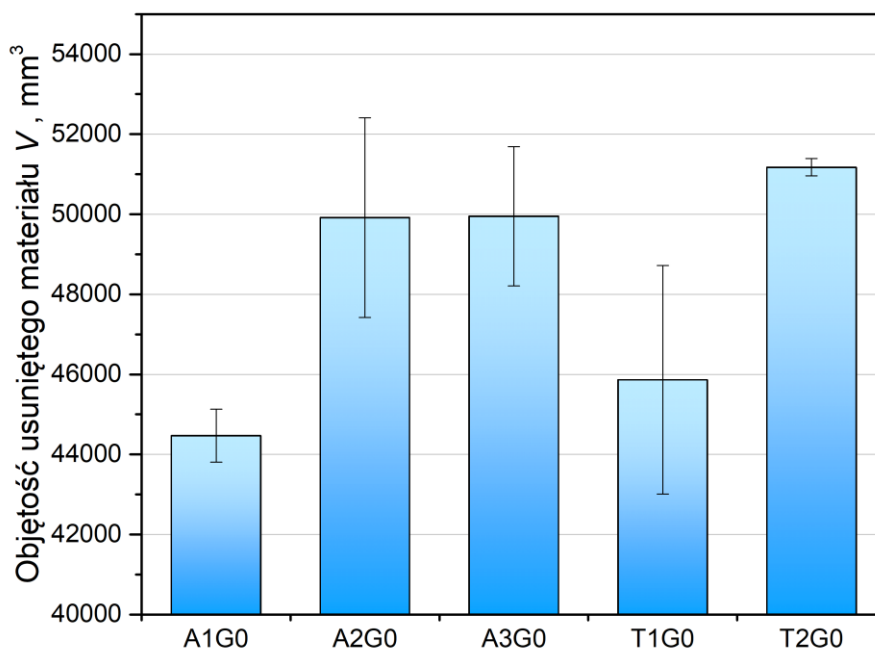
Kolejny etap badań wstępnych obejmował określenie wydatku cieczy na potrzeby obróbki w warunkach MQL. Na rys. 4.8 przedstawiono zmiany poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania w zależności od objętości usuniętego materiału dla różnych wydatków cieczy. Na podstawie wcześniejszych badań jako kryterium zużycia narzędzia przyjęto wartość odporowej siły skrawania równą 125 N. Zaobserwowano, że w początkowym etapie skrawania wartości wszystkich składowych siły skrawania dla wydatku $q=15$ ml/h oraz $q=30$ ml/h są niemalże identyczne, natomiast dla wydatku 60 ml/h wartości te były nieco większe. Wraz ze wzrostem objętości usuniętego materiału różnice pomiędzy wartościami poszczególnych składowych zwiększały się. Największą objętość usuniętego materiału, a zarazem najlepszą trwałość narzędzia, osiągnięto dla wydatku 30 ml/h i była ona większa odpowiednio o około 14% i 6% niż dla wydatku 60 ml/h i 15 ml/h. Zwiększanie wydatku odbywało się przy stałej wartości ciśnienia powietrza w układzie zasilania. Zbyt duży wydatek mógł pogarszać warunki tworzenia mgły olejowej, przez co sam proces dostarczania jej w pobliże strefy skrawania był prawdopodobnie ograniczony.



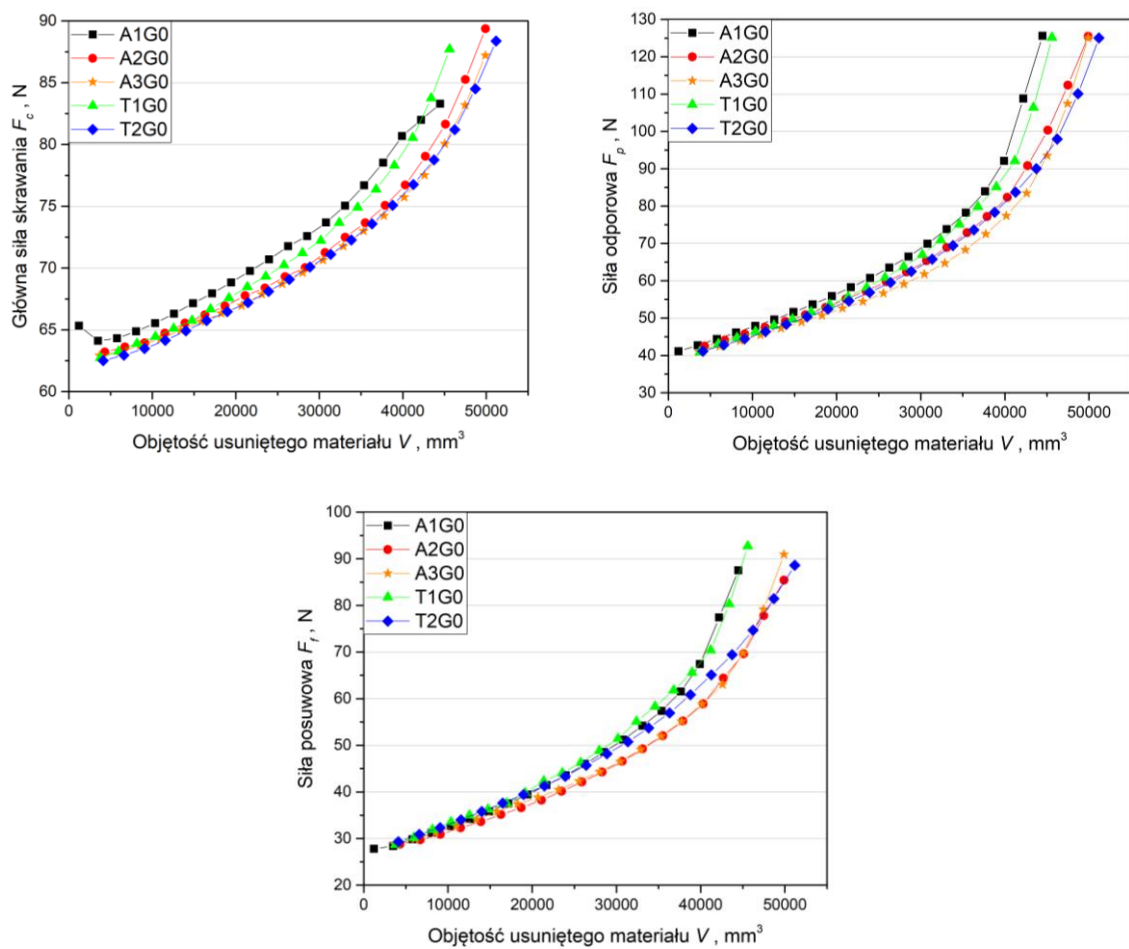
Rys. 4.8 Zależność składowych całkowitej siły skrawania (a) głównej siły skrawania, b) siły odporowej, c) siły posuwowej) od objętości usuniętego materiału dla różnych wartości wydatku cieczy smarującej.

Wyniki przedstawione we współautorskiej publikacji [166], w której porównano wpływ trzech różnych cieczy zastosowanych w warunkach MQL podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V na składowe całkowitej siły skrawania oraz parametry chropowatości powierzchni S_a i S_z , stanowiły podstawę do dalszych badań mających na celu dobór cieczy bazowych, przeznaczonych do badań zasadniczych.

Doboru cieczy smarujących, które stanowiły bazy do dalszych badań, dokonano na podstawie pomiaru objętości usuniętego materiału do momentu osiągnięcia kryterium zużycia ostrza (wartość siły odporowej 125 N). Rys 4.9 przedstawia objętości usuniętego materiału podczas toczenia Ti-6Al-4V, z zastosowaniem poszczególnych cieczy smarujących, do momentu osiągnięcia kryterium zużycia. Największą objętość materiału usunięto podczas obróbki z zastosowaniem cieczy T2G0 i wartość ta była o około 15% większa niż objętość materiału usunięta podczas obróbki w warunkach MQL z cieczą A1G0. Zależności te znajdują także odzwierciedlenie w zmianach poszczególnych składowych siły skrawania w funkcji objętości usuniętego materiału dla badanych cieczy smarujących (rys. 4.10). Największe wartości sił odnotowywano dla cieczy A1G0 oraz T1G0, natomiast dla pozostałych cieczy wartości te były bardzo zbliżone. W przypadku cieczy A2G0, A3G0 i T2G0 mniejsze wartości składowych siły skrawania zostały uzyskane dzięki wzbogaceniu cieczy o dodatki o właściwościach antystatycznych, antyutleniających i antykorozyjnych. Uzyskane wyniki pozwoliły na selekcję dwóch baz do dalszych badań. Wybrano ciecz T2G0, ze względu na to, że zastosowanie jej podczas obróbki pozwoliło na usunięcie największej objętości materiału przy najmniejszym odchyleniu standardowym. Objętości usuniętego materiału podczas skrawania z zastosowaniem cieczy A2G0 i A3G0 były bardzo zbliżone. Dlatego jako drugą ciecz bazową wybrano A3G0, ze względu na mniejszą wartość odchylenia standardowego objętości usuniętego materiału.



Rys. 4.9 Objętość usuniętego materiału odpowiadająca osiągnięciu kryterium zużycia narzędzia dla poszczególnych cieczy smarujących.



Rys. 4.10 Zależność składowych całkowitej siły skrawania (a) głównej siły skrawania, b) siły odporowej, c) siły posuwowej od objętości usuniętego materiału dla różnych cieczy smarujących.

5. BADANIA ZASADNICZE

5.1. Metodyka badań zasadniczych

Badania zasadnicze miały na celu określenie wpływu dodatku GMP do bazowej cieczy smarującej na przebieg toczenia wykończeniowego dwufazowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach obróbki MQL. W ramach przeprowadzonych badań dodano GMP do dwóch baz, wytypowanych na etapie badań wstępnych, w trzech stężeniach masowych: 0,15%, 0,30%, 0,60%.

5.1.1. Badania w zakresie zużycia ostrza

W ramach badań zasadniczych określono wpływ stężenia GMP w cieczy smarującej na trwałość ostrza. Podobnie jak podczas badań wstępnych jako kryterium zużycia przyjęto wartość siły odporowej F_p równą 125 N (wartość $VB_C \approx 0,2$ mm).

Tabela 5.1 przedstawia wartości parametrów nastawnych zastosowanych podczas badań zasadniczych trwałości ostrza. Przyjęte parametry skrawania odzwierciedlają wartości stosowane w przemyśle lotniczym. Dla każdej konfiguracji cieczy smarującej przeprowadzono po trzy testy i na ich podstawie wyznaczono wartości średnie trwałości ostrza wyrażone w postaci objętości usuniętego materiału do osiągnięcia krytycznej wartości siły odporowej F_p . Do wyznaczania wartości średnich wykorzystano oprogramowanie OriginPro 2021. Poprzez zastosowanie funkcji Average Multiple Curves w pierwszej kolejności zostały interpolowane krzywe wejściowe indywidualnie, aby ustalić wspólny zestaw wartości uśrednionych zmiennej X (wartości objętości usuniętego materiału). Odpowiednie wartości Y (wartości poszczególnych składowych siły skrawania) zostały następnie obliczone przez uśrednienie wartości Y w każdym X .

Tabela 5.1 Parametry nastawne zastosowane podczas badań zasadniczych.

Parametr	Wartość
Prędkość skrawania v_c , m/min	120
Posuw f , mm/obr	0,1
Głębokość skrawania a_p , mm	0,25
Wydatek cieczy q , ml/h	30
Ciśnienie powietrza p , MPa	0,7

5.1.2. Badania w zakresie składowych całkowitej siły skrawania i topografii powierzchni

W ramach badań zasadniczych przeprowadzono także analizę i modelowanie składowych całkowitej siły skrawania w procesie toczenia. Ponadto wykonano badania topografii powierzchni stopu Ti-6Al-4V, które obejmowały analizę wpływu parametrów skrawania dla cieczy o różnych stężeniach GMP. W ramach tego etapu badań analizowano mapy 3D powierzchni po toczeniu oraz wyznaczono odpowiednie modele i uzyskano zależności opisujące zależność parametrów chropowatości Sa i Sz od istotnych statystycznie parametrów nastawnych. Takie analizy pozwoliły na określenie istotności wpływu poszczególnych parametrów wejściowych i interakcji pomiędzy nimi na badane wskaźniki jakościowe procesu.

Związki pomiędzy parametrami nastawnymi procesu a składowymi całkowitej siły skrawania, jak i parametrami topografii powierzchni zostały zamodelowane z wykorzystaniem statystycznej metody powierzchni odpowiedzi RSM (Response Surface Method), znajdującej szerokie zastosowanie w modelowaniu procesów skrawania, w tym także trudnoobrabialnych stopów lotniczych [167–169]. Wykorzystanie tej metody w modelowaniu pozwala na określenie statystycznej istotności wpływu poszczególnych parametrów wejściowych modelu. Sprowadza się ona do wyznaczenia powierzchni odpowiedzi zbudowanej na ogólnym równaniu typu:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_k \cdot x_k + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + a_{k-1,k} \cdot x_{k-1} \cdot x_k + a_{11} \cdot x_1^2 + \dots a_{kk} \cdot x_k^2 \quad (1)$$

Ze względu na przyjęty zakres badanych parametrów zastosowano plan centralny kompozycyjny, ściennie centrowany. Zastosowanie planu rotatabilnego kompozycyjnego powodowałoby zwiększenie zakresu zmienności parametrów wejściowych, ze względu na punkty gwiazdne, które znajdowałyby się poza zakresem zalecanych parametrów do obróbki stopów tytanu.

Statystyki regresji zostały wykorzystane do oceny jakości dopasowania modelu. W niniejszej pracy przedstawiono następujące statystyki odnoszące się do jakości dopasowania modeli:

- Wartość średnia \bar{y} – średnia wartość wielkości mierzonej.
- Odchylenie standardowe składnika resztkowego s – określa przeciętne odchylenia wartości rzeczywistych zmiennej prognozowanej od teoretycznych. Mniejsza wartość oznacza lepszą jakość modelu.
- Współczynnik zmienności resztkowej $C.V.$ – odchylenie standardowe składnika resztkowego s wyrażone jako procent średniej \bar{y} .
- Współczynnik determinacji R^2 – informuje o dopasowaniu modelu regresji do danych empirycznych. Im lepsze jest dopasowanie tym wartość R^2 będzie bliższa jedności.
- Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg} – miara wielkości zmienności wokół średniej prognozowanej przez model, dostosowana do liczby zmiennych w modelu. Zmniejsza się wraz

ze wzrostem liczby zmiennych w modelu, jeśli nie wpływają one istotnie na wartość zmiennej prognozowanej.

Badania przeprowadzono w pierwszej kolejności w oparciu o plan badawczy, uwzględniający zmianę procentowej zawartości GMP w zakresie 0–0,60%, dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu). Jednak ze względu na uzyskane wyniki, w drugim etapie zdecydowano o zawężeniu zakresu 0–0,30%. Stąd całość badań zasadniczych w zakresie składowych siły skrawania i parametrów chropowatości zrealizowano w dwóch zakresach. W przypadku uzyskanych wyników zaleca się do zawartości 0,30% stosowanie wyników z planu zawężonego, natomiast w zakresie 0,30–0,60% modeli z planu 0–0,60%. Plany badawcze przyjęte do modelowania wartości składowych całkowitej siły skrawania oraz parametrów chropowatości powierzchni obrabianej zostały przedstawione w tabeli 5.2 i 5.3. Jako parametry wejściowe przyjęto prędkość skrawania v_c , posuw f oraz procentową zawartość mikroproszku grafitowego GMP u , pozostałe parametry podczas wszystkich prób miały stałą wartość: głębokość skrawania $a_p = 0,25$ mm, wydatek cieczy chłodzącej 30 ml/h, ciśnienie powietrza 0,7 MPa.

Tabela 5.2 Plan badawczy przyjęty do modelowania wartości składowych całkowitej siły skrawania oraz parametrów topografii powierzchni obrabianej dla zawartości GMP w zakresie 0-0,60%.

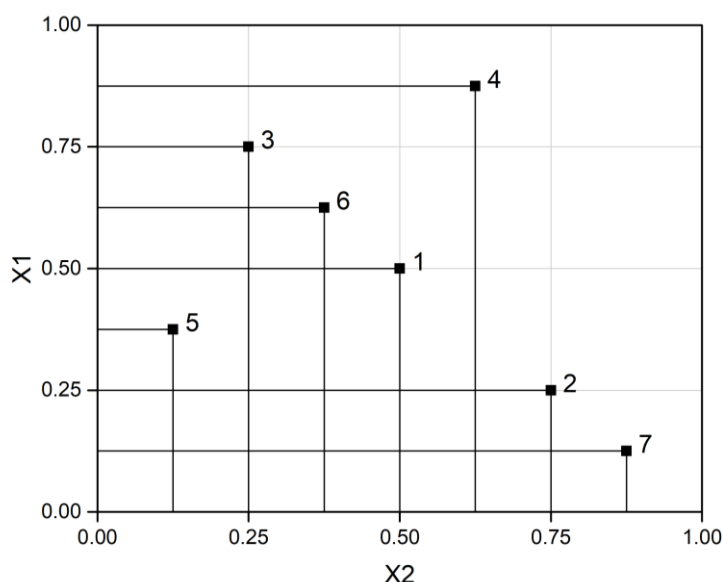
Pomiar	Prędkość skrawania v_c, m/min	Posuw f, mm/obr	Zawartość GMP u, %
1	40	0,1	0,6
2	120	0,1	0,6
3	40	0,3	0,6
4	120	0,3	0,6
5	80	0,2	0
6	80	0,2	0,3
7	80	0,2	0,3
8	80	0,2	0,3
9	40	0,1	0
10	40	0,3	0
11	120	0,1	0
12	120	0,3	0
13	120	0,2	0,3
14	80	0,3	0,3
15	80	0,1	0,3
16	40	0,2	0,3
17	80	0,2	0,3
18	80	0,2	0,3
19	80	0,2	0,3
20	80	0,2	0,6

Tabela 5.3 Plan badawczy przyjęty do modelowania wartości składowych całkowitej siły skrawania oraz parametrów topografii powierzchni obrabianej dla zawartości GMP w zakresie 0-0,30%.

Pomiar	Prędkość skrawania v_c, m/min	Posuw f, mm/obr	Zawartość GMP u, %
1	40	0,1	0,3
2	120	0,1	0,3
3	40	0,3	0,3
4	120	0,3	0,3
5	80	0,2	0
6	80	0,2	0,15
7	80	0,2	0,15
8	80	0,2	0,15
9	40	0,1	0
10	40	0,3	0
11	120	0,1	0
12	120	0,3	0
13	120	0,2	0,15
14	80	0,3	0,15
15	80	0,1	0,15
16	40	0,2	0,15
17	80	0,2	0,15
18	80	0,2	0,15
19	80	0,2	0,15
20	80	0,2	0,3

5.1.3. Badania w zakresie kształtowania wióra

Ze względu na istotne znaczenie geometrii wiórów dla bezpieczeństwa przebiegu procesu skrawania, prowadzono także badania mające na celu kontrolę kształtu wiórów po obróbce w warunkach MQL z cieczami o różnej zawartości dodatku GMP. Uzyskane wyniki porównano do wyników uzyskanych podczas obróbki na sucho. Plan badań oparto o metodę PSI (ang. Parameter Space Investigation), która pozwala na minimalizację ilości punktów badawczych podczas planowania eksperymentu. Punkty badawcze rozmieszczone są w przestrzeni wielowymiarowej tak, aby ich rzuty na osie X i Y były równomiernie rozmieszczone względem siebie (rys. 5.1) [170,171]. Tabela 5.4 przedstawia plan badawczy przyjęty do oceny zwijania i łamania wiórów. Parametry zmienne przyjęte na potrzeby tych badań to posuw i głębokość skrawania, natomiast parametry stałe to: prędkość skrawania $v_c=120$ m/min, ciśnienie powietrza $p=0,7$ MPa, wydatek cieczy $q=30$ ml/h.



Rys. 5.1 Lokalizacja punktów badawczych na osiach X1 i X2 w metodzie PSI.

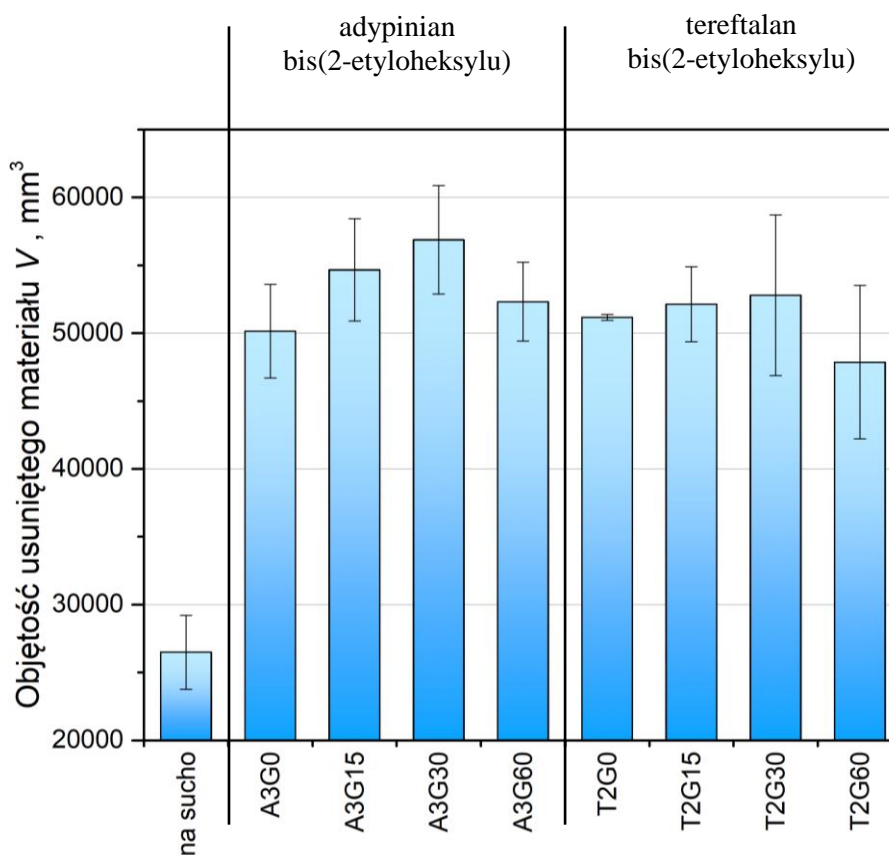
Tabela 5.4 Plan badawczy przyjęty do oceny kształtowania wiórów.

Punkt PSI	Posuw f , mm/obr	Głębokość skrawania a_p , mm
1	0,2	0,25
2	0,133	0,35
3	0,266	0,15
4	0,3	0,3
5	0,166	0,1
6	0,233	0,2
7	0,1	0,4

5.2. Wyniki i analiza badań zasadniczych

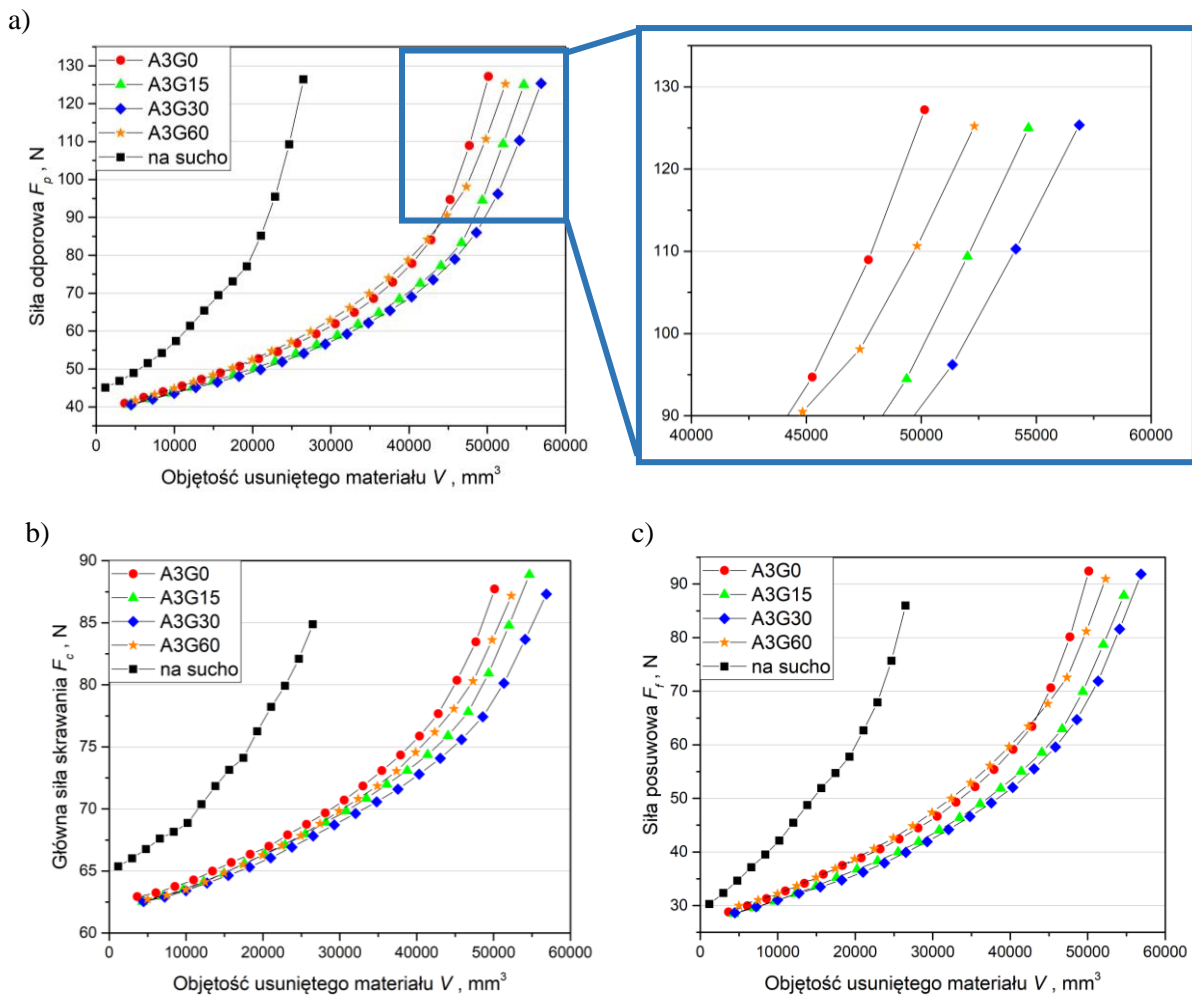
5.2.1. Trwałość ostrza

Trwałość ostrza określono jako objętość usuniętego materiału do momentu osiągnięcia kryterium zużycia ostrza (wartość siły odporowej $F_p=125$ N). Podejście takie pozwala na porównanie wpływu danego czynnika na ekonomiczność i efektywność obróbki. Rys. 5.2 przedstawia objętość usuniętego materiału w procesie skrawania z zastosowaniem cieczy smarujących na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z różną procentową zawartością dodatku mikroproszku grafitowego (GMP). Zaobserwowano, że objętość usuniętego materiału zwiększała się wraz ze wzrostem zawartości GMP dla obu cieczy bazowych do zawartości 0,30% GMP. Dodatek 0,30% GMP do cieczy bazowej powoduje wzrost trwałości narzędzia o około 13% i 3% w stosunku do obróbki z czystymi cieczami bazowymi oraz o około 115% i 99% w stosunku do obróbki na sucho, odpowiednio dla adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu). Wynikało to ze zmniejszenia wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem zawartości GMP. Zmniejszenie trwałości ostrza w przypadku zastosowania cieczy o zawartości 0,60% GMP, mogło być spowodowane zmianą warunków tworzenia mgły olejowej przy stałym ciśnieniu powietrza w układzie zasilania MQL oraz zbyt małym przekrojem przewodu doprowadzającego ciecz i nierównomiernym jej rozprowadzaniem.

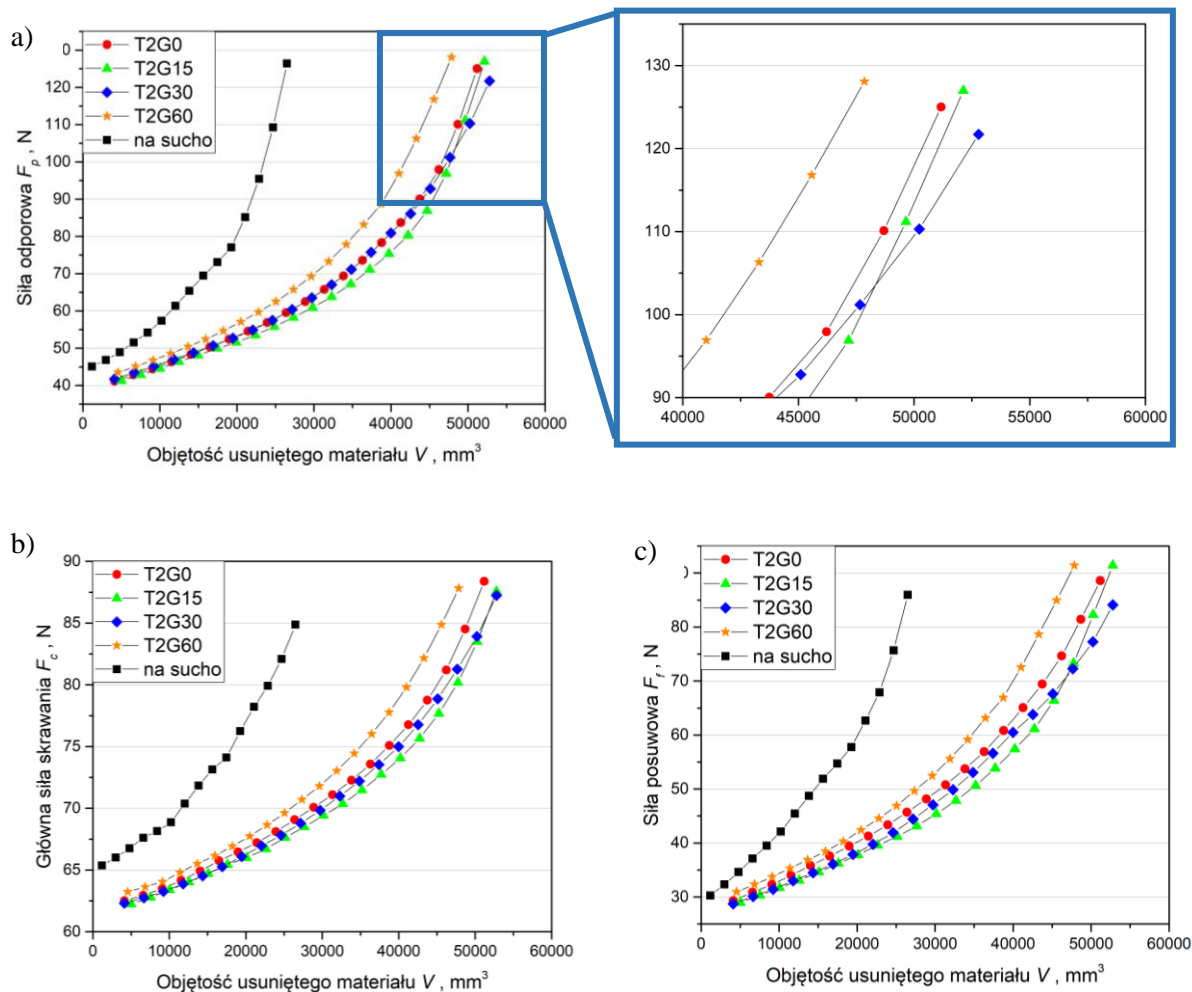


Rys. 5.2 Objętość usuniętego materiału w procesie skrawania w zależności od rodzaju cieczy chłodząco-smarujących.

Zależności poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania od objętości usuniętego materiału zostały przedstawione na rys. 5.3, dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), oraz na rys. 5.4 dla cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu). Wyniki uzyskano na podstawie wartości średnich z trzech pomiarów zużycia dla każdej z cieczy. Wartości odchyłeń standardowych zostały przedstawione w tabelach A.1–A.9 w załączniku A. Wartości poszczególnych składowych siły skrawania są wyraźnie wyższe dla obróbki na sucho, natomiast przy zastosowaniu cieczy smarujących, zaobserwowano, że wartości te są najmniejsze dla zawartości GMP 0,15% oraz 0,30%. W przypadku cieczy na bazie tereftalanu najwyższe wartości składowych sił skrawania odnotowano dla cieczy T2G60, o zawartości GMP 0,60%. Dla cieczy na bazie adypinianu wartości składowych siły skrawania dla cieczy bez dodatku GMP oraz z dodatkiem 0,60% GMP były bardzo zbliżone. Wyższe wartości sił, w szczególności składowej odporowej, wpływają na szybsze zużywanie się narzędzia, a więc także na krótszą trwałość narzędzia, określaną w tym przypadku na podstawie objętości usuniętego materiału.



Rys. 5.3 Zależność składowych całkowitej siły skrawania (a) siły odporowej, b) głównej siły skrawania, c) siły posuwowej od objętości usuniętego materiału dla cieczy smarujących na bazie adypinianu o różnej zawartości GMP.



Rys. 5.4 Zależność składowych całkowitej siły skrawania (a) głównej siły skrawania, b) siły odporowej, c) siły posuwowej) od objętości usuniętego materiału dla cieczy smarujących na bazie tereftalanu o różnej zawartości GMP.

5.2.2. Kształtowanie składowych siły skrawania

Opracowano modele poszczególnych składowych siły skrawania uwzględniające zmianę prędkości skrawania, posuwu oraz procentowej zawartości GMP dla toczenia w warunkach MQL z cieczami smarującymi opartymi na dwóch cieczach bazowych. Tabela 5.5 przedstawia wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania uzyskane podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym dla zawartości GMP w zakresie 0–0,60%.

Tabela 5.5 Wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania uzyskanych podczas toczenia w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym dla zawartości GMP w zakresie 0–0,60%.

Pomiar	Prędkość skrawania v_c , m/min	Posuw f , mm/obr	Zawartość GMP u , %	Składowe siły skrawania					
				F_c , N	F_p , N	F_f , N	F_c , N	F_p , N	F_f , N
				Adypinian bis(2-etyloheksylu)			Tereftalan bis(2-etyloheksylu)		
1	40	0,1	0,6	61,6	34,1	23,5	59,1	33,4	23,9
2	120	0,1	0,6	60,9	37,2	24,4	58,7	37,3	25
3	40	0,3	0,6	141,3	67,4	30,2	138,2	66,3	29,5
4	120	0,3	0,6	133,6	60,5	24,6	127,8	57,3	24,4
5	80	0,2	0	110,6	50,6	32	106	53,5	31,2
6	80	0,2	0,3	106,5	56,4	29,9	102,7	53,4	28,6
7	80	0,2	0,3	108,5	56,7	30,6	102,1	52,7	28
8	80	0,2	0,3	109,3	56,8	31,3	102,5	53,2	28,7
9	40	0,1	0	64,9	32,1	27,2	64,3	36,2	27,2
10	40	0,3	0	153,7	64,8	35	145,4	68,7	32,6
11	120	0,1	0	65	36,6	27,2	62,6	39,5	28
12	120	0,3	0	141,3	55,4	27,9	135,7	60,3	26,5
13	120	0,2	0,3	105,5	55,2	29,5	99,2	51,9	27,7
14	80	0,3	0,3	142,5	65,6	28,4	138,8	69,6	28,1
15	80	0,1	0,3	65,7	40,1	26,2	60,3	36,2	23,9
16	40	0,2	0,3	112,1	56,8	31,5	105,3	53,9	29,6
17	80	0,2	0,3	101,7	55,7	29,9	103,7	54,3	29,2
18	80	0,2	0,3	107,6	56,3	30,4	102,6	53	28,5
19	80	0,2	0,3	106,9	56,6	30,3	102,4	53,2	28,8
20	80	0,2	0,6	103,6	53,1	28,9	100,8	51,9	28,8

Na podstawie analizy wyników badań określono istotność wpływu parametrów skrawania na składowe całkowitej siły skrawania. Odpowiednie modele dobrano w oparciu o analizę wariancji ANOVA i na tej podstawie uzyskano zależności dla składowych siły skrawania w funkcji istotnych statystycznie parametrów wejściowych oraz interakcji między nimi. Równania (2) i (3) przedstawiają zależności modelowe głównej siły skrawania F_c uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu

bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) (dla zakresu zawartości GMP 0–0,60%). Statystyki regresji dla modeli (2) i (3) przedstawiono w tabeli 5.6.

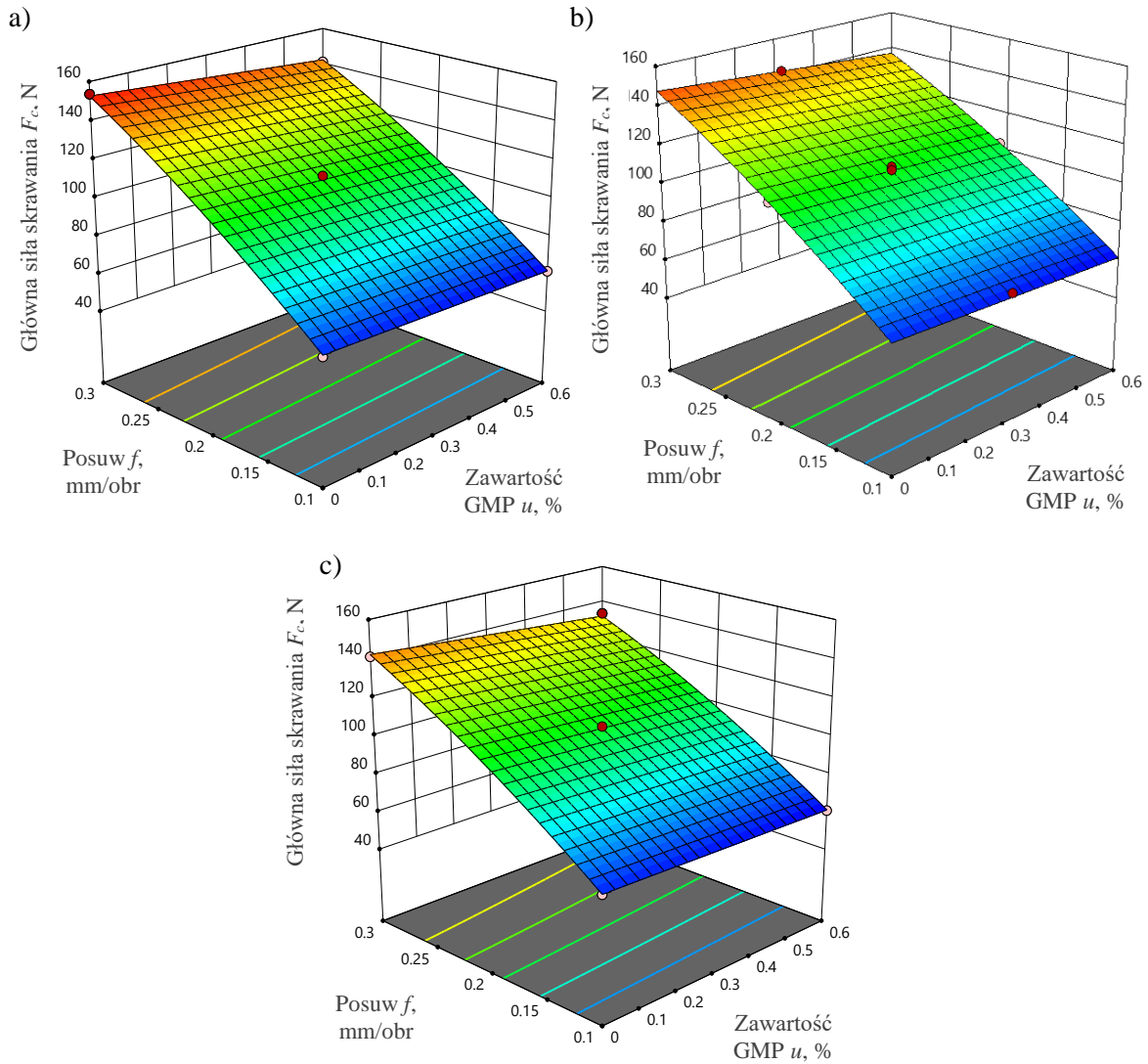
$$F_c = 7,592 + 0,054v_c + 627,925f - 1,222u - 0,609v_c f - 52,917fu - 422,5f^2 \quad (2)$$

$$F_c = 9,832 + 0,042v_c + 582,477f - 4,806u - 0,563v_c f - 25fu - 372,667f^2 \quad (3)$$

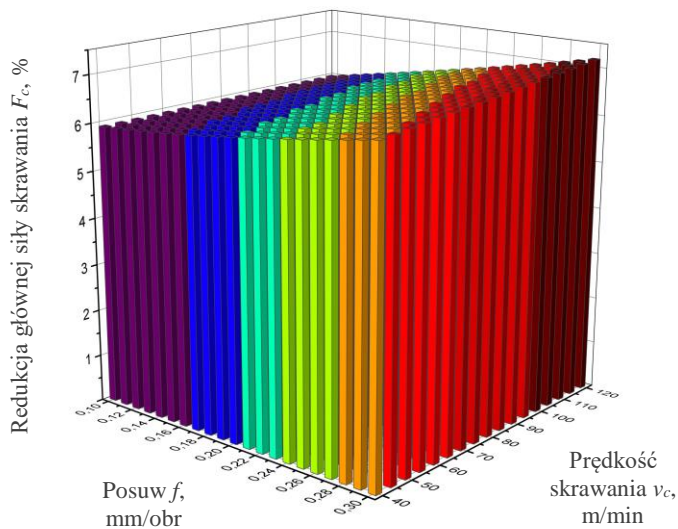
Tabela 5.6 Statystyki regresji dla modeli (2) i (3).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s, N	Wartość średnia \bar{y}, N	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(2)	1,93	105,35	1,83	0,99	0,99
(3)	0,74	101,12	0,73	0,99	0,99

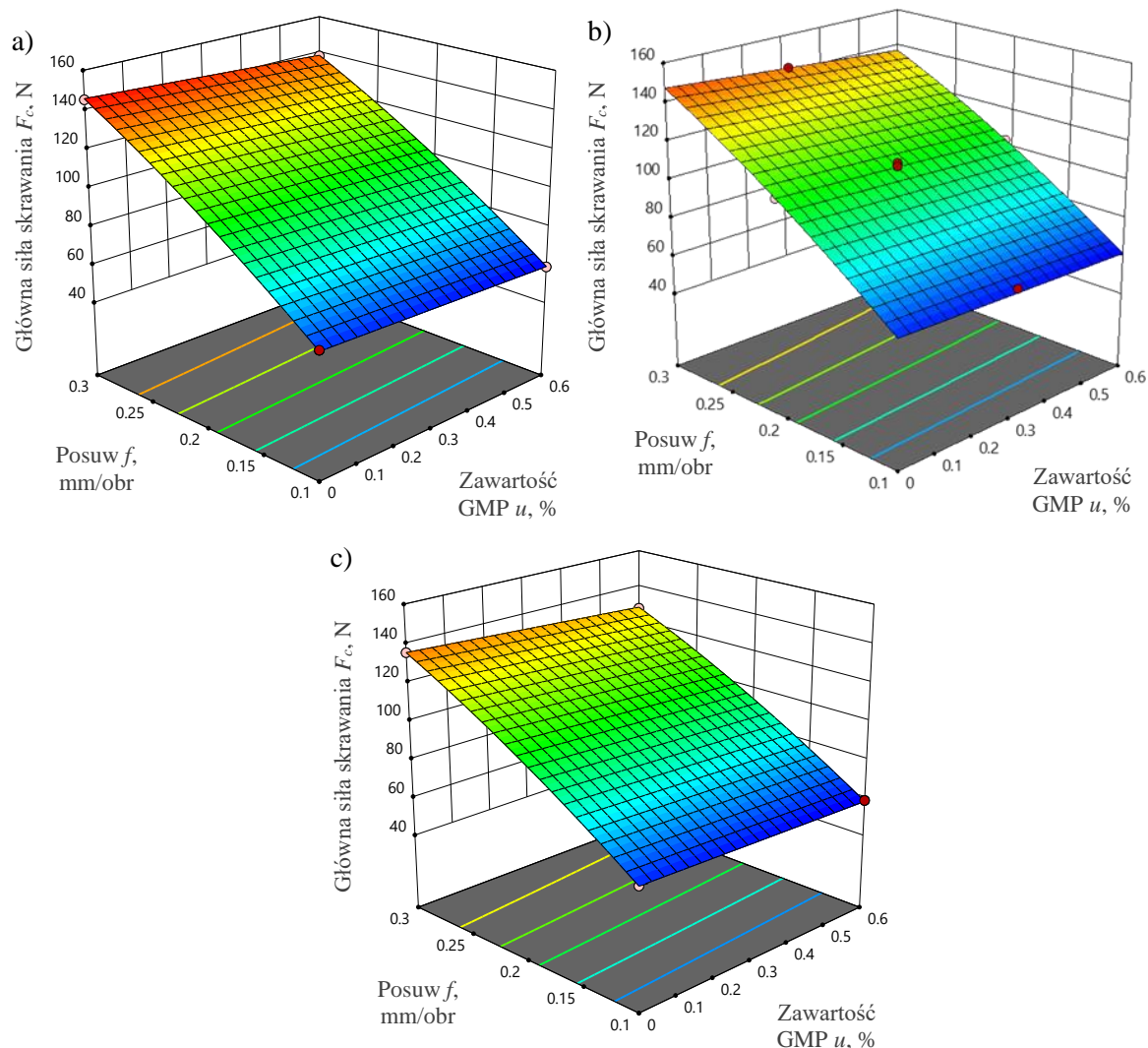
Powierzchnie opisujące wpływ zawartości GMP i posuwu na główną siłę skrawania, uzyskane na podstawie zależności (2) i (3), przedstawiono odpowiednio na rys. 5.5 oraz 5.7. Zarówno w przypadku cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), jak i tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek GMP prowadził do zmniejszenia wartości głównej siły skrawania – przy zawartości GMP 0,30% siła była niższa o około 3%, natomiast zawartość 0,60% GMP prowadziła do zmniejszenia wartości siły o około 5,9–7,2% (rys. 5.6 i 5.8). Wartości głównej siły skrawania były mniejsze o około 4% przy zastosowaniu podczas obróbki tereftalanu bis(2-etyloheksylu) jako cieczy bazowej, zarówno w przypadku czystej cieczy bazowej, jak i wzbogaconych o dodatek GMP.



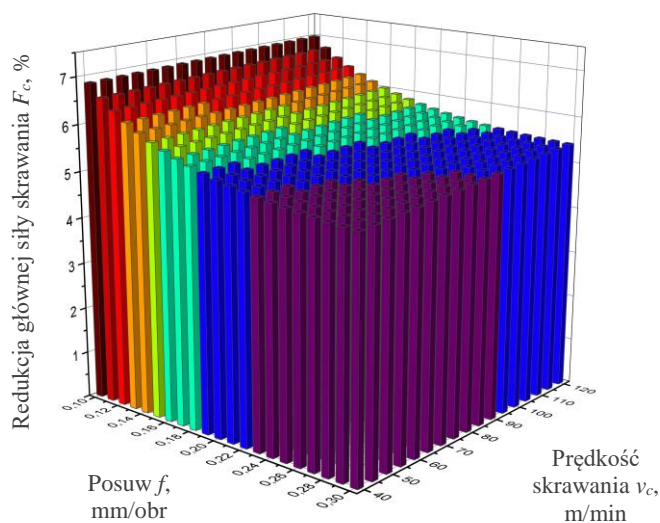
Rys. 5.5 Wpływ posuwu i zawartości GMP na główną siłę skrawania podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min



Rys. 5.6 Redukcja głównej siły skrawania F_c w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.7 Wpływ posuwu i zawartości GMP na główną siłę skrawania podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min



Rys. 5.8 Redukcja głównej siły skrawania F_c w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Równania (4) i (5) przedstawiają zależności modelowe siły odporowej F_p uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) (dla zakresu zawartości GMP 0–0,60%). Tabela 5.7 przedstawia statystyki regresji dla modelu (4) i (5).

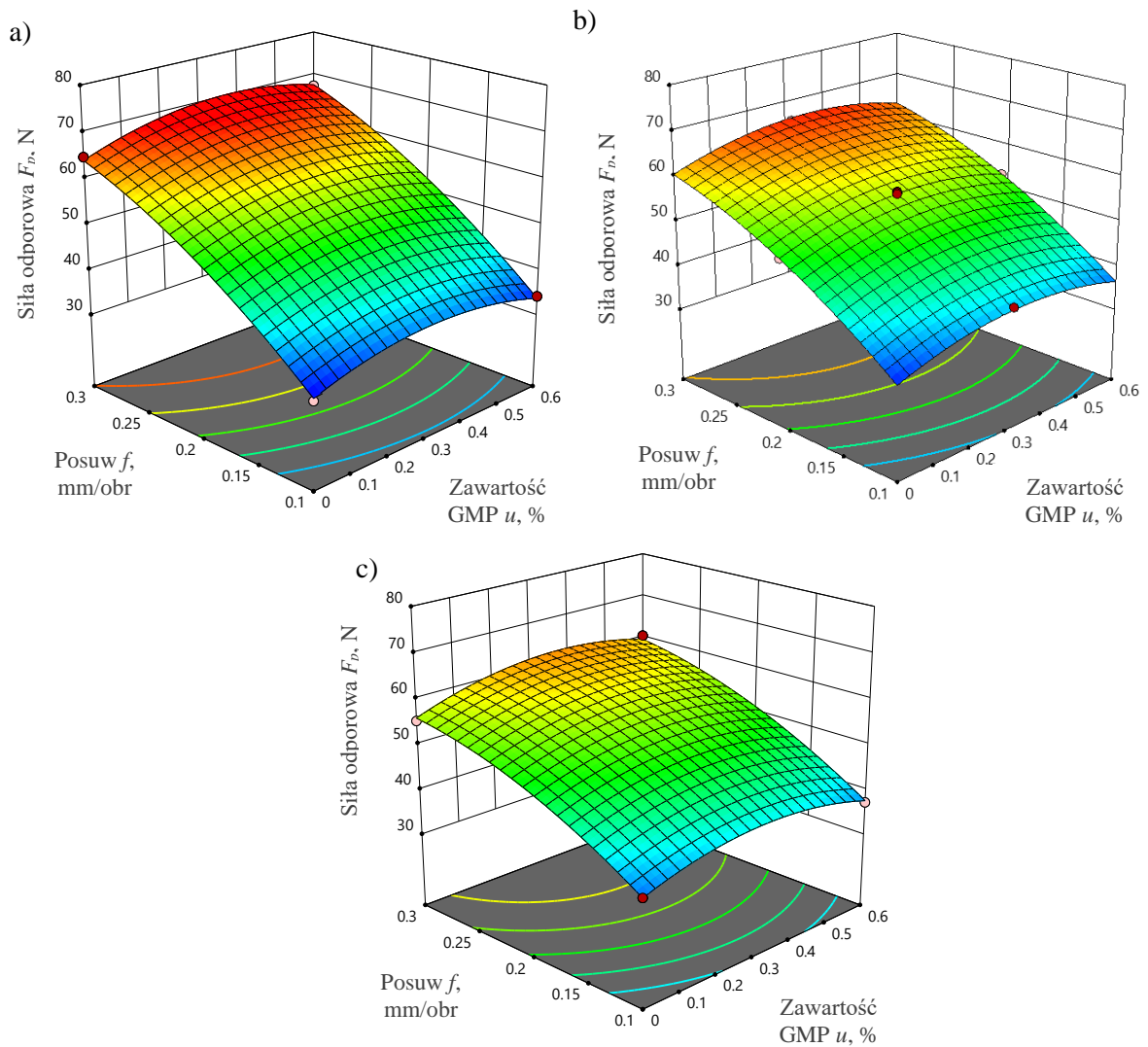
$$F_p = 1,903 + 0,124v_c + 321,725f + 29,125u - 0,747v_c f + 21,25fu + \\ -336,875f^2 - 49,236u^2 \quad (4)$$

$$F_p = 6,323 + 0,123v_c + 303,233f - 4,278u - 0,769v_c f - 255,333f^2 \quad (5)$$

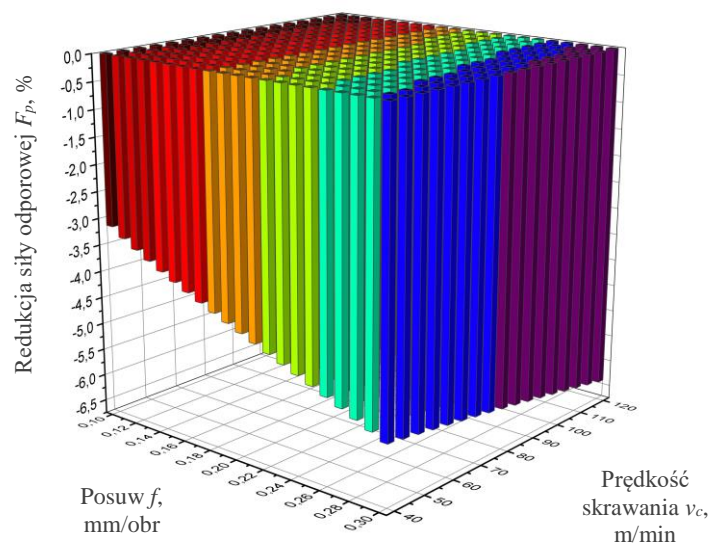
Tabela 5.7 Statystyki regresji dla modeli (4) i (5).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s, N	Wartość średnia \bar{y}, N	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(4)	0,61	52,35	1,16	0,99	0,99
(5)	1,53	51,87	2,96	0,98	0,97

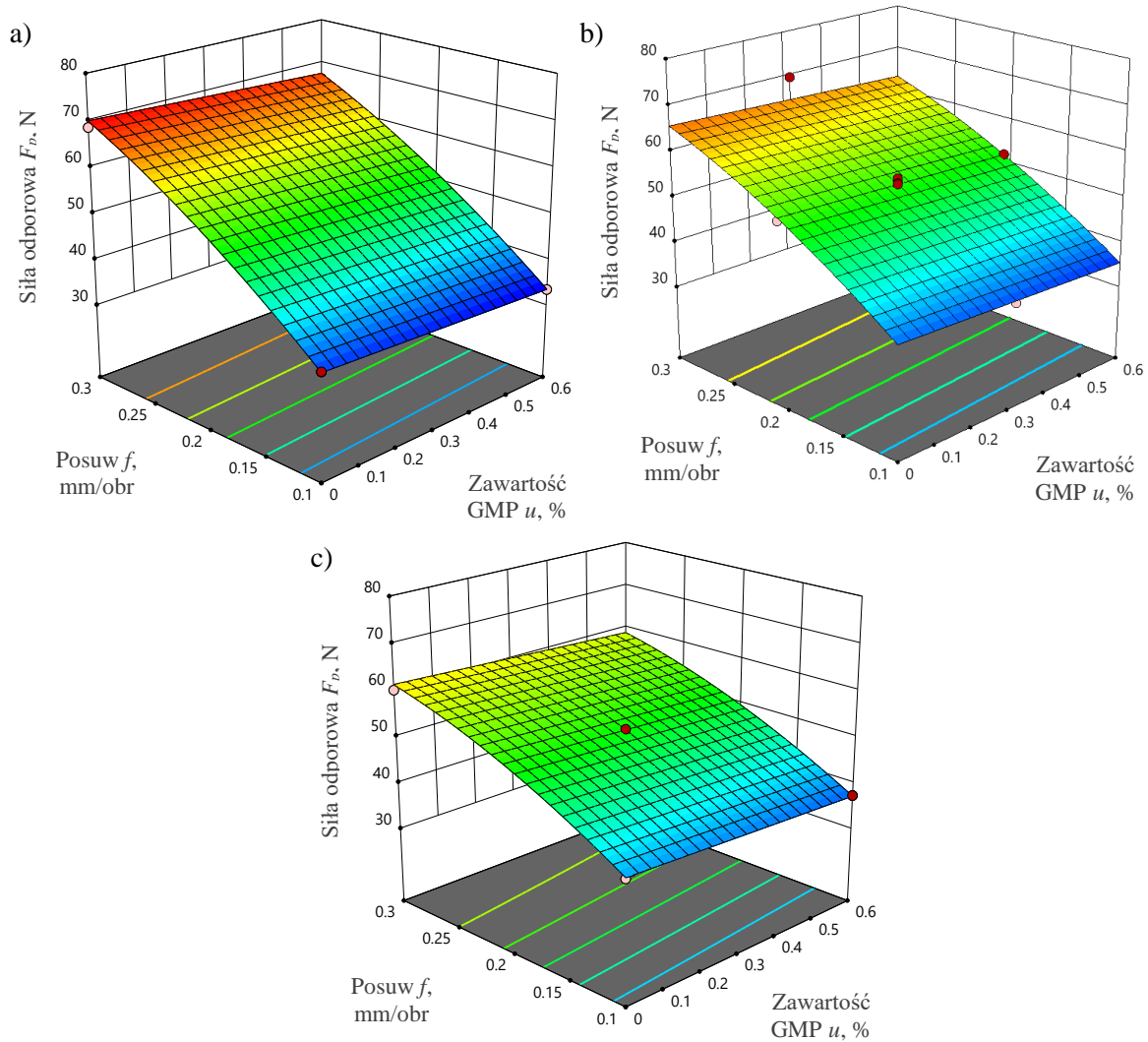
Powierzchnie opisujące wpływ zawartości GMP i posuwu na siłę odporową, uzyskane na podstawie zależności (4) i (5), przedstawiono odpowiednio na rys. 5.9 oraz 5.11. Dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,30% GMP prowadził do wzrostu wartości siły odporowej o około 9,7–15%, natomiast obróbka z cieczą z dodatkiem 0,60% GMP prowadziła do wzrostu wartości siły odporowej o 3–6,5% w stosunku do wartości uzyskanych podczas obróbki z czystą cieczą bazową (rys. 5.10). W przypadku tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek mikroproszku grafitowego prowadził do zmniejszenia wartości siły odporowej – przy dodatku 0,30% o około 2–3,5%, natomiast dla dodatku 0,60% wartości były mniejsze o 4–7% (rys. 5.12). Dla czystych cieczy bazowych mniejsze o około 9% wartości siły odporowej uzyskano dla adypinianu bis(2-etyloheksylu). Dla cieczy z dodatkiem GMP mniejsze wartości stwierdzono dla cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu).



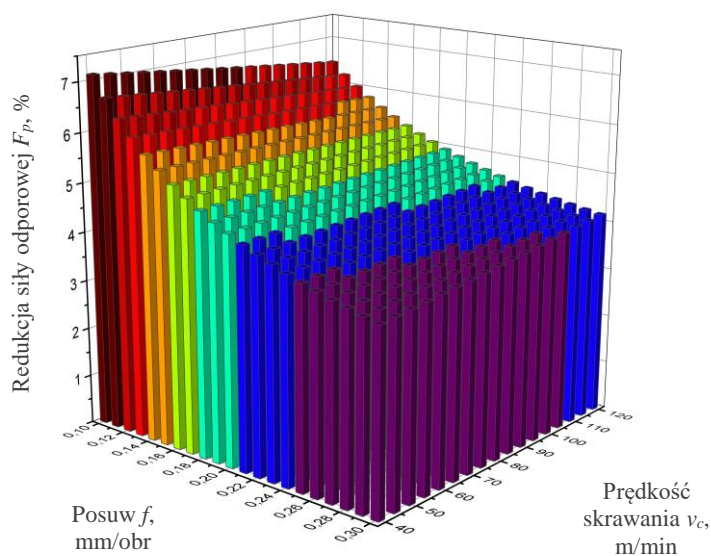
Rys. 5.9 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę odporową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.10 Redukcja siły odporowej F_p w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.11 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę odporową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.12 Redukcja siły odporowej F_p w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Równania (6) i (7) przedstawiają zależności modelowe siły posuwowej F_f uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) (dla zakresu zawartości GMP 0–0,60%). Tabela 5.8 przedstawia statystyki regresji dla modelu (6) i (7).

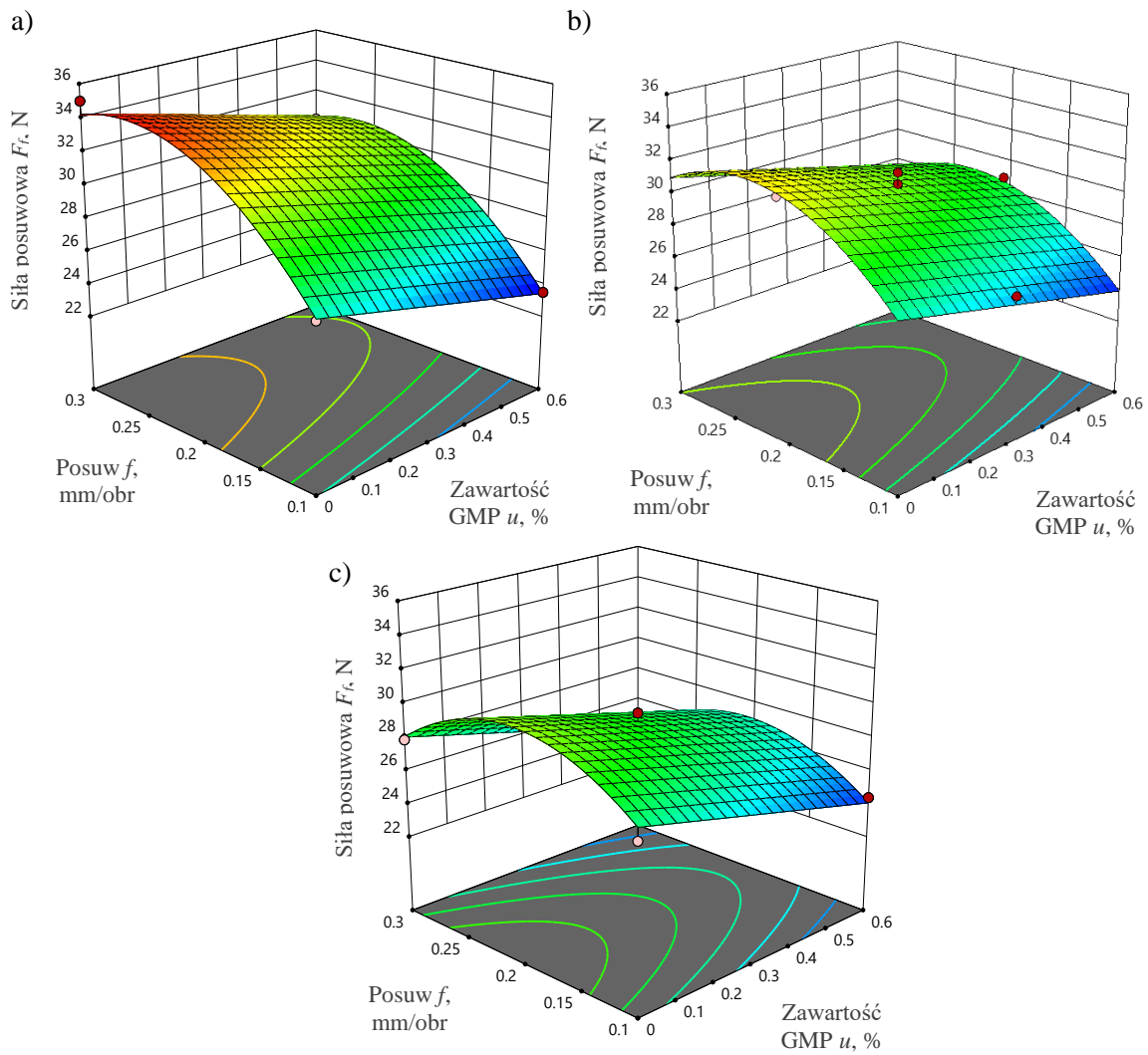
$$F_f = 13,063 + 0,051v_c + 168,533f - 6,444u - 0,425v_c f - 292,333f^2 \quad (6)$$

$$F_f = 13,603 + 0,054v_c + 153,85f - 12,944u - 0,409v_c f - 270f^2 + 13,333u^2 \quad (7)$$

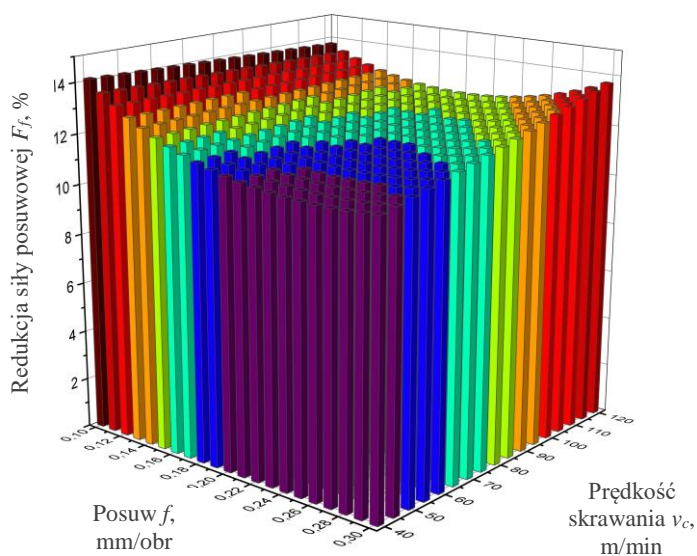
Tabela 5.8 Statystyki regresji dla modeli (6) i (7).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s, N	Wartość średnia \bar{y}, N	Współczynnik zmienności resztkowej $C.V., \%$	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(6)	0,60	29,05	2,08	0,97	0,95
(7)	0,48	28,08	1,72	0,97	0,95

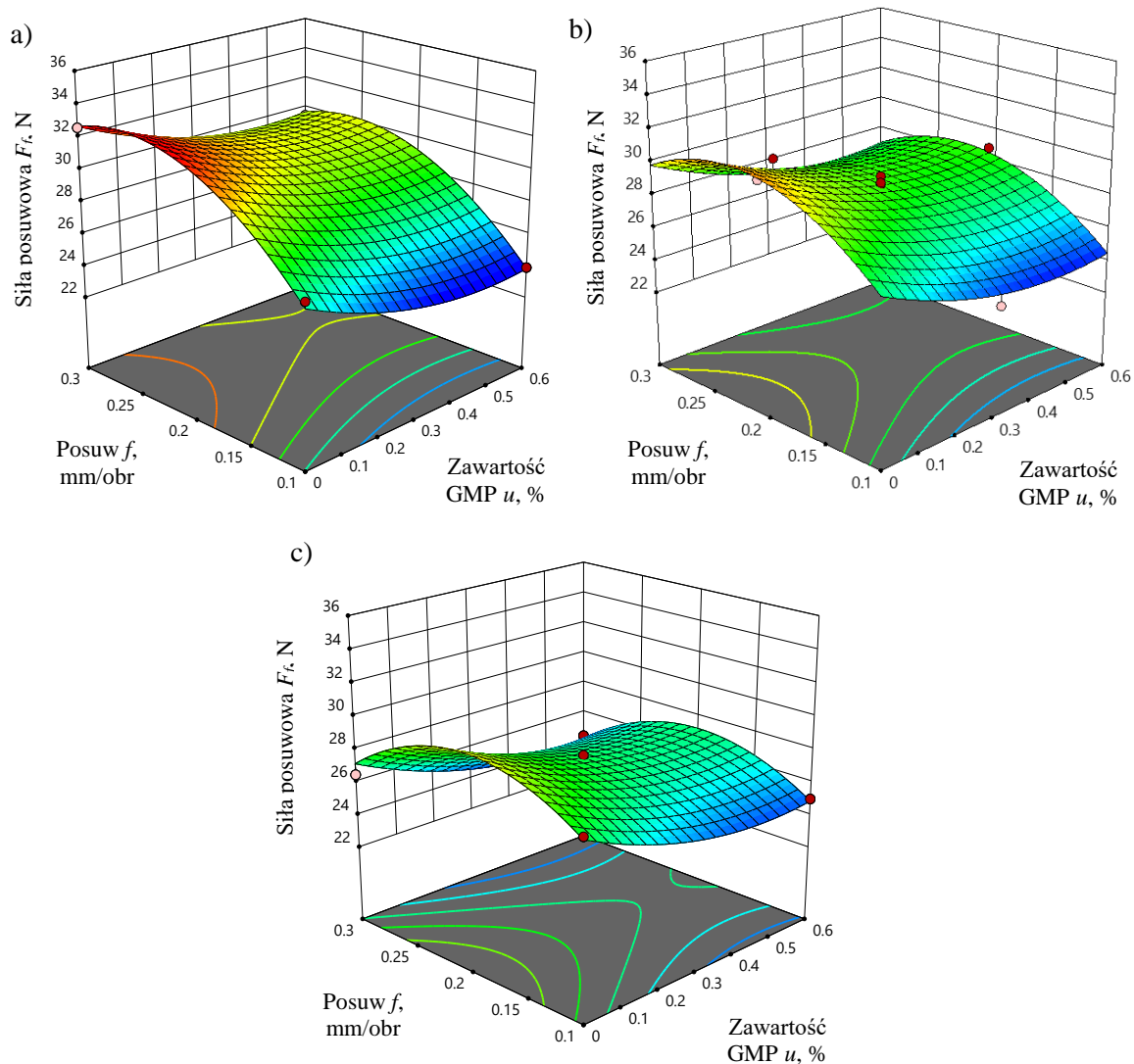
Powierzchnie opisujące wpływ zawartości GMP i posuwu na siłę posuwową, uzyskane na podstawie zależności (6) i (7), przedstawiono odpowiednio na rys. 5.13 oraz 5.15. Wartość siły posuwowej podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z cieczą, zarówno na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), jak i tereftalanu bis(2-etyloheksylu) malała wraz ze wzrostem zawartości mikroproszku grafitowego w cieczy. Różnice wynosiły nawet 14% i 11% przy zawartości GMP na poziomie 0,60% odpowiednio dla adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) – rys. 5.14 i 5.16. Wartości siły posuwowej były nieznacznie niższe (około 2–3%) podczas obróbki z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu).



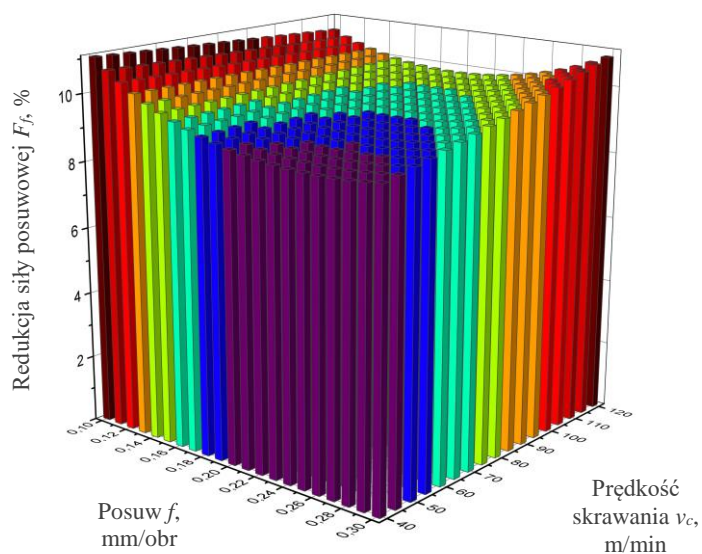
Rys. 5.13 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę posuwową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.14 Redukcja siły posuwowej F_f w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.15 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę posuwową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.16 Redukcja siły posuwowej F_t w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Tabela 5.9 przedstawia porównanie intensywności oddziaływania poszczególnych istotnych statystycznie czynników wejściowych modelu na składowe siły skrawania dla toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL przy zastosowaniu dwóch cieczy bazowych przy zmiennej zawartości dodatku GMP (0–0,60%). Poniższe porównanie wykonano na podstawie analizy wariancji.

Tabela 5.9 Porównanie oddziaływania istotnych statystycznie wejściowych czynników modelu na składowe siły skrawania dla cieczy bazowych – adypinianu bis(2-etyloheksylu) i tereftalanu bis(2-etyloheksylu).

Czynnik modelu	Składowe siły skrawania					
	Główna siła skrawania F_c		Siła odporowa F_p		Siła posuwowa F_f	
	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)
v_c	++	+++	+++	+	+++	+++
f	+++	+++	+++	+++	+++	+++
u	++	+++	+++	-	+++	+++
$v_c f$	++	+++	+++	+++	+++	+++
$v_c u$	-	-	-	-	-	-
$f u$	+	+	-	-	-	-
v_c^2	-	-	-	-	-	-
f^2	++	+++	+++	+	+++	+++
u^2	-	-	+++	-	-	+++

Oddziaływanie czynnika (istotne statystycznie):
+++ silne, ++ średnie, + słabe, - brak

Wartości składowych całkowitej siły skrawania podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym przedstawiono w tabeli 5.10 dla zawartości GMP w zakresie 0–0,30%.

Tabela 5.10 Wartości składowych całkowitej siły skrawania uzyskanych podczas toczenia w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym dla zawartości GMP w zakresie 0–0,30%.

Pomiar	Prędkość skrawania v_c , m/min	Posuw f , mm/obr	Zawartość GMP u , %	Składowe siły skrawania					
				F_c , N	F_p , N	F_f , N	F_c , N	F_p , N	F_f , N
				Adypinian bis(2-etyloheksylu)			Tereftalan bis(2-etyloheksylu)		
1	40	0,1	0,3	66,2	37,7	26,3	60,6	34,6	23,9
2	120	0,1	0,3	62	40,2	26,1	59,8	37,8	24,8
3	40	0,3	0,3	142,2	69,8	29,2	141,6	67,7	29,9
4	120	0,3	0,3	139,1	63,7	27,5	131,9	58,8	26,3
5	80	0,2	0	110,6	50,6	32	106	53,5	31,2
6	80	0,2	0,15	109,7	64,2	29,4	105	56,7	31
7	80	0,2	0,15	109,2	64	29	104,4	55,9	30,2
8	80	0,2	0,15	109,6	63,7	29,2	105,1	56,5	31,5
9	40	0,1	0	64,9	32,1	28,8	64,3	36,2	27,9
10	40	0,3	0	153,7	64,8	34,3	145,4	68,7	32,6
11	120	0,1	0	65	36,6	27,2	62,6	39,5	28
12	120	0,3	0	141,3	55,4	29,2	135,7	60,3	26
13	120	0,2	0,15	105,5	61,4	27,4	102,1	55,5	29,6
14	80	0,3	0,15	144,6	74,7	28,7	139,4	65,4	30,2
15	80	0,1	0,15	64,7	41,1	25,6	62,1	39,6	26,5
16	40	0,2	0,15	111,7	63,4	29,4	107,4	58,9	31,2
17	80	0,2	0,15	110,2	64,8	29,9	105,5	57,8	31,5
18	80	0,2	0,15	109,5	63,9	29,3	105,2	56,3	31,2
19	80	0,2	0,15	109,4	64,1	29,5	104,6	56,4	31,1
20	80	0,2	0,3	106,5	56,4	29,9	102,7	53,4	28,6

Równania (8) i (9) przedstawiają zależności modelowe głównej siły skrawania F_c uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu). Statystyki regresji dla modelu (8) i (9) przedstawiono w tabeli 5.11.

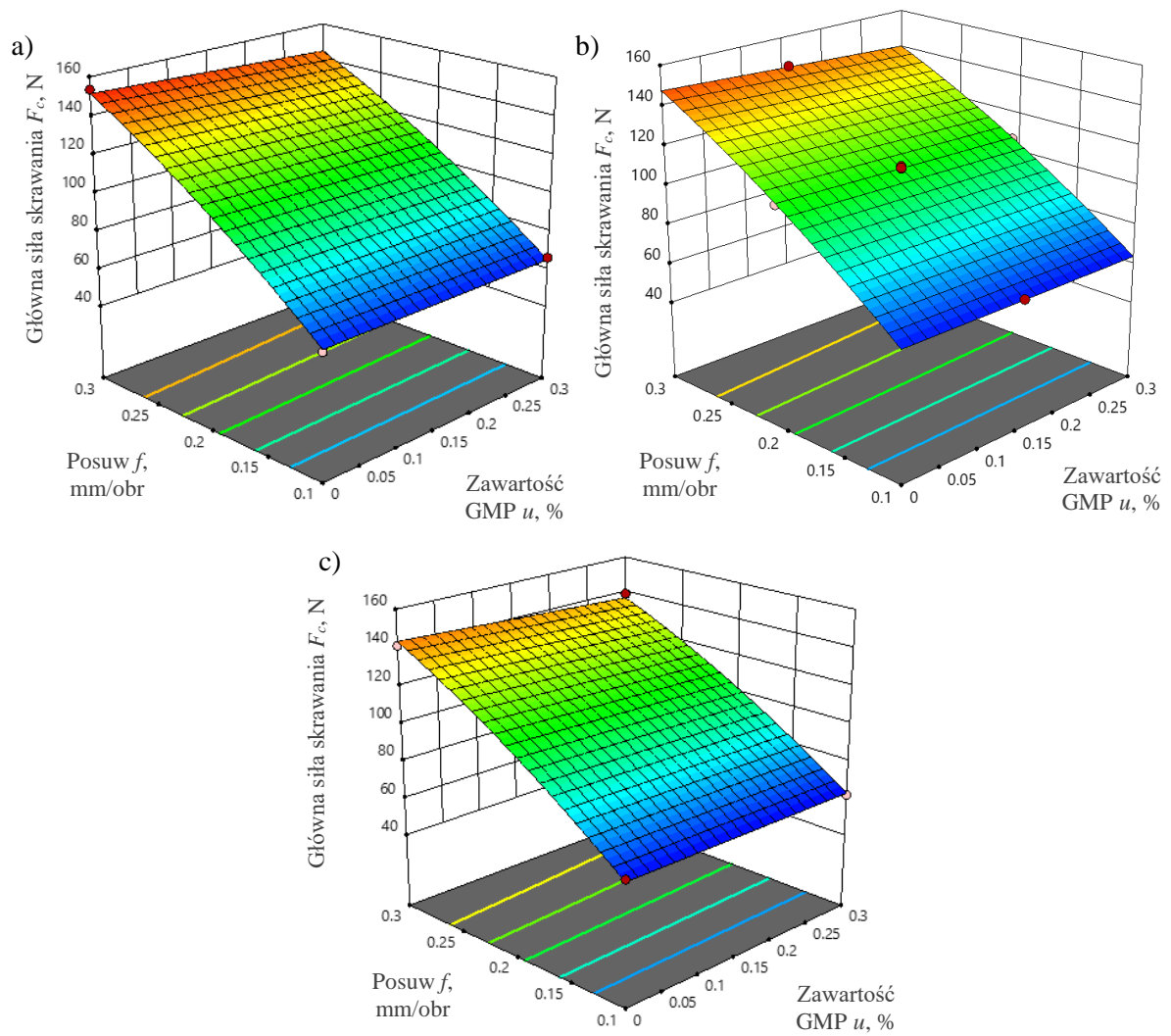
$$F_c = 8,22 + 0,007v_c + 639,8f + 7,5u - 0,356v_c f - 100fu - 495,5f^2 \quad (8)$$

$$F_c = 9,874 + 0,038v_c + 589,6f - 3,861u - 0,528v_c f - 406,875f^2 - 26,944u^2 \quad (9)$$

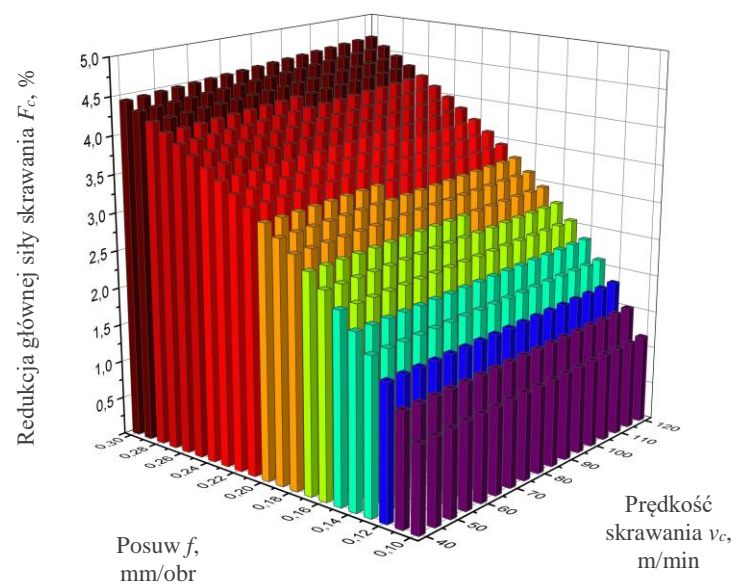
Tabela 5.11 Statystyki regresji dla modelu (8) i (9).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s, N	Wartość średnia \bar{y}, N	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(8)	1,45	107,07	1,36	0,99	0,99
(9)	0,32	102,71	0,32	0,99	0,99

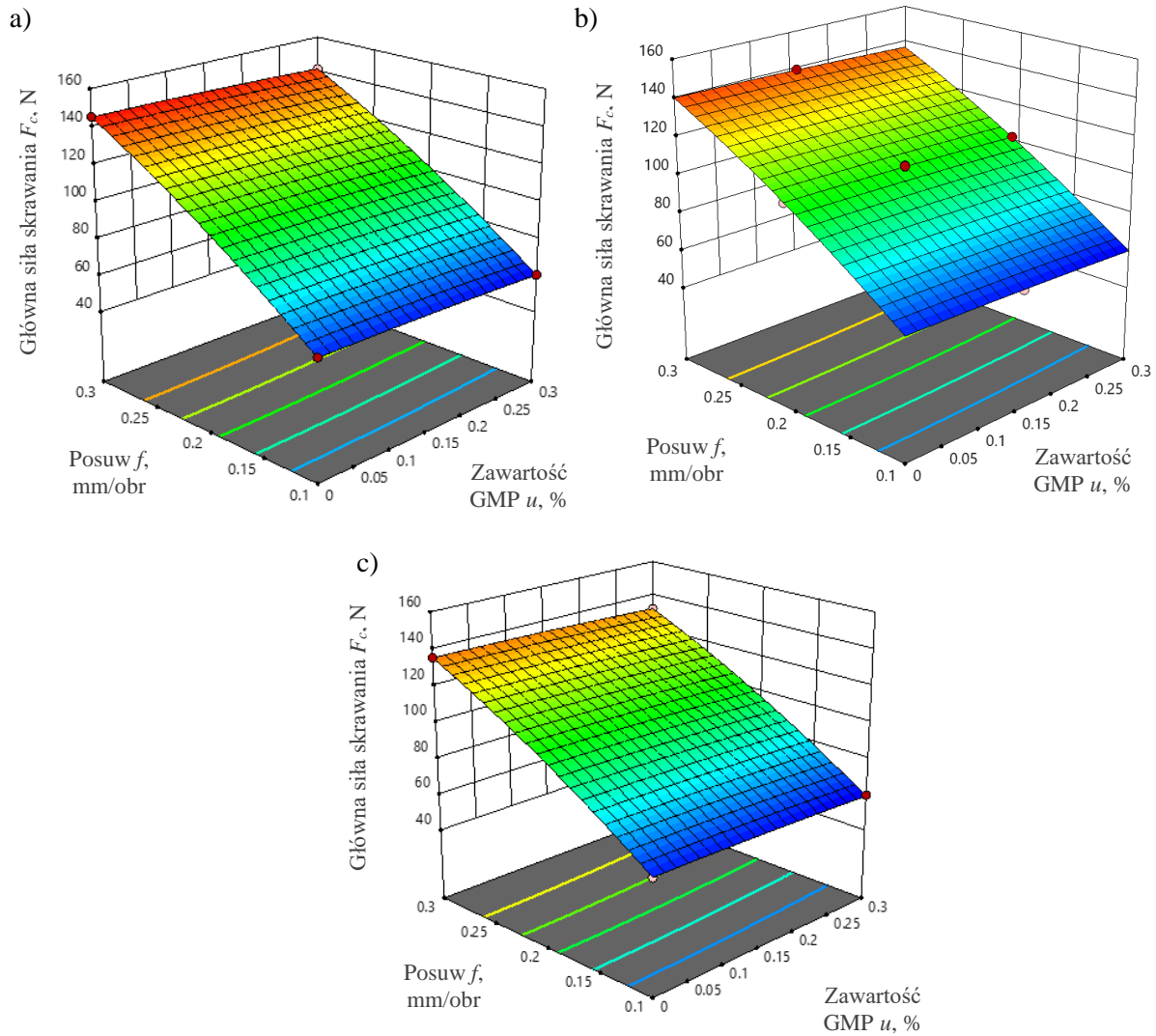
Powierzchnie opisujące wpływ zawartości GMP i posuwu na główną siłę skrawania, uzyskane na podstawie zależności (8) i (9), przedstawiono odpowiednio na rys. 5.17 oraz 5.19. Zarówno w przypadku cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), jak i tereftalanu bis(2-etyloheksylu) zmiana procentowej zawartości mikroproszku grafitowego w zakresie od 0% do 0,30% nie wykazywała istotnego wpływu na wartość głównej siły skrawania. Wartości głównej siły skrawania były mniejsze o 1,1–4,7% dla adypinianu bis(2-etyloheksylu) (rys. 5.18) oraz 2,5–5,7% dla tereftalanu bis(2-etyloheksylu) (rys. 5.20), przy zawartości 0,30% GMP, w porównaniu do obróbki z cieczą bez dodatku GMP. Wartości głównej siły skrawania podczas obróbki, gdzie ciecz bazową stanowił tereftalan bis(2-etyloheksylu) były mniejsze o około 1,3–7,3% w porównaniu do wartości głównej siły skrawania podczas obróbki, gdzie cieczą bazową był adypinian bis(2-etyloheksylu).



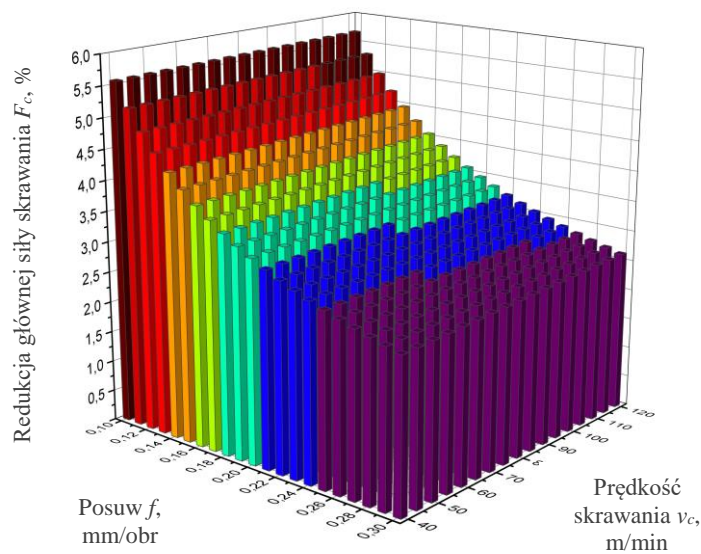
Rys. 5.17 Wpływ posuwu i zawartości GMP na główną siłę skrawania podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.18 Redukcja głównej siły skrawania F_c w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.19 Wpływ posuwu i zawartości GMP na główną siłę skrawania podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min



Rys. 5.20 Redukcja głównej siły skrawania F_c w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Równania (10) i (11) przedstawiają zależności modelowe siły odporowej F_p uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu). Statystyki regresji dla modelu (10) i (11) przedstawiono w tabeli 5.12.

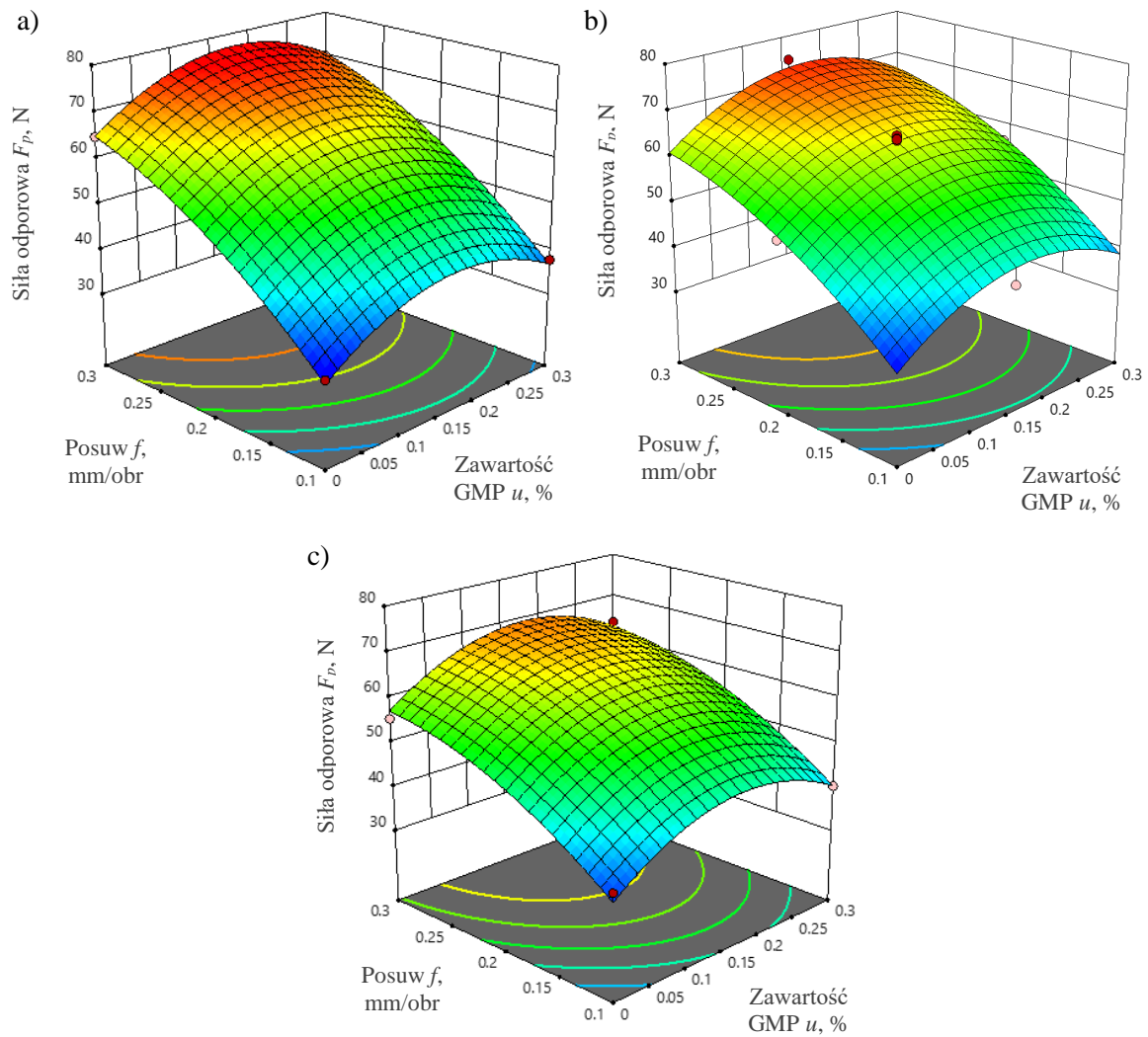
$$F_p = -3,792 + 0,114v_c + 376,575f + 140,847u - 0,703v_c f - 449,063f^2 + -407,083u^2 \quad (10)$$

$$F_p = 4,733 + 0,113v_c + 332,7f + 33,111u - 0,744v_c f - 350f^2 - 124,444u^2 \quad (11)$$

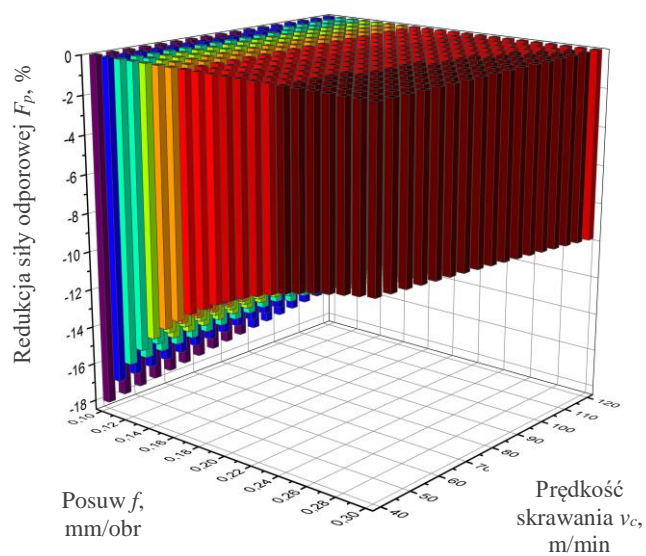
Tabela 5.12 Statystyki regresji dla modelu (10) i (11).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika reszkowego s, N	Wartość średnia \bar{y}, N	Współczynnik zmienności reszkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(10)	1,54	56,39	2,72	0,99	0,98
(11)	0,62	53,48	1,15	0,99	0,99

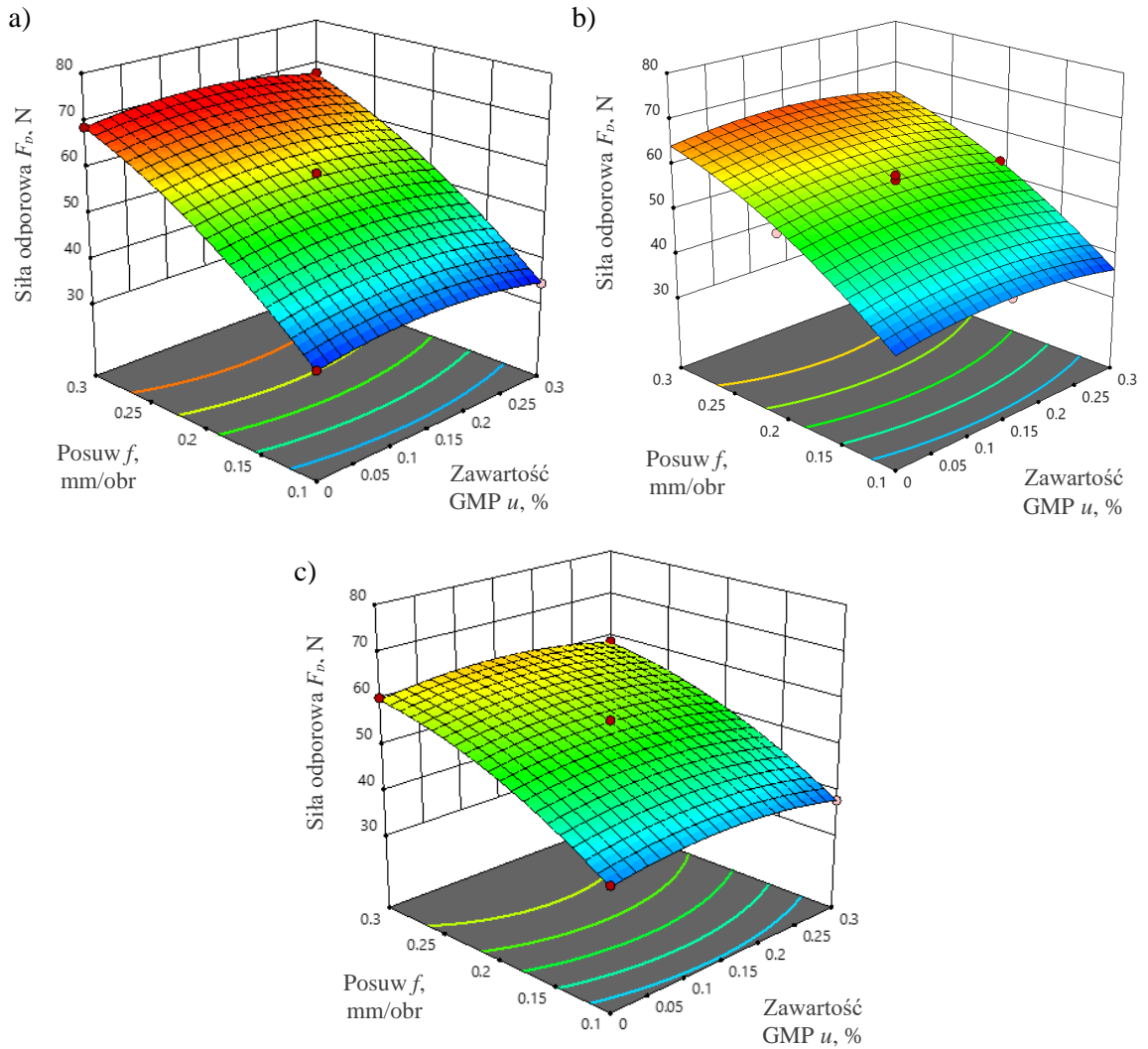
Powierzchnie opisujące wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę odporową, uzyskane na podstawie zależności (10) i (11) przedstawiono odpowiednio na rys. 5.21 oraz 5.23. Dla obróbki w warunkach MQL z cieczą na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,15% GMP prowadził do zwiększenia wartości siły odporowej od około 20% (dla wartości posuwu $f=0,2$ mm/obr i $f=0,3$ mm/obr) nawet do 38% dla posuwu 0,1 mm/obr w odniesieniu do obróbki z cieczą bez dodatku GMP. Dalszy wzrost procentowej zawartości GMP do 0,30% powodował zmniejszenie wartości siły odporowej, jednakże wartości te nadal były wyższe o około 9–18% od wartości uzyskanych podczas obróbki z cieczą bez dodatku GMP (rys. 5.22). Dla cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,15% GMP prowadził do zwiększenia wartości siły odporowej o 3,4–6,5%. Dalsze zwiększanie zawartości GMP prowadziło do zmniejszenia wartości siły odporowej – wartości te były mniejsze o 1,8–3,5% w odniesieniu do wartości otrzymanych podczas obróbki z cieczą bez dodatku GMP (rys. 5.24). W przypadku czystych cieczy bazowych mniejsze wartości siły odporowej uzyskano dla adypinianu bis(2-etyloheksylu) – różnica od 4,2% dla posuwu $f=0,3$ mm/obr do 16,3% dla posuwu 0,1 mm/obr. Dla cieczy z dodatkiem GMP, zarówno przy zawartości 0,15%, jak i 0,30% trend był odwrotny i mniejsze wartości siły odporowej uzyskano dla tereftalanu bis(2-etyloheksylu) – różnice w zakresie od 5% do 12,5%.



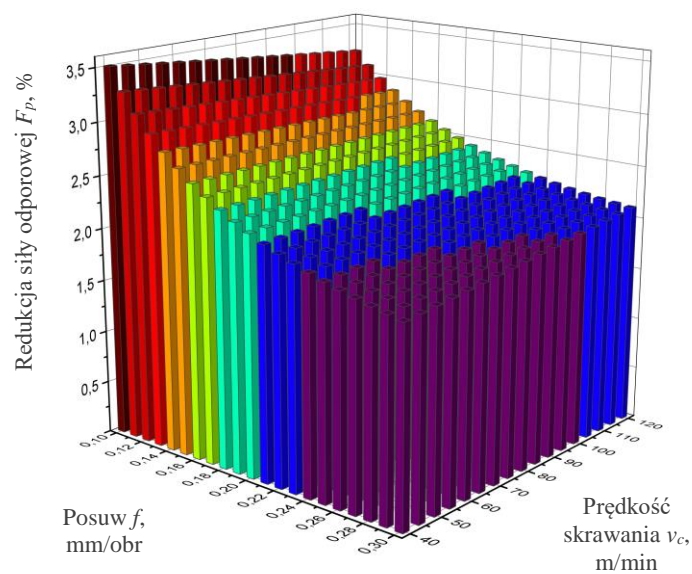
Rys. 5.21 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę odporową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.22 Redukcja siły odporowej F_p w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.23 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę odporową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c = 40$ m/min, b) $v_c = 80$ m/min, c) $v_c = 120$ m/min.



Rys. 5.24 Redukcja siły odporowej F_p w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Równania (12) i (13) przedstawiają zależności modelowe siły posuwowej F_f uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu). Statystyki regresji dla modeli (12) i (13) przedstawiono w tabeli 5.13.

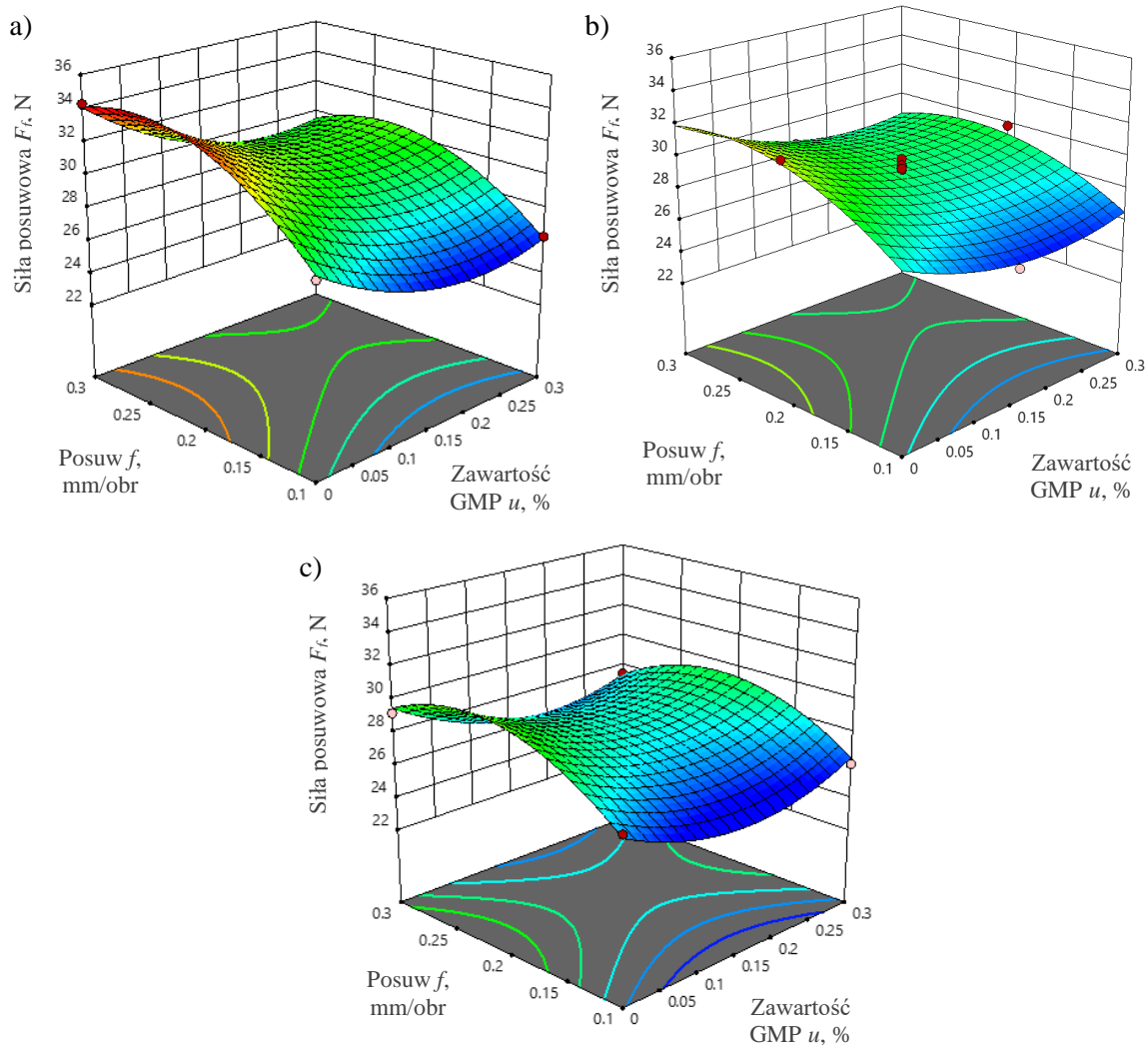
$$F_f = 19,508 - 0,01v_c + 130,588f - 36,451u - 0,156v_c f + 0,1v_c u + \\ -26,667fu - 247,969f^2 + 85,208u^2 \quad (12)$$

$$F_f = 17,189 + 0,031v_c + 135,588f - 9,896u - 0,35v_c f + 0,079v_c u + 40fu + \\ -249,219f^2 - 44,236u^2 \quad (13)$$

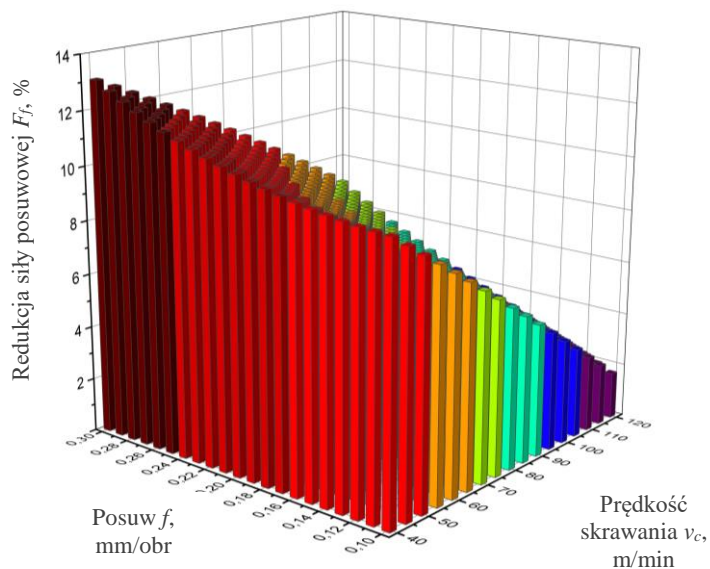
Tabela 5.13 Statystyki regresji dla modeli (12) i (13).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s, N	Wartość średnia \bar{y}, N	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(12)	0,54	29,15	1,86	0,96	0,92
(13)	0,55	29,22	1,89	0,97	0,94

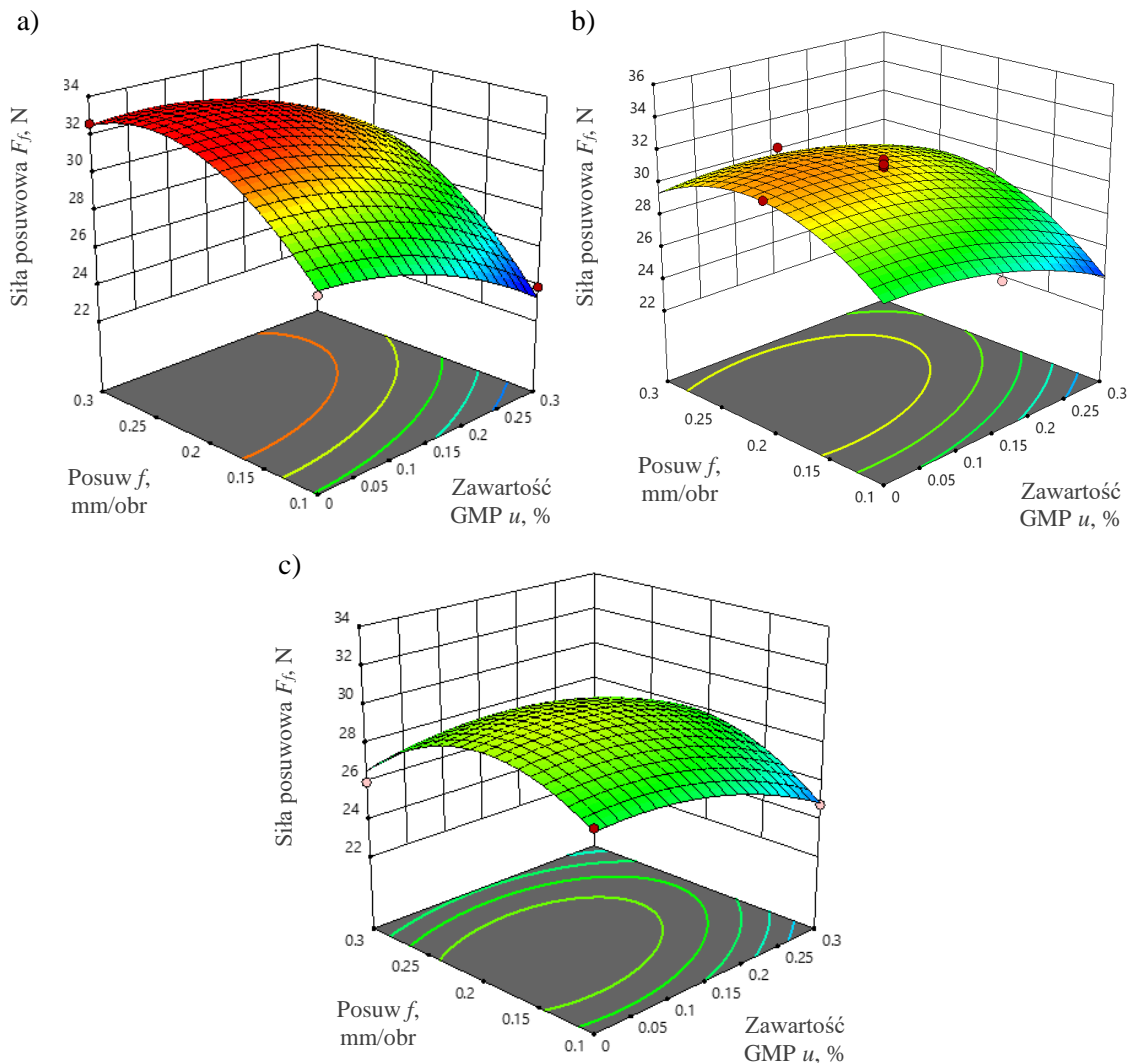
Rys. 5.25 oraz 5.27 przedstawiają powierzchnie, opisujące wpływ posuwu oraz zawartości GMP na siłę posuwową, uzyskane odpowiednio na podstawie zależności (12) i (13). W przypadku siły posuwowej dodatek 0,15% GMP prowadził do zmniejszenia wartości siły o około 8–12% (dla adypinianu bis(2-etyloheksylu)) oraz 0–5% (dla tereftalanu bis(2-etyloheksylu)). Dalszy wzrost zawartości GMP do wartości 0,30% w przypadku cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) prowadził do nieznacznego wzrostu wartości siły posuwowej (wartości te były nadal mniejsze od wartości uzyskanych podczas obróbki z czystą cieczą bazową o około 2–13% – rys. 5.26). W przypadku tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,30% GMP prowadził do zmniejszenia wartości siły posuwowej o około 2–17% w porównaniu do czystej cieczy bazowej (rys. 5.28), przy czym większe różnice zaobserwowano dla mniejszych wartości posuwu. Dla czystych cieczy bazowych oraz dla cieczy z dodatkiem 0,30% GMP mniejsze wartości siły posuwowej uzyskano dla tereftalanu bis(2-etyloheksylu) – różnice do 10%. Natomiast dla cieczy z dodatkiem 0,15% GMP mniejsze wartości siły posuwowej uzyskano podczas obróbki z cieczą na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu).



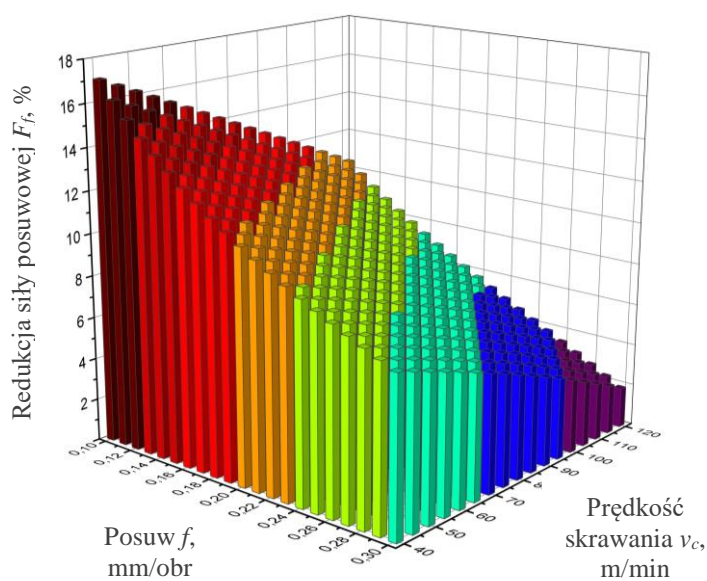
Rys. 5.25 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę posuwową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.26 Redukcja siły posuwowej F_f w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.27 Wpływ posuwu i zawartości GMP na siłę posuwową podczas toczenia wykończeniowego stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu): a) $v_c=40$ m/min, b) $v_c=80$ m/min, c) $v_c=120$ m/min.



Rys. 5.28 Redukcja siły posuwowej F_f w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Tabela 5.14 przedstawia porównanie intensywności oddziaływania poszczególnych istotnych statystycznie czynników wejściowych modelu na składowe siły skrawania dla toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL przy zastosowaniu dwóch cieczy bazowych przy zmiennej zawartości dodatku GMP (0–0,30%). Poniższe porównanie wykonano na podstawie analizy wariancji.

Tabela 5.14 Porównanie oddziaływania istotnych statystycznie wejściowych czynników modelu na składowe siły skrawania dla cieczy bazowych – adypinianu bis(2-etyloheksylu) i tereftalanu bis(2-etyloheksylu).

Czynnik modelu	Składowe siły skrawania					
	Główna siła skrawania F_c		Siła odporowa F_p		Siła posuwowa F_f	
	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)
v_c	+++	+++	+	+++	+++	+++
f	+++	+++	+++	+++	+++	+++
u	++	+++	+	+	+	+++
$v_c f$	+	+++	+++	+++	++	+++
$v_c u$	-	-	-	-	++	+
$f u$	+	-	-	-	+	++
v_c^2	-	-	-	-	-	-
f^2	+++	+++	++	+++	++	+++
u^2	-	+	+++	+++	+	++
Oddziaływanie czynnika (istotne statystycznie): +++ silne, ++ średnie, + słabe, - brak						

Zmiany poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania w wyniku zmiany stężenia mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej wynikają ze zmiany warunków tribologicznych w strefie skrawania. Mikrometryczny proszek grafitowy uważany jest za bardzo dobry środek smarny, wobec tego wzbogacenie nim cieczy bazowej podawanej w warunkach MQL prowadzi do zmniejszenia współczynnika tarcia pomiędzy narzędziem, przedmiotem obrabianym i wiórem. Zmiana współczynnika tarcia prowadzi do zmiany kąta tarcia, a więc także do zmiany wartości poszczególnych składowych całkowitej siły skrawania. Zaobserwowane tendencje zmian wartości głównej siły skrawania oraz siły odporowej znajdują także odzwierciedlenie w wynikach symulacji MES, przedstawionych w autorskiej publikacji [172].

5.2.3. Kształtowanie chropowatości powierzchni

Opracowano modele parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sz uwzględniające zmianę prędkości skrawania, posuwu oraz procentowej zawartości GMP dla toczenia w warunkach MQL z cieczami smarującymi opartymi na dwóch cieczach bazowych

Tabela 5.15 przedstawia wartości parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sz po toczeniu wykończeniowym stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym dla cieczy chłodząco-smarujących z dodatkiem GMP w zakresie 0–0,60%.

Tabela 5.15 Wartości parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sz zmierzonych po toczeniu w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym dla zmiany zawartości GMP w zakresie 0–0,60%

Pomiar	Prędkość skrawania v_c , m/min	Posuw f , mm/obr	Zawartość GMP u , %	Parametry chropowatości			
				Sa , μm	Sz , μm	Sa , μm	Sz , μm
				Adypinian bis(2-etyloheksylu)		Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	
1	40	0,1	0,6	1,7	13,9	1,3	11,5
2	120	0,1	0,6	1,5	10,5	1,1	9,1
3	40	0,3	0,6	8,4	39,2	8,1	38,1
4	120	0,3	0,6	8,1	38,5	7,8	38,2
5	80	0,2	0	3,3	19,5	3,1	18,9
6	80	0,2	0,3	3,7	19,8	4	21,6
7	80	0,2	0,3	3,6	21,2	3,8	21,6
8	80	0,2	0,3	3,8	21,5	3,6	19,2
9	40	0,1	0	1,5	13,1	1,4	13,5
10	40	0,3	0	8,1	38,4	7,1	35,7
11	120	0,1	0	2,1	14,6	1,3	10,1
12	120	0,3	0	8,6	39,8	7,6	39
13	120	0,2	0,3	3,6	21,1	3,6	19,9
14	80	0,3	0,3	8,1	38,7	8	38,4
15	80	0,1	0,3	1,9	14,7	2	12,1
16	40	0,2	0,3	3,8	20,7	3,8	23,6
17	80	0,2	0,3	3,5	18,5	3,9	20,5
18	80	0,2	0,3	3,7	20,2	3,7	20,4
19	80	0,2	0,3	3,6	20,5	3,8	20,3
20	80	0,2	0,6	4	21,1	3,6	19,5

Istotność wpływu parametrów skrawania na parametry chropowatości powierzchni Sa i Sz została określona na podstawie analizy wyników badań. Odpowiednie modele dobrano w oparciu o analizę wariancji ANOVA i na tej podstawie uzyskano zależności dla parametrów Sa i Sz w funkcji istotnych parametrów wejściowych. Równania (14) i (15) przedstawiają zależności modelowe parametru chropowatości powierzchni Sa uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z zawartością mikroproszku grafitowego w zakresie 0–0,60%. Statystyki regresji dla modeli (14) i (15) przedstawiono w tabeli 5.16.

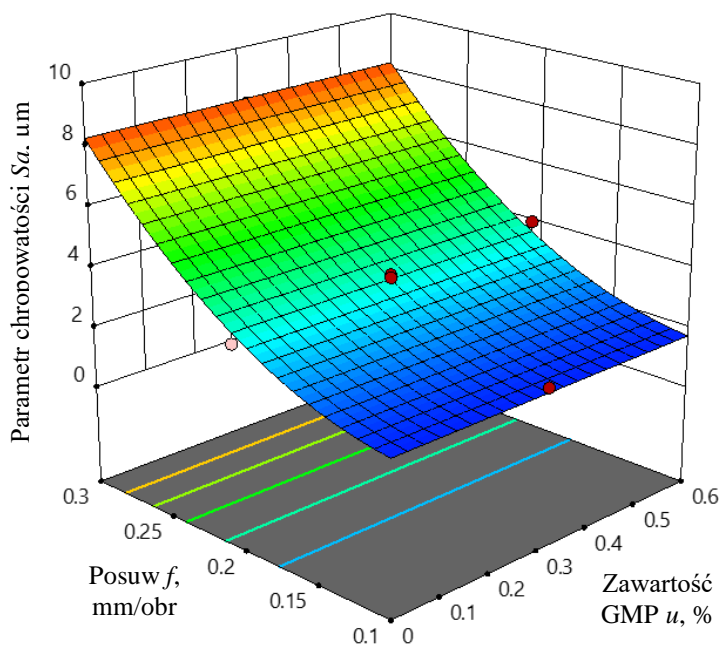
$$Sa = 2,48 - 20,733f + 133,333f^2 \quad (14)$$

$$Sa = 1,768 - 14,688f + 1,941u + 6,25fu + 110,781f^2 - 4,67u^2 \quad (15)$$

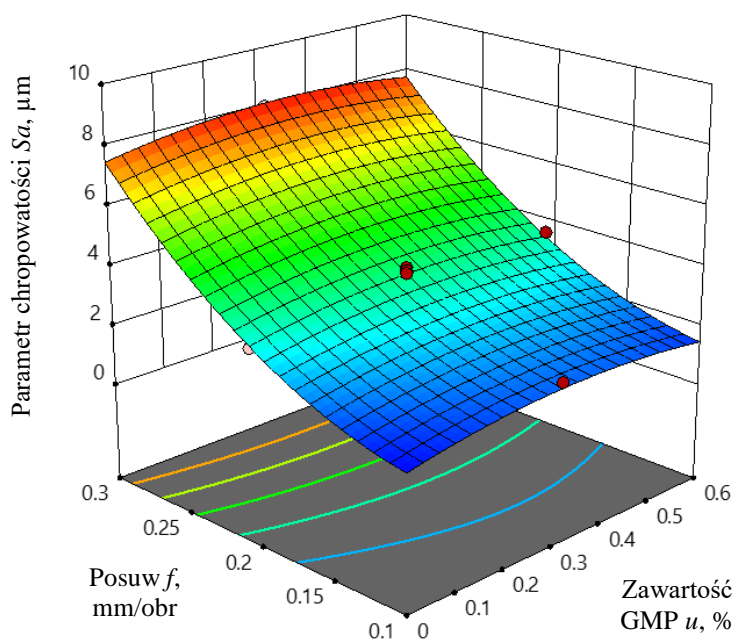
Tabela 5.16 Statystyki regresji dla modelu (14) i (15).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika reszkowego $s, \mu\text{m}$	Wartość średnia $\bar{y}, \mu\text{m}$	Współczynnik zmienności reszkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(14)	0,22	4,27	5,14	0,99	0,99
(15)	0,18	4,07	4,37	0,99	0,99

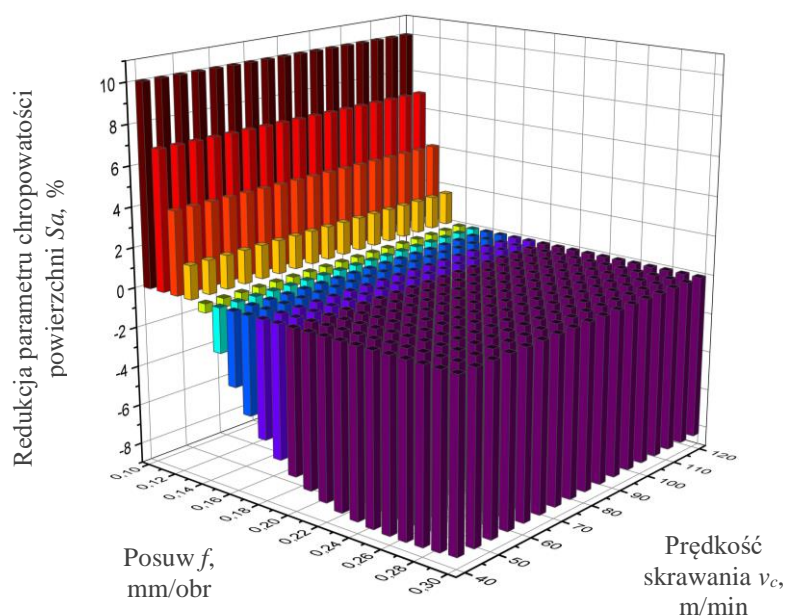
Rys. 5.29 i 5.30 przedstawiają powierzchnie otrzymane na podstawie zależności (14) i (15), przedstawiające wpływ wartości posuwu oraz zawartości GMP w cieczy na wartość parametru chropowatości powierzchni Sa . W przypadku cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) wpływ dodatku mikroproszku grafitowego był pomijalnie mały. Natomiast w przypadku obróbki w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,30% GMP prowadził do wzrostu wartości parametru chropowatości powierzchni Sa o 9–25%, przy czym przyrost był większy dla większych wartości posuwu. Przy dodatku 0,60% mikrometrycznego proszku grafitowego wartości parametru Sa zostały zredukowane nawet do 10% dla dolnego zakresu wartości posuwu, natomiast dla obróbki z wyższymi wartościami posuwu odnotowano wzrost wartości parametru chropowatości powierzchni Sa po obróbce do około 8% w stosunku do obróbki w warunkach MQL z cieczą bez dodatku GMP (rys. 5.31).



Rys. 5.29 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości Sa po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.



Rys. 5.30 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości Sa po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.



Rys. 5.31 Redukcja parametru chropowatości powierzchni S_a w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,60% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Równania (16) i (17) przedstawiają zależności modelowe parametru chropowatości powierzchni S_z uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z zawartością mikroproszku grafitowego w zakresie 0–0,60%. Statystyki regresji dla modelu (16) i (17) przedstawiono w tabeli 5.17.

$$S_z = 18,025 - 104,8f + 581,5f^2 \quad (16)$$

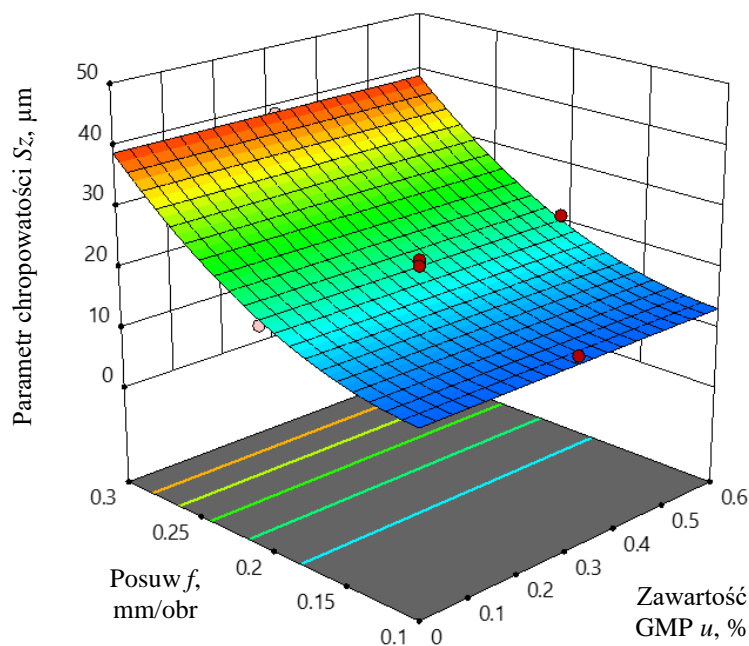
$$S_z = 12,548 - 66,713f + 10,191u + 499,531f^2 - 16,476u^2 \quad (17)$$

Tabela 5.17 Statystyki regresji dla modelu (16) i (17).

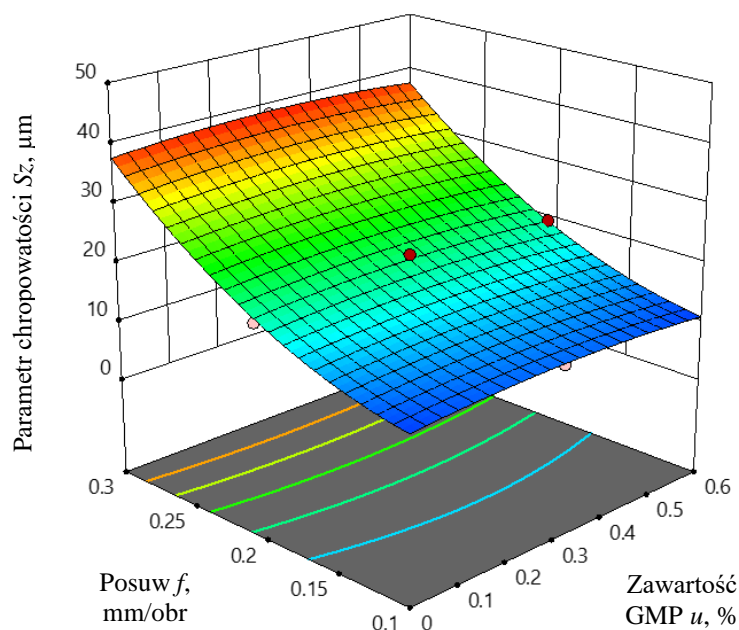
Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s , μm	Wartość średnia \bar{y} , μm	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(16)	1,09	22,97	4,76	0,99	0,99
(17)	1,39	22,22	6,27	0,98	0,98

Rys. 5.32 i 5.33 przedstawiają powierzchnie otrzymane na podstawie zależności (16) i (17), przedstawiające wpływ wartości posuwu oraz zawartości GMP w cieczy na wartość parametru chropowatości powierzchni S_z . Dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) nie stwierdzono istotnego wpływu dodatku mikroproszku grafitowego na wartość parametru chropowatości powierzchni S_z . Natomiast w przypadku obróbki w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,30% GMP prowadził do zwiększenia wartości parametru chropowatości

powierzchni S_z o 4–14,5%, przy czym wzrost był większy dla mniejszych wartości posuwu. Przy dodatku 0,60% mikrometrycznego proszku grafitowego wartości parametru S_z były większe o 0,5–1,5% dla w stosunku do wartości uzyskanych dla czystej cieczy bazowej.



Rys. 5.32 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości S_z po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.



Rys. 5.33 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości S_z po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.

Tabela 5.18 przedstawia porównanie intensywności oddziaływania poszczególnych istotnych statystycznie czynników wejściowych modelu na parametry chropowatości powierzchni dla toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL przy zastosowaniu dwóch cieczy bazowych przy zmiennej zawartości dodatku GMP (0–0,60%). Poniższe porównanie wykonano na podstawie analizy wariancji.

Tabela 5.18 Porównanie oddziaływania istotnych statystycznie wejściowych czynników modelu na parametry chropowatości powierzchni dla cieczy bazowych – adypinianu bis(2-etyloheksylu) i tereftalanu bis(2-etyloheksylu).

Czynnik modelu	Parametry chropowatości powierzchni			
	Sa		Sz	
	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)
v_c	-	-	-	-
f	+++	+++	+++	+++
u	-	-	-	-
$v_c f$	-	-	-	-
$v_c u$	-	-	-	-
$f u$	-	-	-	-
v_c^2	-	-	-	-
f^2	+++	+++	+++	+++
u^2	-	++	-	+

Oddziaływanie czynnika (istotne statystycznie):
+++ silne, ++ średnie, + słabe, - brak

Wartości parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sz zmierzone po toczeniu wykończeniowym stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym zostały przedstawione w tabeli 5.19 dla cieczy smarujących z dodatkiem GMP w zakresie 0–0,30%.

Równania (18) i (19) przedstawiają zależności modelowe parametru chropowatości powierzchni Sa uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z zawartością mikroproszku grafitowego w zakresie 0–0,30%. Statystyki regresji dla modeli (18) i (19) przedstawiono w tabeli 5.20.

$$Sa = 2,335 - 18,475f - 12,597u + 125,938f^2 + 39,583u^2 \quad (18)$$

$$Sa = 1,918 - 0,005v_c - 15,838f + 7,382u + 0,041v_c f - 0,031v_c u + 9,167fu + \\ + 107,031f^2 - 15,903u^2 \quad (19)$$

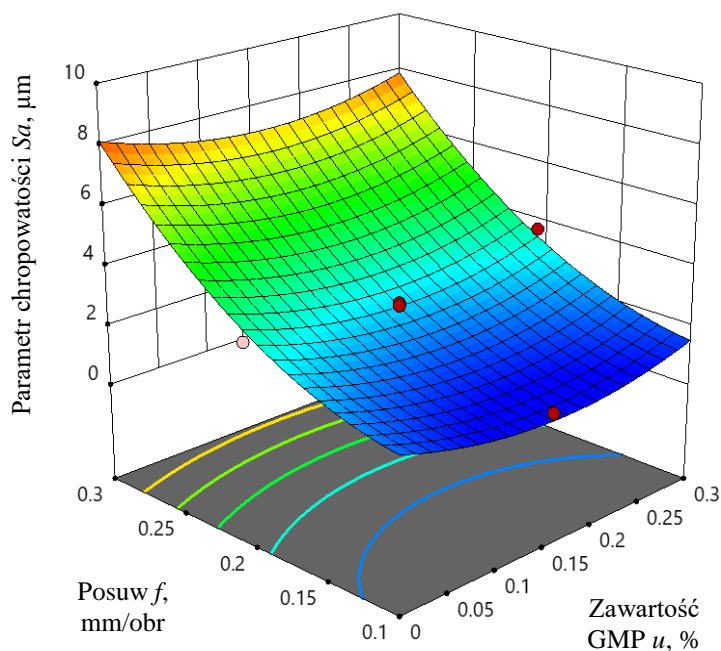
Tabela 5.19 Wartości parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sz zmierzonych po toczeniu w warunkach MQL zgodnie z przyjętym planem badawczym dla zmiany zawartości GMP w zakresie 0–0,30%

Pomiar	Prędkość skrawania v_c , m/min	Posuw f , mm/obr	Zawartość GMP u , %	Parametry chropowatości			
				Sa , μm	Sz , μm	Sa , μm	Sz , μm
				Adypinian bis(2-etyloheksylu)		Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	
1	40	0,1	0,3	1,3	11	2,1	15,5
2	120	0,1	0,3	1,4	10,4	1,2	11,4
3	40	0,3	0,3	8	37,6	8,3	42,6
4	120	0,3	0,3	7,8	38	8,1	38,5
5	80	0,2	0	3,3	19,5	3,1	18,9
6	80	0,2	0,15	2,8	16,3	4,1	21,2
7	80	0,2	0,15	2,6	18,1	3,9	22,5
8	80	0,2	0,15	2,7	18,5	4,1	22,7
9	40	0,1	0	1,5	13,1	1,4	13,5
10	40	0,3	0	8,1	38,4	7,1	35,7
11	120	0,1	0	2,1	14,6	1,3	10,1
12	120	0,3	0	8,6	39,8	7,6	39
13	120	0,2	0,15	2,4	18	3,8	21,3
14	80	0,3	0,15	6,7	33	8,3	38,1
15	80	0,1	0,15	1	9,9	1,8	13
16	40	0,2	0,15	2,8	19,5	3,7	20,5
17	80	0,2	0,15	2,8	22,6	3,8	20,8
18	80	0,2	0,15	2,7	17,5	4	21,2
19	80	0,2	0,15	2,8	18,3	4	21,5
20	80	0,2	0,3	3,7	19,8	4	21,6

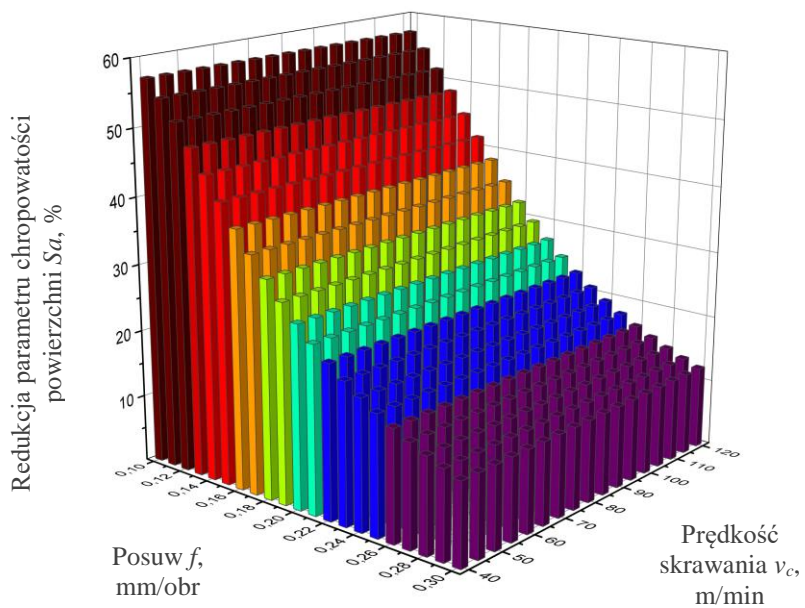
Tabela 5.20 Statystyki regresji dla modeli (18) i (19).

Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s , μm	Wartość średnia \bar{y} , μm	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(18)	0,28	3,74	7,36	0,99	0,99
(19)	0,15	4,23	3,65	0,99	0,99

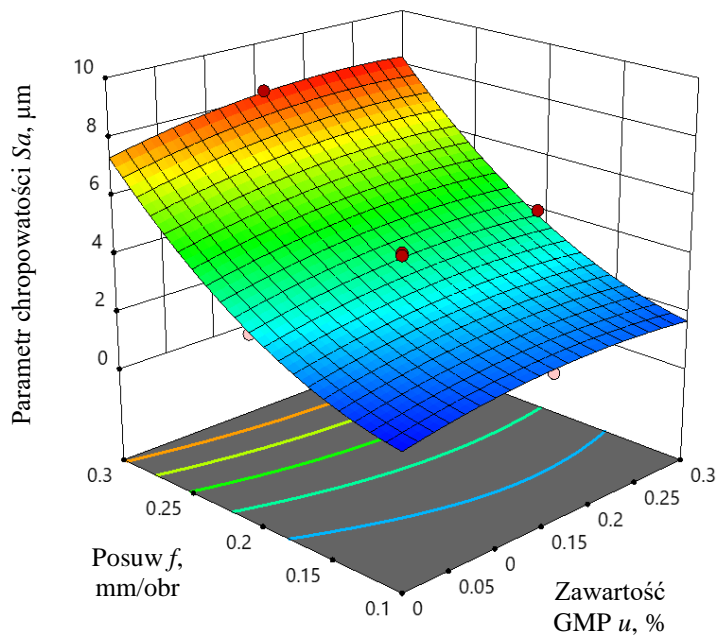
Rys. 5.34 i 5.36 przedstawiają powierzchnie wyznaczone na podstawie zależności (18) i (19), opisujące wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości Sa , dla prędkości skrawania $v_c=80$ mm/min. Wartości parametru chropowatości powierzchni Sa po obróbce stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z cieczą na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem 0,15% GMP były mniejsze o 12–58% w porównaniu do wartości uzyskanych po obróbce z czystą cieczą bazową, przy czym wraz ze wzrostem wartości posuwu, różnice te były coraz mniejsze, niezależnie od wartości prędkości skrawania (rys. 5.35). Dodatek 0,30% GMP także prowadził do zmniejszenia wartości parametru chropowatości powierzchni Sa , jednakże różnice te były już mniejsze niż dla dodatku 0,15% i wynosiły 2,5–12,5%. W przypadku cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), dodatek zarówno 0,15%, jak i 0,30% GMP, prowadził do zwiększenia wartości parametru chropowatości powierzchni Sa o 5–50%, przy czym różnica ta była mniejsza dla większych wartości posuwu i prędkości skrawania (rys. 5.37).



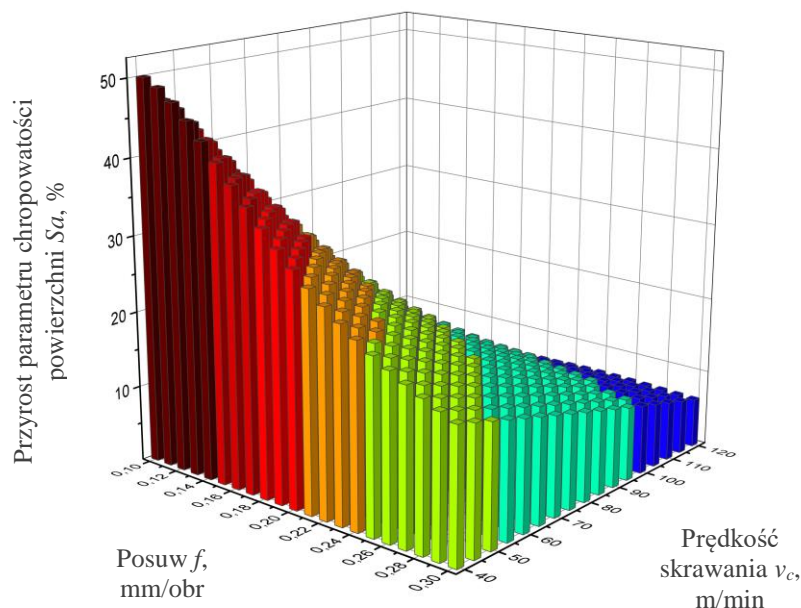
Rys. 5.34 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości Sa po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.



Rys. 5.35 Redukcja parametru chropowatości powierzchni S_a w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,15% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.36 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości S_a po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.



Rys. 5.37 Przyrost parametru chropowatości powierzchni S_a w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Równania (20) i (21) przedstawiają zależności modelowe parametru chropowatości powierzchni S_z uzyskane odpowiednio dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z zawartością mikroproszku grafitowego w zakresie 0–0,30%. Statystyki regresji dla modeli (20) i (21) przedstawiono w tabeli 5.21.

$$S_z = 13,431 - 50,888f - 34,271u + 446,719f^2 + 102,014u^2 \quad (20)$$

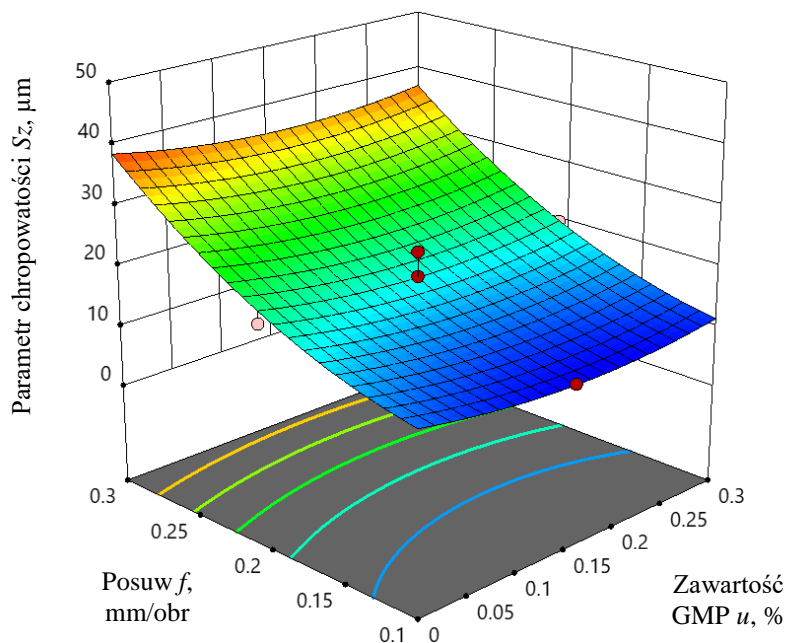
$$S_z = 15,438 - 0,035v_c - 76,95f + 22,444u + 0,209v_c f - 0,169v_c u + 476,5f^2 \quad (21)$$

Tabela 5.21 Statystyki regresji dla modeli (20) i (21).

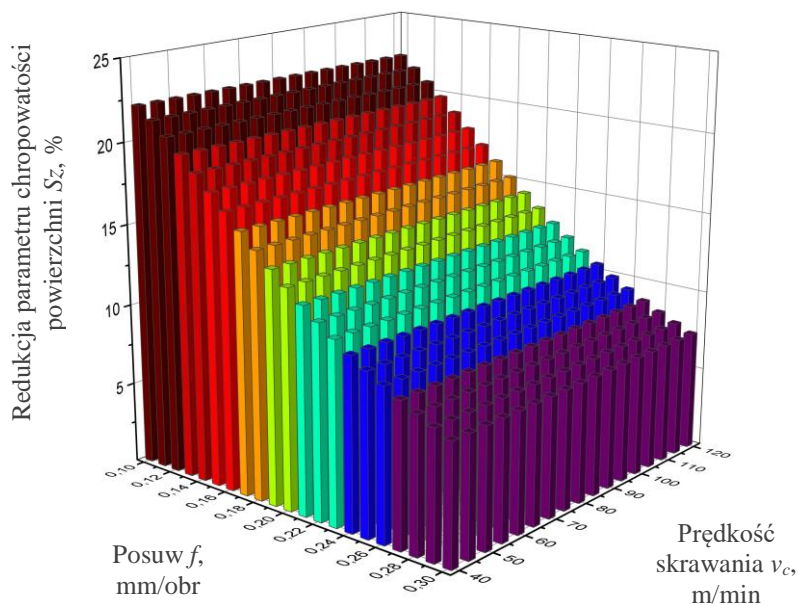
Model	Parametr statystyczny				
	Odchylenie standardowe składnika resztkowego s , μm	Wartość średnia \bar{y} , μm	Współczynnik zmienności resztkowej C.V., %	Współczynnik determinacji R^2	Skorygowany współczynnik determinacji R^2_{koryg}
(20)	1,81	21,56	8,38	0,98	0,97
(21)	1,21	23,14	5,21	0,99	0,98

Rys. 5.38 i 5.40 przedstawiają powierzchnie wyznaczone na podstawie zależności (16) i (17), opisujące wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości S_z , dla prędkości skrawania $v_c=80$ mm/min. Wartości parametru S_z po toczeniu wykończeniowym stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z cieczą na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem 0,15% GMP były mniejsze o 7–22% w stosunku do wartości uzyskanych po obróbce z czystą cieczą bazową (rys. 5.39).

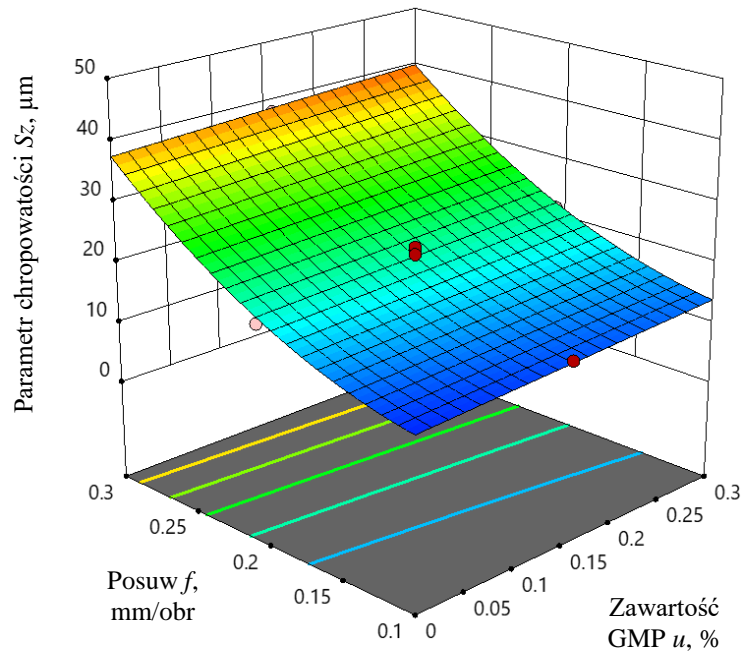
Analogicznie jak w przypadku parametru chropowatości powierzchni Sa , różnice te były coraz mniejsze wraz ze wzrostem wartości posuwu, niezależnie od wartości prędkości skrawania. Dodatek 0,30% GMP także prowadził do zmniejszenia wartości parametru chropowatości powierzchni Sz , jednakże różnice te były już mniejsze niż dla dodatku 0,15% i wynosiły 3-8,5%. W przypadku cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), dodatek 0,15% GMP prowadził do wzrostu wartości parametru chropowatości powierzchni Sz o 1–19%, natomiast dodatek 0,30% prowadził do wzrostu 2–39%, przy czym różnice te malały wraz ze wzrostem wartości posuwu i prędkości skrawania (rys. 5.41).



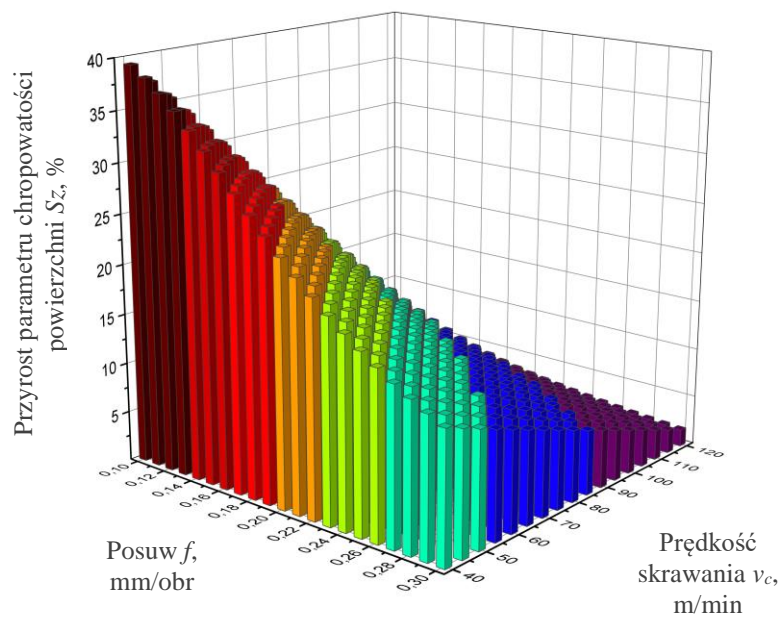
Rys. 5.38 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości Sz po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80$ m/min.



Rys. 5.39 Redukcja parametru chropowatości powierzchni Sz w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,15% w cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.



Rys. 5.40 Wpływ posuwu i zawartości GMP na parametr chropowatości S_z po toczeniu wykończeniowym stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), $v_c=80\text{m/min}$.



Rys. 5.41 Przyrost parametru chropowatości powierzchni S_z w wyniku zwiększenia zawartości GMP od 0 do 0,30% w cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V.

Tabela 5.22 przedstawia porównanie intensywności oddziaływania poszczególnych istotnych statystycznie czynników wejściowych modelu na parametry chropowatości powierzchni dla toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL przy zastosowaniu dwóch cieczy bazowych przy zmiennej zawartości dodatku GMP (0–0,30%). Poniższe porównanie wykonano na podstawie analizy wariancji.

Tabela 5.22 Porównanie oddziaływania istotnych statystycznie wejściowych czynników modelu na parametry chropowatości powierzchni dla cieczy bazowych – adypinianu bis(2-etyloheksylu) i tereftalanu bis(2-etyloheksylu).

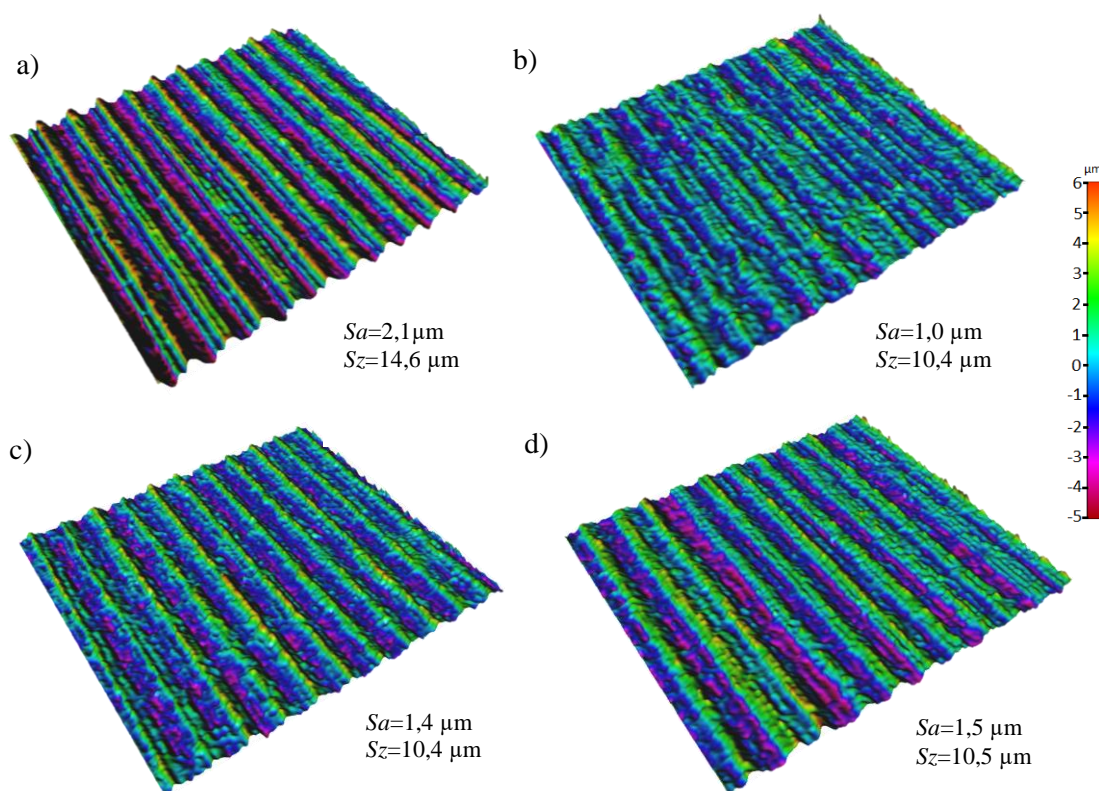
Czynnik modelu	Parametry chropowatości powierzchni			
	Sa		Sz	
	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)	Adypinian bis(2-etyloheksylu)	Tereftalan bis(2-etyloheksylu)
v_c	-	-	-	+
f	+++	+++	+++	+++
u	-	++	-	++
$v_c f$	-	+	-	+
$v_c u$	-	++	-	+
fu	-	+	-	-
v_c^2	-	-	-	-
f^2	+++	+++	++	+++
u^2	+	+	+	-
Oddziaływanie czynnika (istotne statystycznie): +++ silne, ++ średnie, + słabe, - brak				

Rys. 5.42–5.47 przedstawiają widoki izometryczne powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem zarówno cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu), jak i tereftalanu bis(2-etyloheksylu). W przypadku adypinianu bis(2-etyloheksylu) zaobserwowano wyraźne zmniejszenie mierzonych parametrów chropowatości przy zawartości 0,15% GMP. Analiza morfologii powierzchni po toczeniu z posuwem $f=0,1$ mm/obr wykazała, że dla takiej zawartości GMP następuje wyraźne wypłaszczenie wierzchołków prowadzące do zmniejszenia charakterystycznych dla toczenia śladów będących wynikiem posuwu. Wraz ze wzrostem posuwu $f=0,2$ mm/obr i $f=0,3$ mm/obr wpływ dodatku GMP również jest zauważalny, choć w mniejszym stopniu. Dla większych wartości posuwu jego oddziaływanie na profil topografii nie jest dominujące.

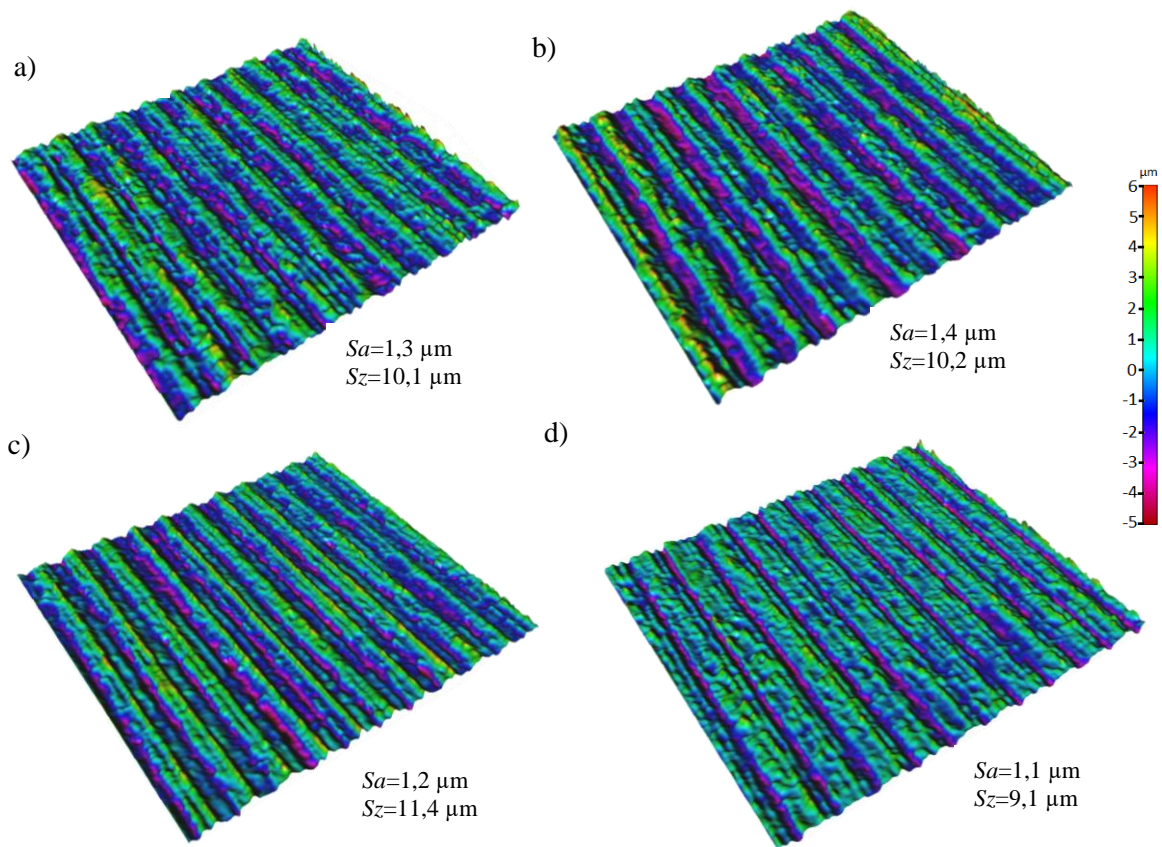
Dalsze zwiększanie stężenia GMP w przypadku adypinianu bis(2-etyloheksylu) powoduje nieznaczne zwiększenie parametrów chropowatości i zarówno dla stężenia 0,30% GMP, jak i 0,60% GMP nie wpływa na występowanie istotnych różnic w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrabianej. Ekstremum występujące przy zawartości 0,15% GMP należy wyjaśnić oddziaływaniem naprężeń plastyczno-sprężystych w strefie skrawania oraz oddziaływaniami tribologicznymi. Jednak jednoznaczna interpretacja wymagałaby dodatkowych badań zmiany współczynnika tarcia w parze materiałowej węgiel spiekany-stop Ti-6Al-4V z zależności od cieczy bazowej i zawartości procentowej GMP.

W przypadku drugiej cieczy bazowej – tereftalanu bis(2-etyloheksylu) – trudno doszukać się zaburzeń w zakresie morfologii powierzchni zarówno w obszarze zbocza jak i wierzchołków. Dlatego pomimo wykazania statystycznie istotnego wpływu zawartości procentowej GMP na parametry chropowatości trudno jest określić jednoznaczny trend w tym zakresie. W zakresie dalszych badań należałoby rozszerzyć zakres mierzonych parametrów chropowatości o parametry lepiej charakteryzujące właściwości morfologiczne powierzchni według ich funkcjonalności tribologicznej np. S_{sk} i S_{ku} .

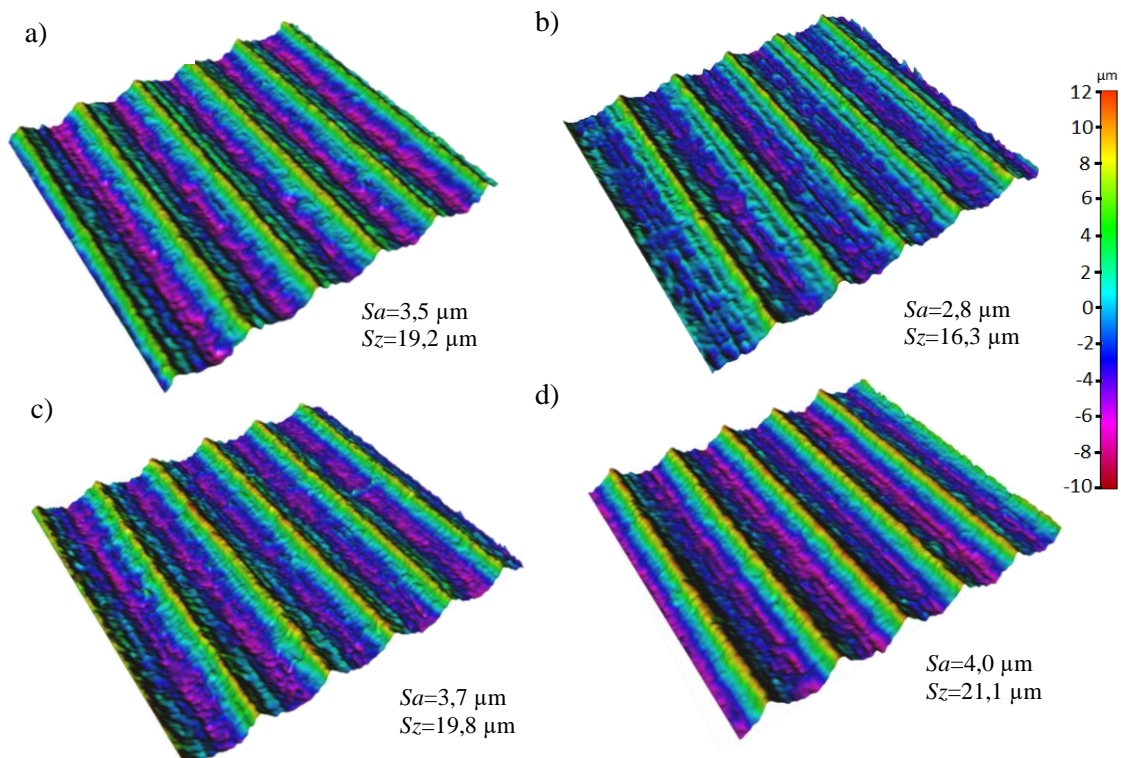
Zaobserwowano także, że w przypadku czystych cieczy bazowych oraz cieczy z dodatkiem 0,60% GMP mniejsze wartości parametrów chropowatości S_a i S_z stwierdzono po obróbce z cieczami na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) w porównaniu do obróbki z cieczami na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu). Z kolei w przypadku cieczy z dodatkiem 0,15% GMP oraz 0,30% GMP mniejsze wartości parametrów S_a i S_z zaobserwowano dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) po toczeniu z posuwem $f=0,2$ mm/obr i $f=0,3$ mm/obr. Dla toczenia z posuwem $f=0,1$ mm/obr nie zaobserwowano wyraźnego trendu w różnicach wartości parametrów S_a i S_z przy porównaniu wpływu cieczy bazowych (dla dodatku 0,15% GMP i 0,30% GMP).



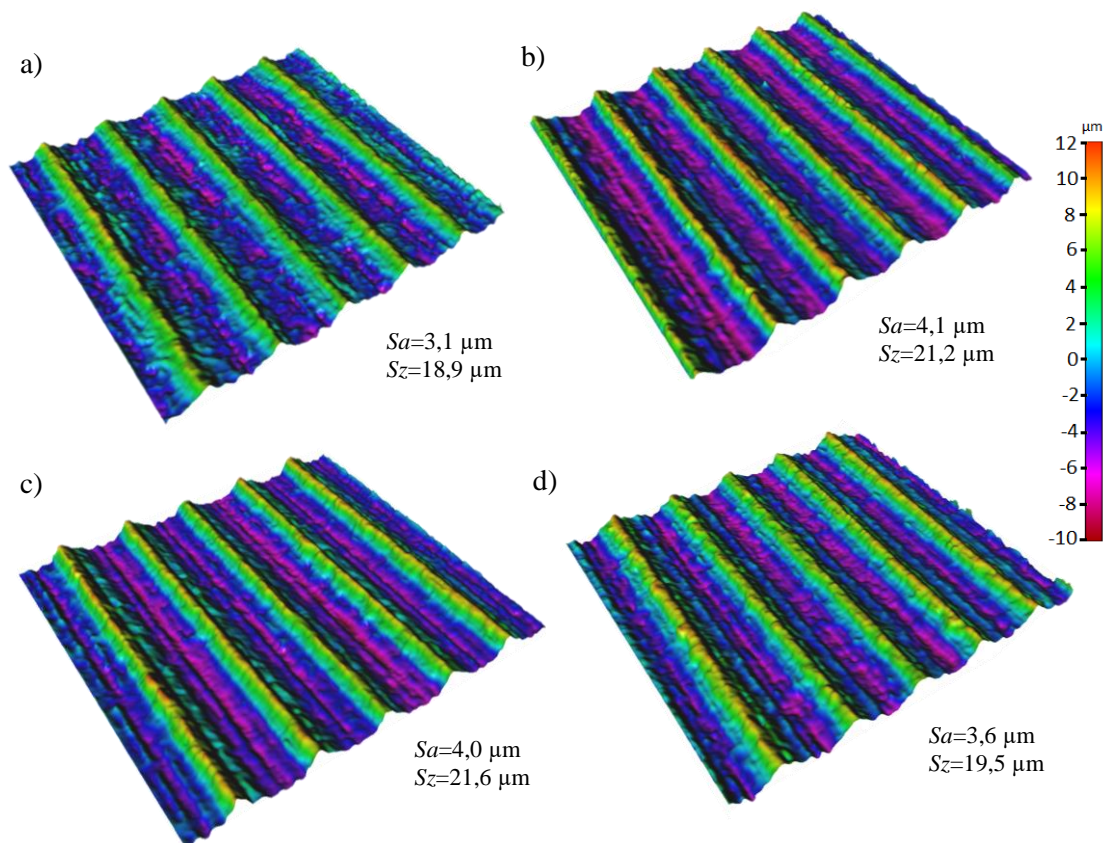
Rys. 5.42 Widok izometryczny powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) przy zawartości GMP a) 0,00%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% ($v_c=120$ m/min, $f=0,1$ mm/obr).



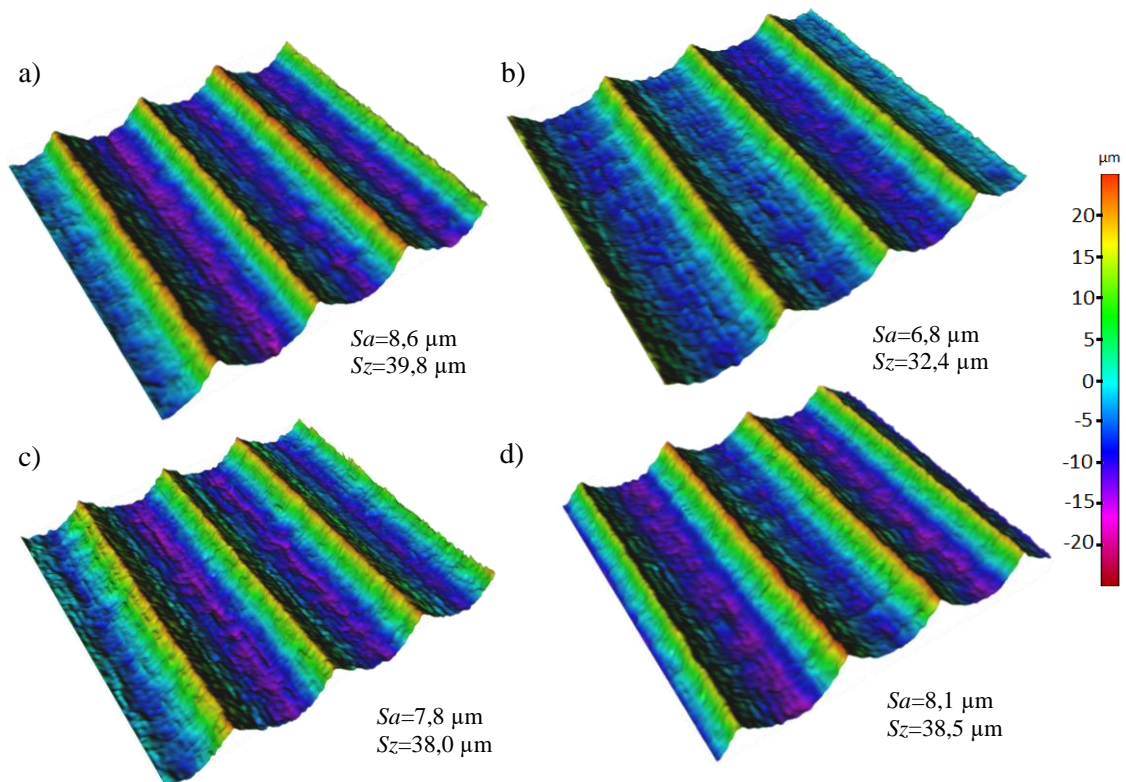
Rys. 5.43 Widok izometryczny powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) przy zawartości GMP a) 0,00%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% ($v_c=120 \text{ m/min}$, $f=0,1 \text{ mm/obr}$).



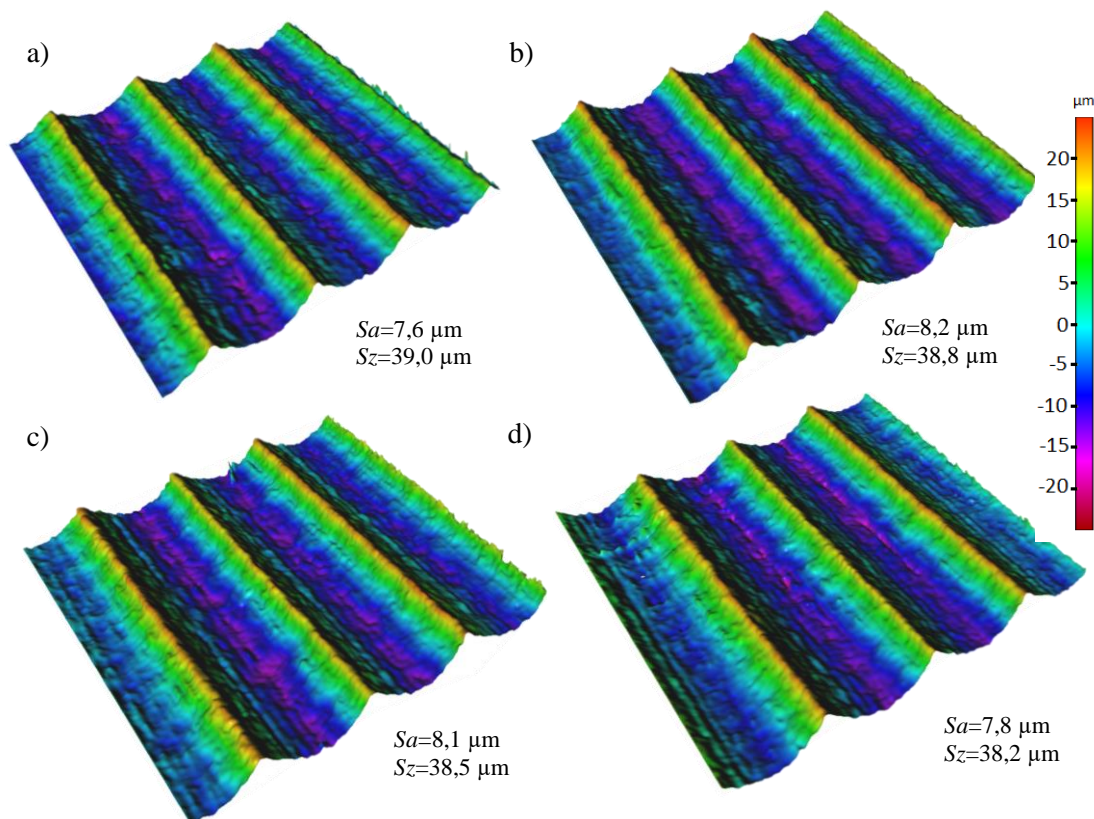
Rys. 5.44 Widok izometryczny powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) przy zawartości GMP a) 0,00%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% ($v_c=80 \text{ m/min}$, $f=0,2 \text{ mm/obr}$).



Rys. 5.46 Widok izometryczny powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) przy zawartości GMP a) 0,00%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% ($v_c=80$ m/min, $f=0,2$ mm/obr).



Rys. 5.45 Widok izometryczny powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) przy zawartości GMP a) 0,00%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% ($v_c=80$ m/min, $f=0,3$ mm/obr).



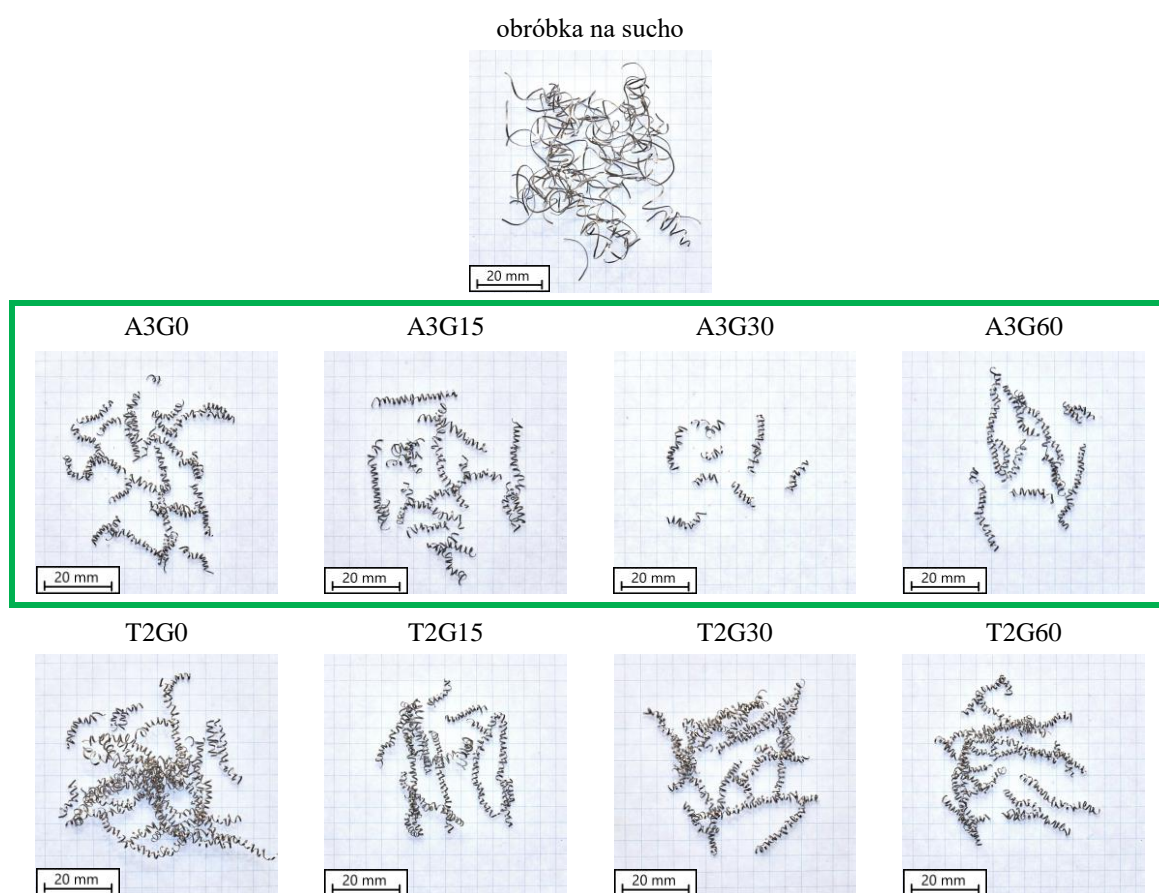
Rys. 5.47 Widok izometryczny powierzchni po toczeniu stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z wykorzystaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) przy zawartości GMP a) 0,00%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% ($v_c=80$ m/min, $f=0,3$ mm/obr).

5.2.4. Kształtowanie wiórów

Sposób kształtowania wióra ma istotny wpływ na wydajność, niezawodność i bezpieczeństwo obsługi podczas obróbki skrawaniem. Kształt utworzonego wióra ma ścisły związek ze stanem odkształceń i naprężeń w strefie tworzenia wióra, a ściślej rzecz ujmując – z mechanizmem dekohezji materiału w strefie tworzenia wióra. Obok rodzaju materiału obrabianego oraz parametrów skrawania istotnymi czynnikami wpływającymi na warunki tworzenia i kształt wióra są sposób chłodzenia i smarowania strefy skrawania. Dlatego jednym z kryteriów oceny efektywności obróbki w warunkach MQL jest ocena kształtu wiórów.

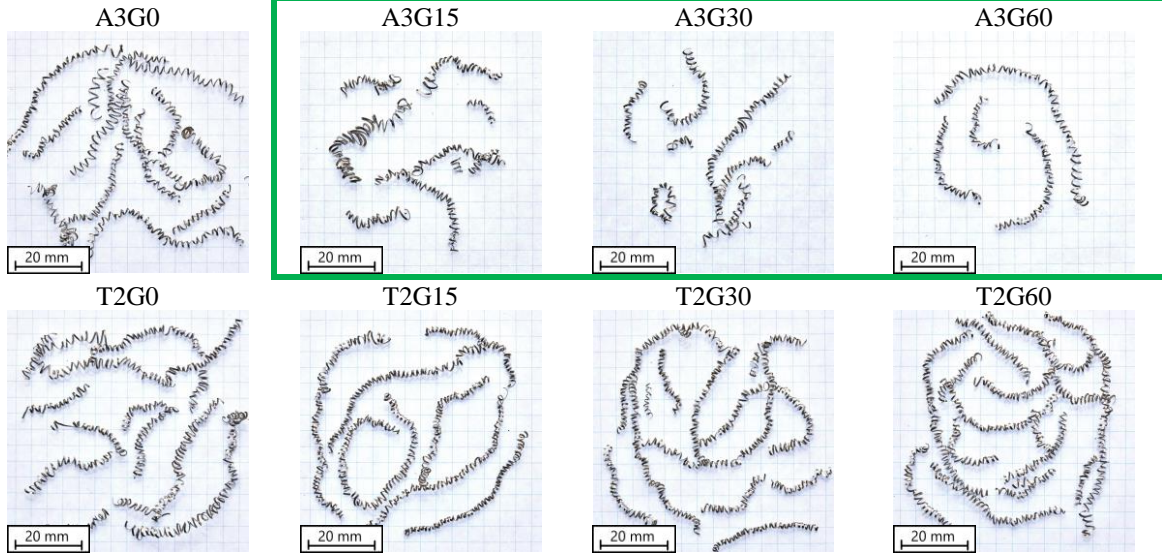
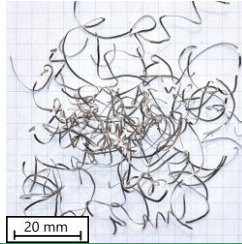
Przeanalizowano sposób kształtowania wiórów podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z cieczami smarującymi opartymi na dwóch cieczach bazowych z różną zawartością dodatku GMP. Kształty wiórów otrzymanych podczas toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V na sucho oraz w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem mikroproszku grafitowego GMP w stężeniach: 0%, 0,15%, 0,30%, i 0,60% zostały przedstawione na rys. 5.48–5.54. Zielonym kolorem oznaczone zostały kształty wiórów korzystne pod względem odprowadzania, transportu i bezpieczeństwa pracy. Najbardziej korzystny kształt wiórów pod względem bezpieczeństwa pracy, a także ich transportu – łukowy luźny (wg. klasyfikacji kształtu wiórów zawartych w normie PN-ISO

3685:1996) został uzyskany podczas obróbki w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy A3G15 (na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem 0,15% GMP) dla parametrów: $f=0,266$ mm/obr oraz $a_p=0,15$ mm. Przy zastosowaniu pozostałych cieczy przy powyższych parametrach skrawania oraz przy obróbce z posuwem $f=0,3$ mm/obr oraz głębokością skrawania $a_p=0,3$ mm uzyskano wióra śrubowe otwarte krótkie. Analogiczny kształt uzyskano podczas obróbki z $f=0,233$ mm/obr oraz $a_p=0,2$ mm, a także $f=0,166$ mm/obr i $a_p=0,1$ mm, przy zastosowaniu cieczy A3G60. Dla pozostałych parametrów skrawania w warunkach MQL, niezależnie od zastosowanych cieczy uzyskiwano wióra śrubowe otwarte długie. Wyjątek stanowiła obróbka z $f=0,2$ mm/obr oraz $a_p=0,25$ mm i cieczami na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), gdzie podobnie, jak w przypadku obróbki na sucho uzyskano wióra śrubowe splątane.



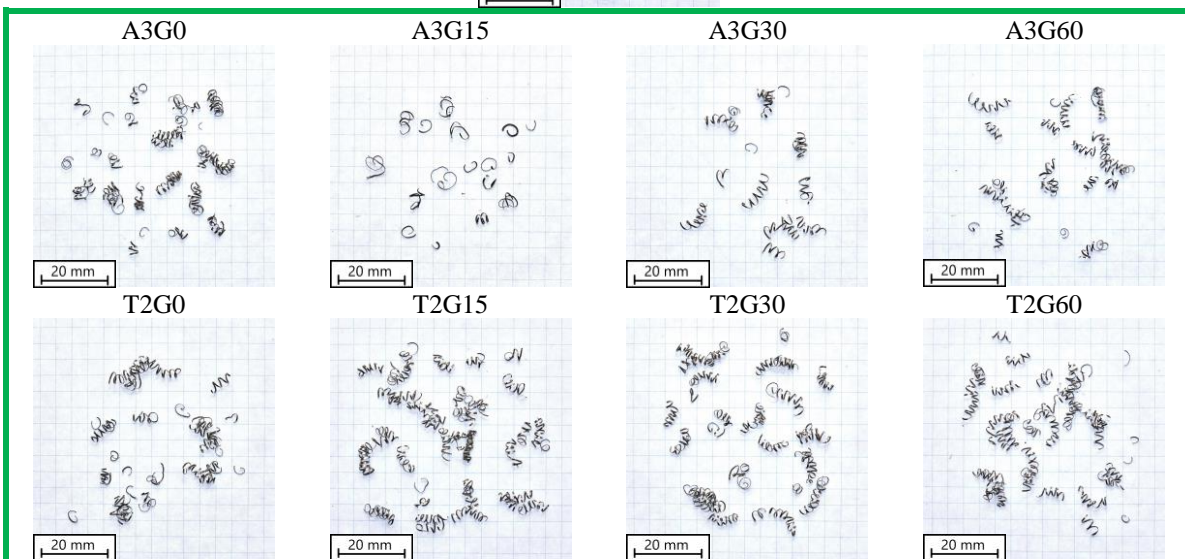
Rys. 5.48 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 1 planu ($f=0,2$ mm/obr, $a_p=0,25$ mm).

obróbka na sucho



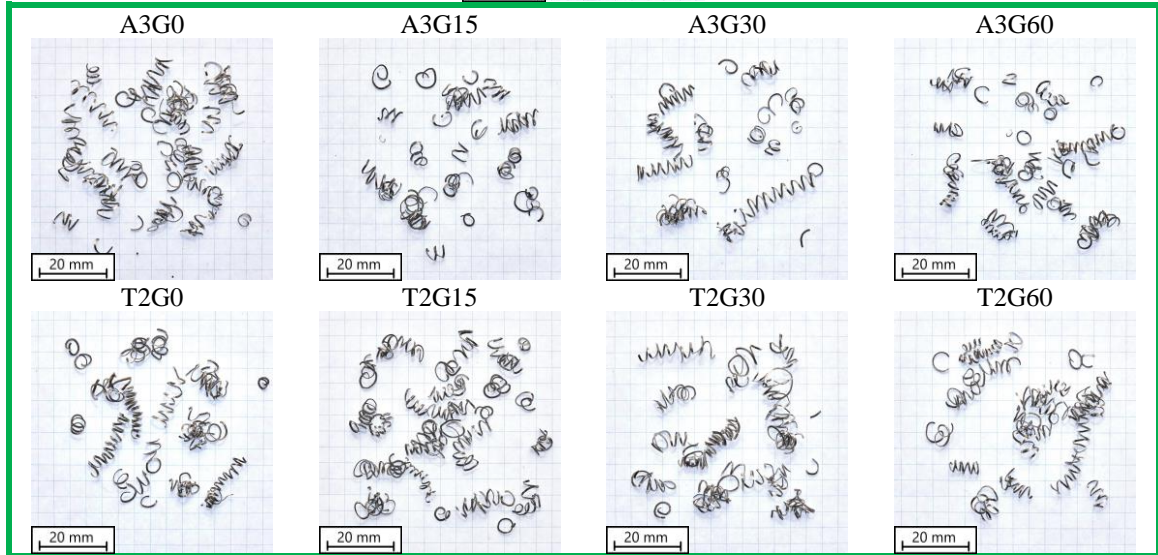
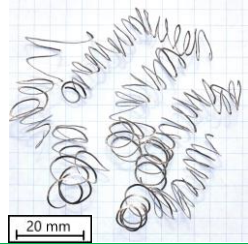
Rys. 5.49 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 2 planu ($f=0,133$ mm/obr, $a_p=0,35$ mm).

obróbka na sucho



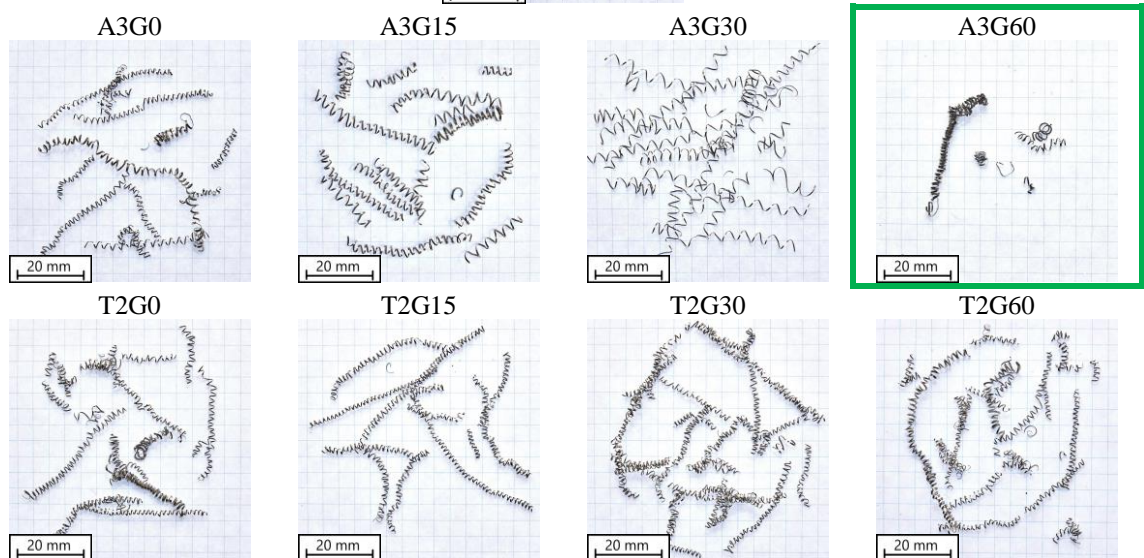
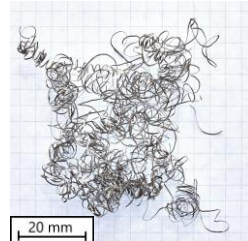
Rys. 5.50 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 3 planu ($f=0,266$ mm/obr, $a_p=0,15$ mm).

obróbka na sucho



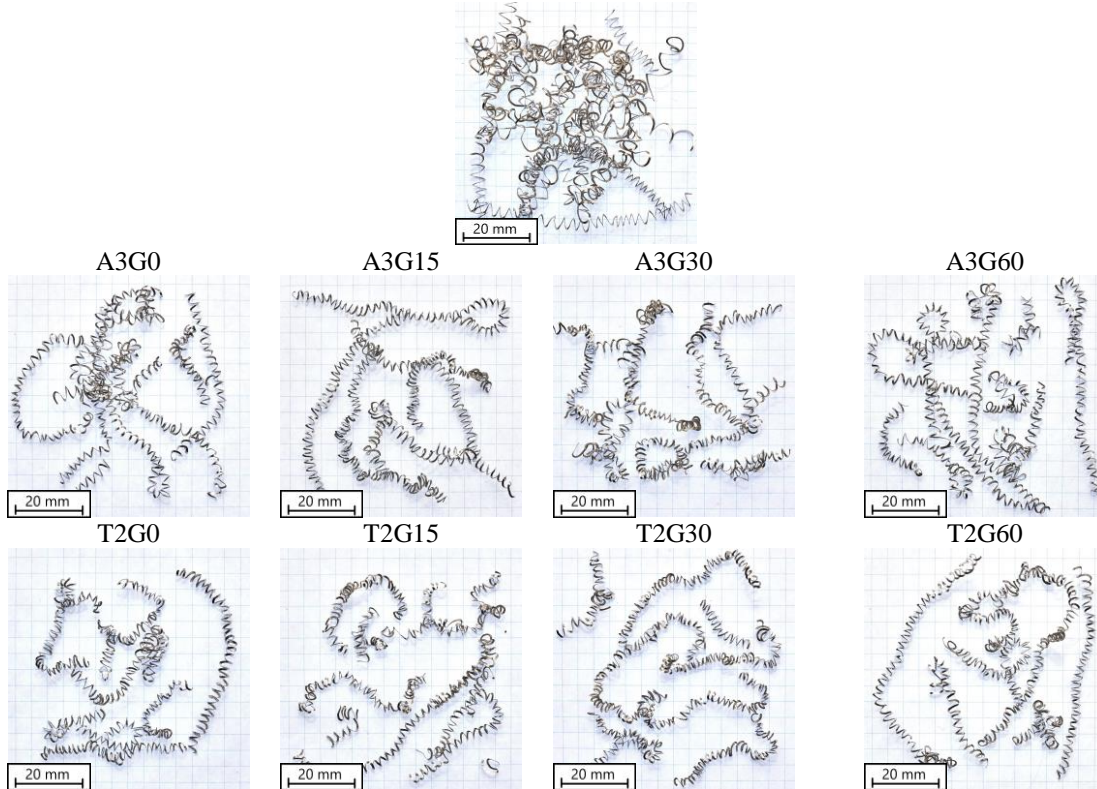
Rys. 5.51 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 4 planu ($f=0,3$ mm/obr, $a_p=0,3$ mm).

obróbka na sucho



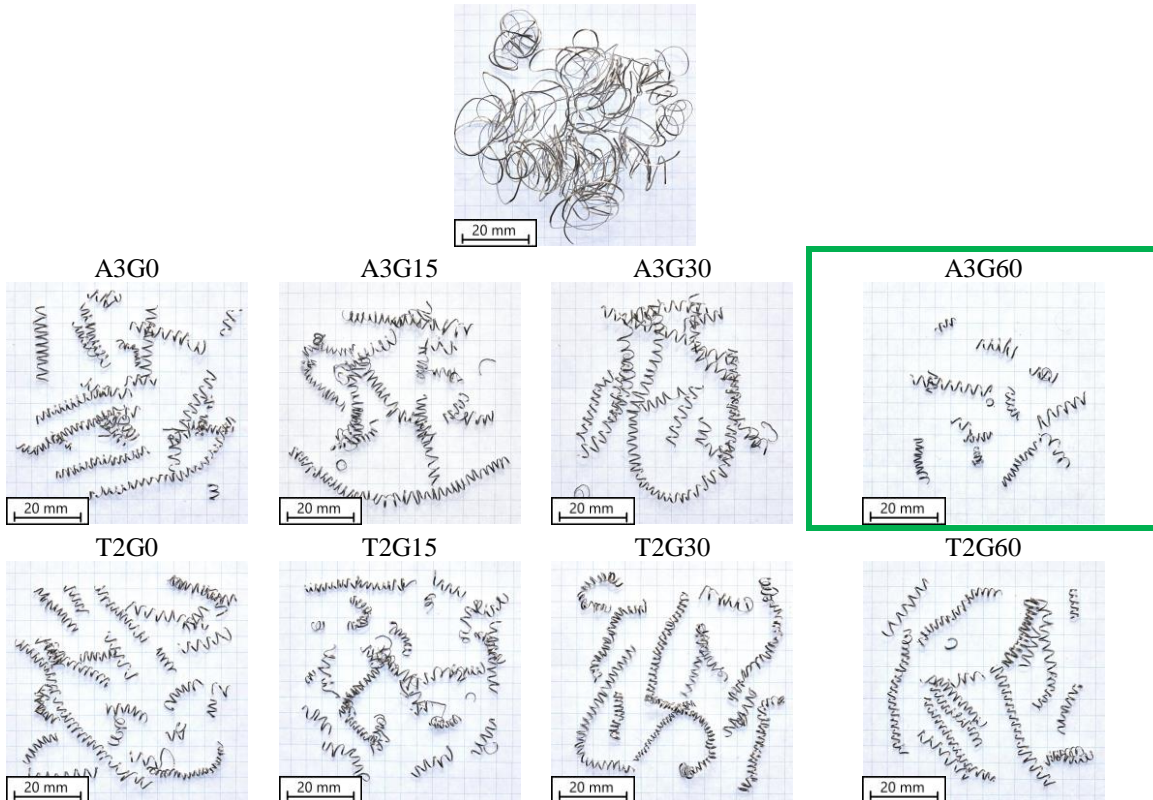
Rys. 5.52 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 5 planu ($f=0,166$ mm/obr, $a_p=0,1$ mm).

obróbka na sucho



Rys. 5.54 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 7 planu ($f=0,1$ mm/obr, $a_p=0,4$ mm).

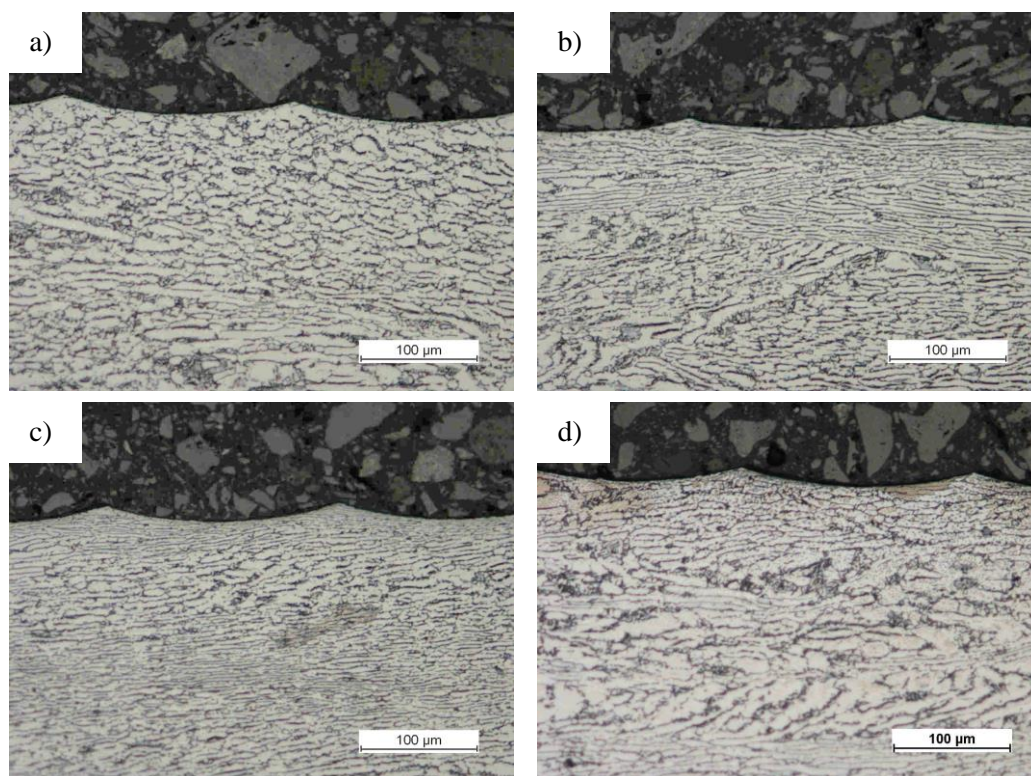
obróbka na sucho



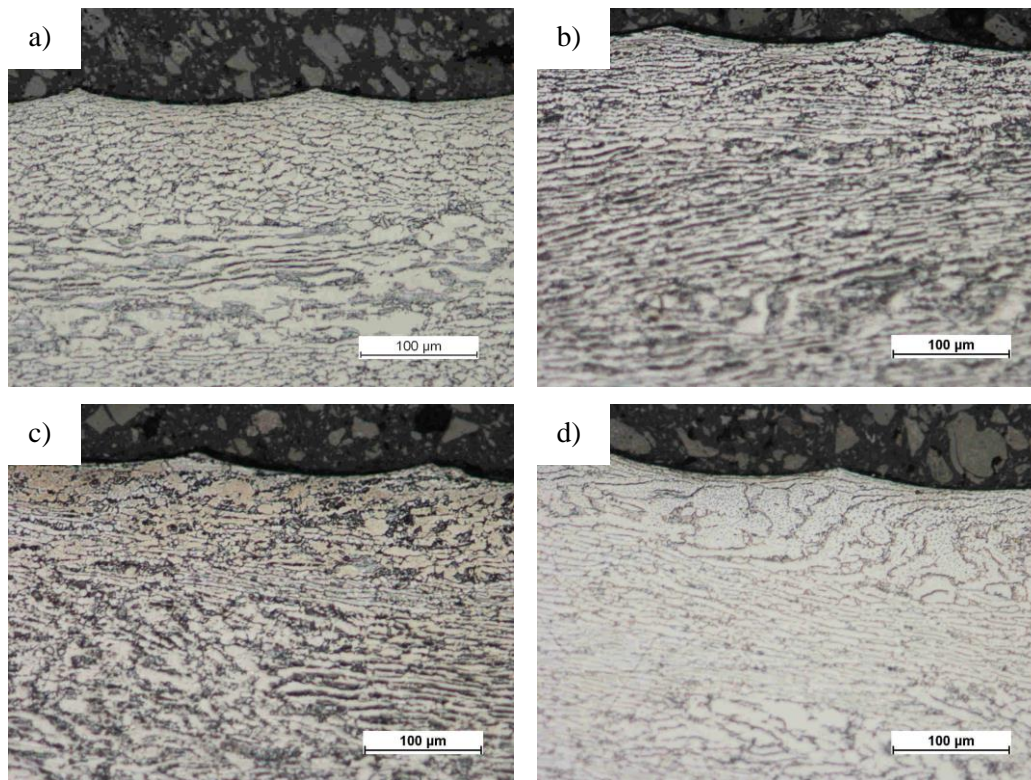
Rys. 5.53 Porównanie kształtu wiórów po toczeniu stopu Ti-6Al-4V dla pkt. 6 planu ($f=0,233$ mm/obr, $a_p=0,2$ mm).

5.2.5. Mikrostruktura technologicznej warstwy wierzchniej

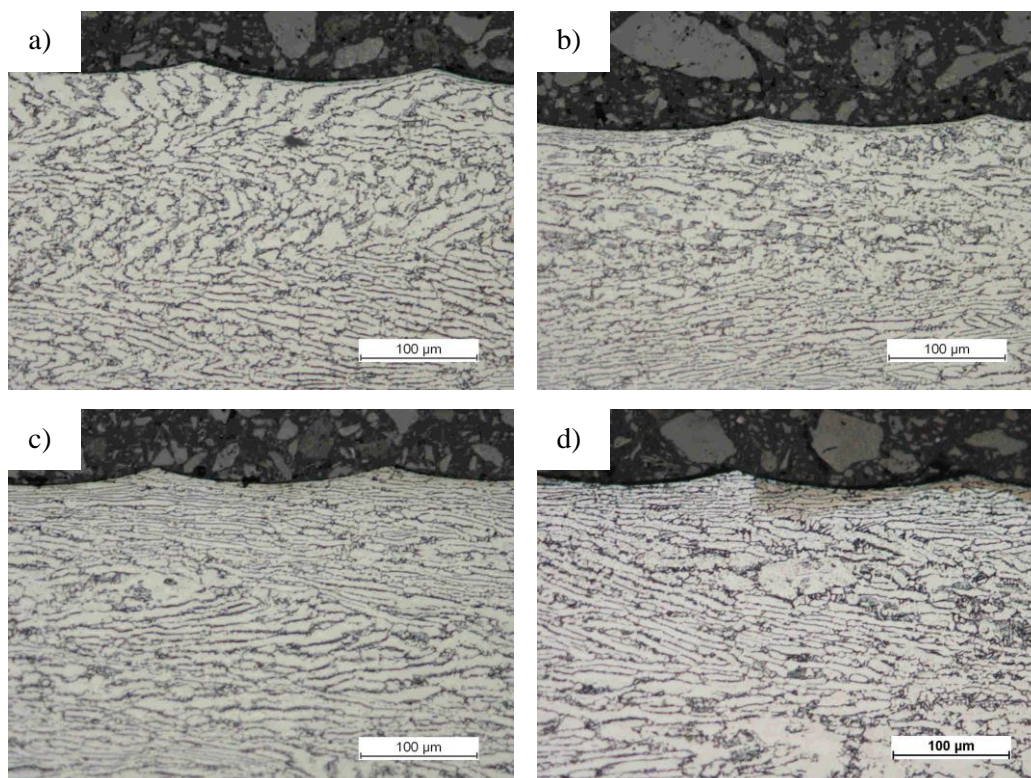
Zastosowanie stopu Ti-6Al-4V w przemyśle lotniczym wymaga zapewnienia wysokiego poziomu niezawodności. Jednym z kluczowych elementów oceny jakości obrabionych powierzchni jest ocena mikrostruktury technologicznej warstwy wierzchniej. Ciepło generowane podczas obróbki skrawaniem może prowadzić do zmian morfologii składników fazowych oraz odkształceń plastycznych. W związku z powyższym przeprowadzono kontrolę stanu technologicznej warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z użyciem mikroskopu metalograficznego. Zgłady wykonano w przekroju wzdłużnym wałka. Badano wpływ oddziaływań mechanicznych w procesie skrawania na odkształcenia plastyczne warstwy wierzchniej oraz zmianę kształtu ziaren. Rys. 5.55–5.60 przedstawiają mikrostrukturę warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego z posuwem $f=0,2$ mm/obr i trzema prędkościami skrawania v_c : 40, 80 i 120 m/min. Nie zaobserwowano jednoznacznego wpływu na odkształcenia plastyczne w warstwie wierzchniej z widoczną granicą deformacji dla badanego zakresu parametrów nastawnych procesu.



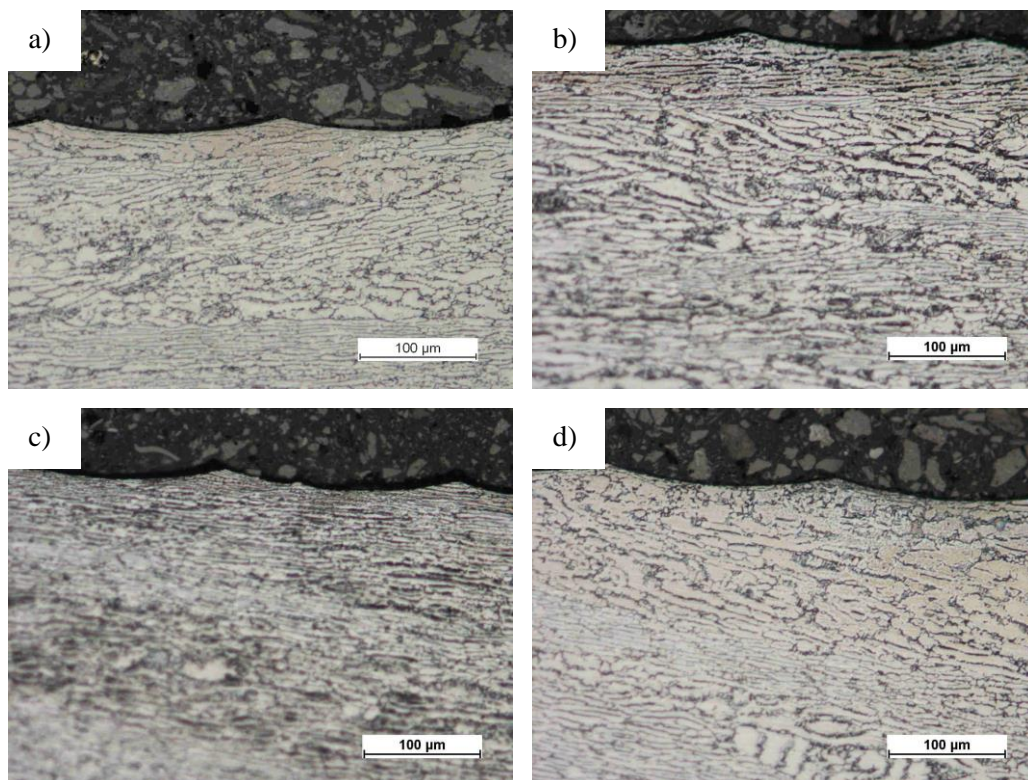
Rys. 5.55 Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem GMP w stężeniu a) 0%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% z prędkością skrawania $v_c=40$ m/min i posuwem $f=0,2$ mm/obr.



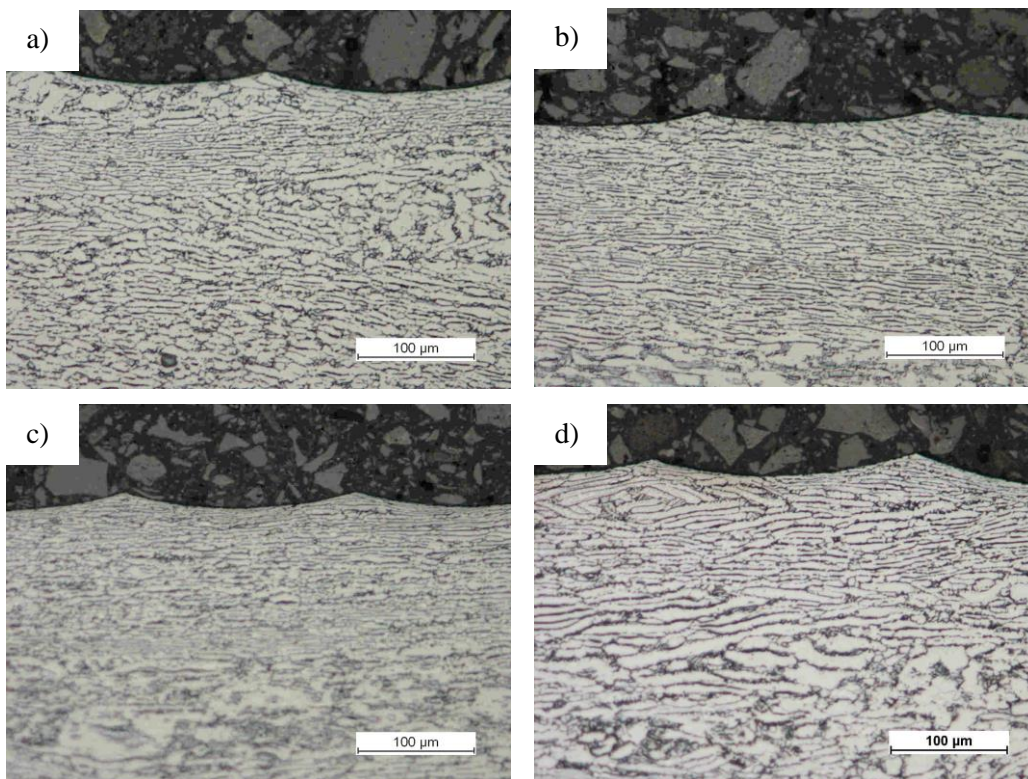
Rys. 5.56 Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem GMP w stężeniu a) 0%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% z prędkością skrawania $v_c=40$ m/min i posuwem $f=0,2$ mm/obr.



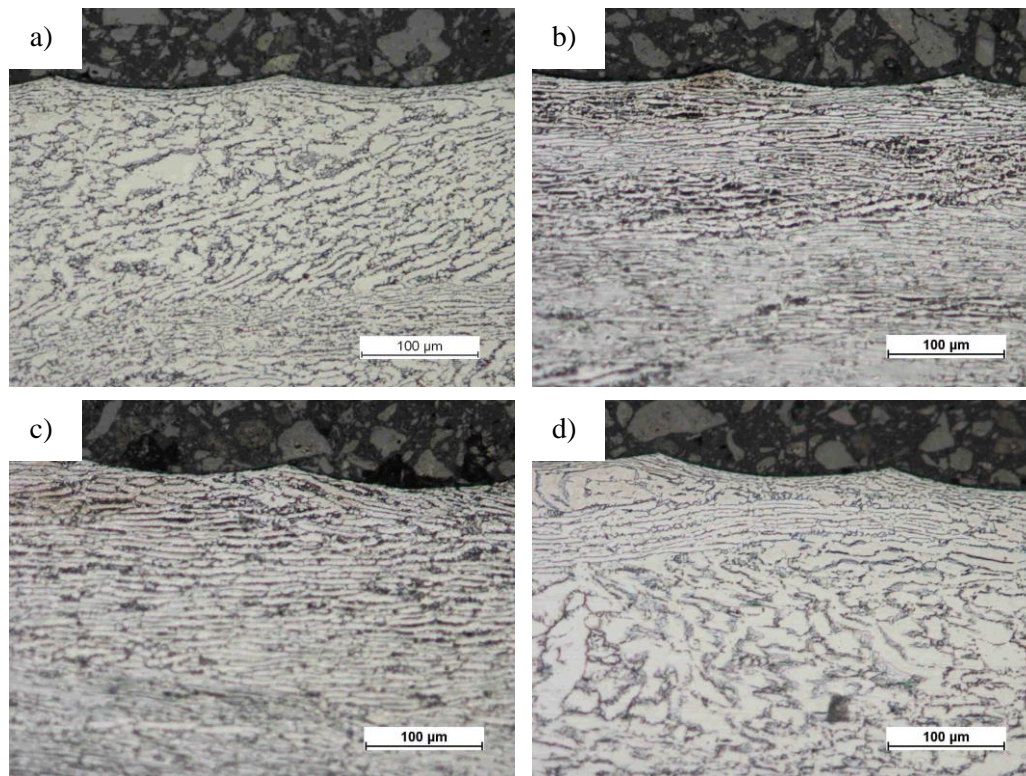
Rys. 5.57 Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem GMP w stężeniu a) 0%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% z prędkością skrawania $v_c=80$ m/min i posuwem $f=0,2$ mm/obr.



Rys. 5.58 Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem GMP w stężeniu a) 0%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% z prędkością skrawania $v_c=80$ m/min i posuwem $f=0,2$ mm/obr.



Rys. 5.59 Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem GMP w stężeniu a) 0%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% z prędkością skrawania $v_c=120$ m/min i posuwem $f=0,2$ mm/obr.



Rys. 5.60 Mikrostruktura warstwy wierzchniej stopu Ti-6Al-4V po toczeniu wykończeniowym w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem GMP w stężeniu a) 0%, b) 0,15%, c) 0,30%, d) 0,60% z prędkością skrawania $v_c=120$ m/min i posuwem $f=0,2$ mm/obr.

6. POSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących analizy toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V. Obróbka prowadzona była w warunkach minimalnego smarowania (MQL), natomiast ciecze smarujące, rozpylane w postaci mgły olejowej, sporządzone zostały w oparciu o dwie ciecze bazowe: adypinian bis(2-etyloheksylu) i tereftalan bis(2-etyloheksylu), które następnie wzbogacane były o dodatek mikrometrycznego proszku grafitowego w stężeniach 0,15%, 0,30% i 0,60%.

Na podstawie analizy wyników badań doświadczalnych określono wpływ stężenia GMP w cieczy bazowej na skrawalność stopu Ti-6Al-4V oraz opracowano modele składowych siły skrawania oraz parametrów chropowatości powierzchni obrabianej S_a i S_z w zależności od parametrów nastawnych procesu. Elementy nowości pojawiające się w pracy są następujące:

- opracowanie i zbudowanie urządzenia służącego do tworzenia mgły olejowej, które pozwala na utrzymywanie stałego wydatku cieczy - urządzenie przystosowane jest do pracy z cieczami o lepkości kinematycznej do 41 mm²/s (w temp. 40 °C) oraz zawierającymi mikrometryczny proszek z grafitu płatkowego,
- badania toczenia stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem dwóch cieczy bazowych: adypinian bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalan bis(2-etyloheksylu),
- analiza wpływu stężenia masowego mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego, wyprodukowanego i dostarczonego przez Instytut Technik Węglowych w Toruniu (oznaczenie: C4N-98), w cieczach bazowych na skrawalność stopu tytanu Ti-6Al-4V,
- opracowanie modeli opisujących zależność pomiędzy prędkością skrawania, posuwem i stężeniem masowym mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczach bazowych a składowymi siły skrawania i parametrami chropowatości powierzchni S_a i S_z , uwzględniając analizę istotności wpływu czynników wejściowych.

Prowadzone badania doświadczalne oraz liczne analizy otrzymanych wyników pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Badania trwałości ostrza narzędzia skrawającego realizowano do momentu osiągnięcia krytycznej wartości siły odporowej $F_p=125$ N. Badania te wykazały, że największą trwałość ostrza, podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V w warunkach MQL, uzyskano z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem 0,30% mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego (A3G30) – zwiększenie trwałości ostrza o około 13% w stosunku do obróbki z czystą cieczą bazową oraz 115% w stosunku do obróbki na sucho. Dla cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,30% GMP nie wykazywał istotnego

statystycznie wpływu na trwałość ostrza w stosunku do trwałości zmierzonej podczas obróbki z czystą cieczą bazową, natomiast w stosunku do obróbki na sucho dodatek 0,30% prowadził do zwiększenia trwałości ostrza o około 99%. Wzrost ten wynikał z faktu, iż doprowadzony do strefy skrawania mikrometryczny proszek z grafitu płatkowego wykazywał dodatkowe właściwości smarujące, zmniejszając współczynnik tarcia pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym i wiórem, tym samym zmniejszając wartości składowych siły skrawania i wydłużając trwałość ostrza narzędzia skrawającego. Dodatek 0,60% GMP w przypadku obu cieczy bazowych prowadził do skrócenia trwałości ostrza narzędzia. Spowodowane było to najprawdopodobniej zmianą warunków tworzenia mgły olejowej przy stałym ciśnieniu powietrza w układzie zasilania MQL oraz zbyt małym przekrojem przewodu doprowadzającego ciecz i nierównomiernym jej rozprowadzaniem.

2. Na podstawie wyników uzyskanych podczas badań doświadczalnych opracowano modele zależności pomiędzy parametrami nastawnymi procesu a składowymi siły skrawania. Porównanie oddziaływania istotnych statystycznie wejściowych czynników modelu na składowe siły skrawania wykazało, że niezależnie od rodzaju cieczy bazowej stężenie masowe GMP w cieczy wykazuje istotne oddziaływanie na wszystkie składowe siły skrawania. Analiza wyników badań wykonana w programie Design-Expert wykazała, że najmniejsze wartości wszystkich trzech składowych siły skrawania otrzymano dla: $v_c=40$ m/min, $f=0,1$ mm/obr i $u=0,60\%$ dla obu cieczy bazowych. Dla cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,60% GMP prowadził do zmniejszenia głównej siły skrawania F_c i siły posuwowej F_f , odpowiednio o około 5,9–7,2% i 11–14%, oraz zwiększenia siły odporowej F_p o około 3–6,5% w stosunku do czystej cieczy bazowej, przy czym największe różnice występowały dla wartości posuwu bliskich górnej granicy badanego zakresu ($f=0,3$ mm/obr). W przypadku cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,60% GMP prowadził do zmniejszenia głównej siły skrawania F_c , siły odporowej F_p i siły posuwowej F_f , odpowiednio o około 6–7%, 4–7% oraz 8,5–11% w stosunku do czystej cieczy bazowej, przy czym najsilniejsze oddziaływanie dodatku GMP zaobserwowano dla wartości posuwu bliskich dolnej granicy badanego zakresu ($f=0,1$ mm/obr).
3. Na podstawie analizy opracowanych modeli zależności pomiędzy parametrami nastawnymi procesu a parametrami chropowatości powierzchni Sa i Sz wykazano, że w przypadku cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) dodatek 0,15% prowadził do uzyskania najmniejszych wartości parametrów Sa i Sz . Wartości Sa były mniejsze o 12–58%, natomiast wartości Sz były mniejsze o 7–22%, w stosunku do wartości uzyskanych dla czystych cieczy bazowych, przy czym różnice te były mniejsze dla większych wartości posuwu, co jest naturalne ze względu na zwiększanie udziału

geometryczno-kinematycznego odwzorowania ostrza w kształtowaniu chropowatości. W przypadku cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu) dodatek GMP prowadził do wzrostu wartości parametrów Sa i Sz w prawie całym zakresie parametrów skrawania.

4. Analiza wpływu stężenia mikrometrycznego proszku grafitowego na kształtowanie wiórów wykazała, że najbardziej korzystny kształt wiórów pod względem bezpieczeństwa pracy – łukowy luźny – został uzyskany podczas obróbki w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy A3G15 (na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) z dodatkiem 0,15% GMP) dla parametrów: $f=0,266$ mm/obr oraz $a_p=0,15$ mm. Przy zastosowaniu cieczy A3G0, A3G30, A3G60, T2G0, T2G15, T2G30 i T2G60 przy powyższych parametrach skrawania oraz przy obróbce z posuwem $f=0,3$ mm/obr oraz głębokością skrawania $a_p=0,3$ mm uzyskano wióra śrubowe otwarte krótkie. Analogiczny kształt uzyskano podczas obróbki z $f=0,233$ mm/obr oraz $a_p=0,2$ mm przy zastosowaniu cieczy A3G60. Dla pozostałych parametrów skrawania w warunkach MQL, niezależnie od zastosowanych cieczy uzyskiwano wióra śrubowe otwarte długie. Wyjątek stanowiła obróbka z $f=0,2$ mm/obr oraz $a_p=0,25$ mm i cieczy na bazie tereftalanu bis(2-etyloheksylu), gdzie podobnie, jak w przypadku obróbki na sucho uzyskano wióra śrubowe splątane. Potwierdza to, że dodatek GMP do cieczy bazowej zmienia warunki tribologiczne procesu skrawania.
5. Analiza mikrostruktury technologicznej warstwy wierzchniej wykazała, że toczenie wykończeniowe stopu Ti-6Al-4V w warunkach MQL z zastosowaniem cieczy na bazie adypinianu bis(2-etyloheksylu) oraz tereftalanu bis(2-etyloheksylu) zarówno z dodatkiem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego, jak i w przypadku czystych cieczy bazowych, nie prowadzi do istotnych zmian morfologii składników fazowych warstwy wierzchniej w przyjętym zakresie parametrów nastawnych procesu.

Podsumowując, zastosowanie cieczy z dodatkiem mikrometrycznego proszku grafitowego GMP w warunkach minimalnego smarowania podczas toczenia wykończeniowego stopu tytanu Ti-6Al-4V prowadzi do wydłużenia trwałości narzędzia. W pewnych zakresach parametrów skrawania zastosowanie dodatku GMP do cieczy bazowej prowadzić może do zmniejszenia wartości poszczególnych składowych siły skrawania oraz parametrów chropowatości powierzchni Sa i Sz . Zastosowanie cieczy z dodatkiem GMP w warunkach MQL wywiera także pozytywny wpływ na kształtowanie wiórów.

Przedstawione badania i ich wyniki mogą stanowić podstawę do kolejnych badań, mających na celu pogłębienie stanu wiedzy w zakresie analizowanego zagadnienia, takich jak:

- rozszerzenie zakresu mierzonych parametrów chropowatości o parametry lepiej charakteryzujące właściwości morfologiczne powierzchni według ich funkcjonalności tribologicznej np. *Ssk* i *Sku*,
- rozszerzenie zakresu badań na inne stopy tytanu, wraz z analizą skrawalności, jak i opracowaniem modeli zależności pomiędzy parametrami nastawnymi a składowymi siły skrawania i parametrami chropowatości powierzchni,
- rozbudowa urządzenia do tworzenia mgły olejowej o elementy mające na celu opóźnienie sedymentacji mikrometrycznego proszku grafitowego – szczególne znaczenie ma to w przypadku zastosowania takich cieczy w warunkach przemysłowych,
- przeprowadzenie badań dla różnych rodzajów narzędzi, ze szczególnym uwzględnieniem także narzędzi z powłokami,
- poszukiwanie cieczy bazowych oraz mikro- i nanododatków oraz takich ich połączeń, które pozwolą na dalsze zwiększanie trwałości ostrzy narzędzi skrawających.

LITERATURA

1. Peters, M.; Hemptenmacher, J.; Kumpfert, J.; Leyens, C. Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys. In *Titanium and Titanium Alloys*; Peters, M., Leyens, C., Eds.; WILEY-VCH Verlag GmbH: Weinheim, 2003; pp. 1–36 ISBN 3527305343.
2. Kang, L.M.; Yang, C. A Review on High-Strength Titanium Alloys: Microstructure, Strengthening, and Properties. *Adv. Eng. Mater.* 2019, *1801359*, 1–27, doi:10.1002/adem.201801359.
3. Boyer, R.R. Attributes, Characteristics, and Applications of Titanium and Its Alloys. *Jom* 2010, *62*, 21–24.
4. Oczóś, K.; Kawalec, A. *Kształtowanie Metali Lekkich*; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 2012;
5. Sieniawski, J.; Bylica, A. *Tytan i Jego Stopy*; Państwowe Wydawnictwo Naukowe: Warszawa, 1985;
6. Garmata, V.A.; Gulyanitskii, B.S.; Kramnik, V.Y.; Lipkes, Y.M.; Seryakov, G. V *The Metallurgy of Titanium*; 1971;
7. Sibus, H. Titanium and Titanium Alloys – From Raw Material to Semi-Finished Products. In *Titanium and Titanium Alloys*; Leyens, C., Peters, M., Eds.; WILEY-VCH Verlag GmbH: Weinheim, 2003; pp. 231–244.
8. Habrat, W. *Analiza i Modelowanie Toczzenia Wykończeniowego Tytanu i Jego Stopów*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej: Rzeszów, 2019;
9. Kim, Y.-W. Intermetallic Alloys Based on Gamma Titanium Aluminide. *JOM* 1989, *41*, 24–30.
10. Yamaguchi, M.; Inui, H.; Ito, K. High-Temperature Structural Intermetallics. *Acta Mater.* 2000, *48*, 307–322, doi:10.1016/S1359-6454(99)00301-8.
11. Kothari, K.; Radhakrishnan, R.; Wereley, N.M. Advances in Gamma Titanium Aluminides and Their Manufacturing Techniques. *Prog. Aerosp. Sci.* 2012, *55*, 1–16, doi:10.1016/j.paerosci.2012.04.001.
12. Peters, M.; Kumpfert, J.; Ward, C.H.; Leyens, C. Titanium Alloys for Aerospace Applications. *Adv. Eng. Mater.* 2003, *5*, 419–427, doi:10.1002/adem.200310095.
13. Veiga, C.; Loureiro, A.J.R.; Davim, J.P. Properties and Applications of Titanium Alloys. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2012, *32*, s. 133-148.
14. Inagaki, I.; Shirai, Y.; Takechi, T.; Ariyasu, N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. *Nippon Steel Sumitomo Met. Tech. Rep.* 2014.
15. <https://Amg-Nv.Com/Innovation/Titanium-Aluminides/> Available online: <https://amg-nv.com/innovation/titanium-aluminides/> (accessed on 6 April 2022).
16. Boyer, R.R. Titanium for Aerospace: Rationale and Applications. *Adv. Perform. Mater.* 1995, *2*, 349–368, doi:10.1007/BF00705316.
17. Elias, C.N.; Lima, J.H.C.; Valiev, R.; Meyers, M.A. Biomedical Applications of Titanium and Its Alloys

Biological Materials Science 46-49. *Biol. Mater. Sci.* 2008, 1–4.

18. Niinomi, M. Mechanical Biocompatibilities of Titanium Alloys for Biomedical Applications. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2008, 1, 30–42, doi:10.1016/j.jmbbm.2007.07.001.
19. Faller, K.; Froes, F.H. The Use of Titanium in Family Automobiles: Current Trends. *Jom* 2001, 53, 27–28, doi:10.1007/s11837-001-0143-3.
20. Sachdev, A.K.; Kulkarni, K.; Fang, Z.Z.; Yang, R.; Girshov, V. Titanium for Automotive Applications: Challenges and Opportunities in Materials and Processing. *Jom* 2012, 64, 553–565, doi:10.1007/s11837-012-0310-8.
21. Froes, F.H.; Friedrich, H.; Kiese, J.; Bergoint, D. Titanium in the Family Automobile: The Cost Challenge. *JOM* 2004, 56, 40–44, doi:10.1007/s11837-004-0144-0.
22. Jackson, M.J.; Kopac, J.; Balazic, M.; Bombac, D.; Brojan, M.; Kosel, F. Titanium and Titanium Alloy Applications in Medicine. In *Surgical Tools and Medical Devices*; Ahmed, W., Jackson, M., Eds.; Springer, Cham, 2016; pp. 475–517.
23. Gorynin, I. V. Titanium Alloys for Marine Application. *Mater. Sci. Eng. A* 1999, 263, 112–116, doi:10.1016/s0921-5093(98)01180-0.
24. Oryshchenko, A.S.; Gorynin, I. V.; Leonov, V.P.; Kudryavtsev, A.S.; Mikhailov, V.I.; Chudakov, E. V. Marine Titanium Alloys: Present and Future. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2015, 6, 571–579, doi:10.1134/S2075113315060106.
25. Peters, M.; Leyens, C. Non-Aerospace Applications of Titanium and Titanium Alloys. In *Titanium and Titanium Alloys*; WILEY-VCH Verlag GmbH: Weinheim, 2013; pp. 393–422.
26. Zambas, C.; Ioannidou, M.; Papanikolaou, A. The Use of Titanium Reinforcement for the Restoration of Marble Architectural Members of the Acropolis Monuments. *Stud. Conserv.* 1986, 31, 138–141.
27. Rahman, M.; Wong, Y.S.; Zareena, A.R. Machinability of Titanium Alloys. *JSME Int. Journal, Ser. C Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf.* 2003, 46, 107–115.
28. Ezugwu, E.O.; Bonney, J.; Yamane, Y. An Overview of the Machinability of Aeroengine Alloys. *J. Mater. Process. Technol.* 2003, 134, 233–253, doi:10.1016/S0924-0136(02)01042-7.
29. Trent, E.M.; Wright, P.K. Machinability. In *Metal Cutting*; Butterworth–Heinemann, 2000; pp. 251–310.
30. Filipowski, R.; Marciniak, M. *Techniki Obróbki Mechanicznej i Erozyjnej*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, 2000;
31. Pervaiz, S.; Anwar, S.; Qureshi, I.; Ahmed, N. Recent Advances in the Machining of Titanium Alloys Using Minimum Quantity Lubrication (MQL) Based Techniques. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.* 2019, 6, 133–145, doi:10.1007/s40684-019-00033-4.
32. Veiga, C.; Davim, J.P.; Loureiro, A.J.R. Review on Machinability of Titanium Alloys: The Process Perspective. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2013, 34, 148–164.
33. **Lisowicz, J.**; Habrat, W.; Krupa, K.; Fiedeń, M. Tool Wear of Carbide Cutting Inserts Coated with TiAlN

- and AlTiSiN in Finish Turning of Inconel 718. In Proceedings of the Advances in Manufacturing Engineering and Materials II; Hloch, S., Klichová, D., Pude, F., Krolczyk, G.M., Chattopadhyaya, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2021; pp. 226–235.
34. Kossakowska, J.; Jemielniak, K. Application of Self-Propelled Rotary Tools for Turning of Difficult-Tomachine Materials. *Procedia CIRP* 2012, *1*, 425–430, doi:10.1016/j.procir.2012.04.076.
 35. Ezugwu, E.O. Improvements in the Machining of Aero-Engine Alloys Using Self-Propelled Rotary Tooling Technique. *J. Mater. Process. Technol.* 2007, *185*, 60–71.
 36. Ezugwu, E.O. Key Improvements in the Machining of Difficult-to-Cut Aerospace Superalloys. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2005, *45*, 1353–1367, doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.02.003.
 37. Mathew, N.T. Drilling of Titanium Aluminide at Different Aspect Ratio under Dry and Wet Conditions. *J. Manuf. Process.* 2016, *24*, 256–269, doi:10.1016/j.jmapro.2016.09.009.
 38. Çelik, Y.H.; Kilickap, E.; Güney, M. Investigation of Cutting Parameters Affecting on Tool Wear and Surface Roughness in Dry Turning of Ti-6Al-4V Using CVD and PVD Coated Tools. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2017, *39*, 2085–2093, doi:10.1007/s40430-016-0607-6.
 39. Ginting, A.; Nouari, M. Surface Integrity of Dry Machined Titanium Alloys. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2009, *49*, 325–332, doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.10.011.
 40. Ibrahim, G.A.; Che Haron, C.H.; Ghani, J.A. The Effect of Dry Machining on Surface Integrity of Titanium Alloy Ti-6Al-4V ELI. *J. Appl. Sci.* 2009, *9*, 121–127, doi:10.3923/jas.2009.121.127.
 41. Gariani, S.; Shyha, I.; Inam, F.; Huo, D. Experimental Analysis of System Parameters for Minimum Cutting Fluid Consumption When Machining Ti-6Al-4V Using a Novel Supply System. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, *95*, 2795–2809, doi:10.1007/s00170-017-1216-y.
 42. Prakash, D.; Ramana, M.V. Performance Evaluation of Different Tools in Turning of Ti-6Al-4V Alloy Under Different Coolant Condition. *Int J Sci Res* 2014, 122–126.
 43. Revuru, R.S.; Zhang, J.Z.; Posinasetti, N.R.; Kidd, T. Optimization of Titanium Alloys Turning Operation in Varied Cutting Fluid Conditions with Multiple Machining Performance Characteristics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, *95*, 1451–1463, doi:10.1007/s00170-017-1299-5.
 44. Namb, M.; Paulo, D. Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V). *J. Surf. Eng. Mater. Adv. Technol.* 2011, *01*, 9–14, doi:10.4236/jsemat.2011.11002.
 45. Revuru, R.S.; Posinasetti, N.R.; Vsn, V.R.; Amrita, M. Application of Cutting Fluids in Machining of Titanium Alloys—a Review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, *91*, 2477–2498, doi:10.1007/s00170-016-9883-7.
 46. Nandy, A.K.; Gowrishankar, M.C.; Paul, S. Some Studies on High-Pressure Cooling in Turning of Ti-6Al-4V. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2009, *49*, 182–198, doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.08.008.
 47. Kovacevic, R.; Cherukuthota, C.; Mazurkiewicz, M. High Pressure Waterjet Cooling/Lubrication to Improve Machining Efficiency in Milling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 1995, *35*, 1459–1473, doi:10.1016/0890-6955(95)00128-K.

48. Ayed, Y.; Germain, G.; Ammar, A.; Furet, B. Tool Wear Analysis and Improvement of Cutting Conditions Using the High-Pressure Water-Jet Assistance When Machining the Ti7 Titanium Alloy. *Precis. Eng.* 2015, *42*, 294–301, doi:10.1016/j.precisioneng.2015.06.004.
49. Patil, R.A.; Shinde, V.D. Performance of High Pressure Coolant on Tool Wear. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2013, *02*, 61–65, doi:10.15623/ijret.2013.0211011.
50. Pervaiz, S.; Rashid, A.; Deiab, I.; Nicolescu, C.M. An Experimental Investigation on Effect of Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL) in Machining Titanium Alloy (Ti6Al4V). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, *87*, 1371–1386, doi:10.1007/s00170-016-8969-6.
51. Boubekri, N.; Shaikh, V. Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining: Benefits and Drawbacks. *J. Ind. Intell. Inf.* 2014, *3*, 205–209, doi:10.12720/jiii.3.3.205-209.
52. Hörner, D. Minimum Quantity Lubrication Fluids. In *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*; Mang, T., Ed.; Springer, Berlin, Heidelberg, 2014; pp. 1207–1211.
53. Junyan, L.; Huanpeng, L.; Rongdi, H.; Yang, W. The Study on Lubrication Action with Water Vapor as Coolant and Lubricant in Cutting ANSI 304 Stainless Steel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2010, *50*, 260–269, doi:10.1016/j.ijmachtools.2009.12.001.
54. Sharma, V.S.; Dogra, M.; Suri, N.M. Cooling Techniques for Improved Productivity in Turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2009, *49*, 435–453, doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.12.010.
55. Jain, A.; Kumar, S.; Bajpai, V.; Park, H.W. Replacement of Hazard Lubricants by Green Coolant in Machining of Ti6Al4V: A 3D FEM Approach. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2019, *20*, 1027–1035, doi:10.1007/s12541-019-00111-2.
56. Dhananchezian, M.; Pradeep Kumar, M. Cryogenic Turning of the Ti-6Al-4V Alloy with Modified Cutting Tool Inserts. *Cryogenics (Guildf)*. 2011, *51*, 34–40, doi:10.1016/j.cryogenics.2010.10.011.
57. Jamil, M.; Khan, A.M.; Hegab, H.; Gong, L.; Mia, M.; Gupta, M.K.; He, N. Effects of Hybrid Al2O3-CNT Nanofluids and Cryogenic Cooling on Machining of Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019, *102*, 3895–3909, doi:10.1007/s00170-019-03485-9.
58. Vamsi Krishna, P.; Nageswara Rao, D. Performance Evaluation of Solid Lubricants in Terms of Machining Parameters in Turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2008, *48*, 1131–1137, doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.01.012.
59. Nageswara Rao, D.; Vamsi Krishna, P. The Influence of Solid Lubricant Particle Size on Machining Parameters in Turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2008, *48*, 107–111, doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.07.007.
60. Dilbag, S.; Rao, P. V. Performance Improvement of Hard Turning with Solid Lubricants. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2008, *38*, 529–535, doi:10.1007/s00170-007-1079-8.
61. Hörner, D. Metalcutting Fluids. In *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*; Mang, T., Ed.; Springer, Berlin, Heidelberg, 2014; pp. 1137–1139 ISBN 9783642226472.
62. Winter, M.; Öhlschläger, G.; Dettmer, T.; Ibbotson, S.; Kara, S.; Herrmann, C. *Using Jatropha Oil Based*

- Metalworking Fluids in Machining Processes: A Functional and Ecological Life Cycle Evaluation*; Dornfeld, D.A., Linke, B.S., Eds.; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012; ISBN 9788578110796.
63. Brinksmeier, E.; Heinzel, C.; Wittmann, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 1999, 48, 581–598, doi:10.1016/S0007-8506(07)63236-3.
 64. El Baradie, M.A. Cutting Fluids: Part I. Characterisation. *J. Mater. Process. Technol.* 1996, 56, 786–797, doi:10.1016/0924-0136(95)01892-1.
 65. Kuram, E.; Ozcelik, B.; Demirbas, E. Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids. In *Green Manufacturing Processes and Systems*; Davim, J.P., Ed.; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013; pp. 23–47 ISBN 9783642337925.
 66. Olszak, W. *Obróbka Skrawaniem*; II.; Wydawnictwo WNT: Warszawa, 2017;
 67. Mang, T.; Freiler, C.; Hörner, D. Metalworking Fluids. In *Lubricants and Lubrication, 2nd Ed*; Mang, T., Dresel, W., Eds.; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, 2007; pp. 384–521 ISBN 978-3-527-31497-3.
 68. Brinksmeier, E.; Meyer, D.; Huesmann-Cordes, A.G.; Herrmann, C. Metalworking Fluids - Mechanisms and Performance. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2015, 64, 605–628, doi:10.1016/j.cirp.2015.05.003.
 69. Anderson, J.E.; Kim, B.R.; Mueller, S.A.; Lofton, T. V. Composition and Analysis of Mineral Oils and Other Organic Compounds in Metalworking and Hydraulic Fluids. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2003, 33, 73–109, doi:10.1080/10643380390814460.
 70. Gaca, H.; Ruiter, J.; Mehr, G.; Mang, T. Minimal Quantity Lubrication. In *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*; Mang, T., Ed.; Springer, Berlin, Heidelberg, 2014; pp. 1198–1207.
 71. Dhar, N.R.; Kamruzzaman, M.; Ahmed, M. Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel. *J. Mater. Process. Technol.* 2006, 172, 299–304, doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022.
 72. Abd Rahim, E.; Sasahara, H. Performance of Palm Oil as a Biobased Machining Lubricant When Drilling Inconel 718. *MATEC Web Conf.* 2017, 101, 1–5, doi:10.1051/mateconf/201710103015.
 73. Tosun, N.; Huseyinoglu, M. Effect of MQL on Surface Roughness in Milling of AA7075-T6. *Mater. Manuf. Process.* 2010, 25, 793–798, doi:10.1080/10426910903496821.
 74. Gunjal, S.U.; Patil, N.G. Experimental Investigations into Turning of Hardened AISI 4340 Steel Using Vegetable Based Cutting Fluids under Minimum Quantity Lubrication. *Procedia Manuf.* 2018, 20, 18–23, doi:10.1016/j.promfg.2018.02.003.
 75. Yıldırım, Ç.V.; Kıvak, T.; Sarıkaya, M.; Erzincanlı, F. Determination of MQL Parameters Contributing to Sustainable Machining in the Milling of Nickel-Base Superalloy Waspaloy. *Arab. J. Sci. Eng.* 2017, 42, 4667–4681, doi:10.1007/s13369-017-2594-z.
 76. Raza, S.W.; Pervaiz, S.; Deiab, I. Tool Wear Patterns When Turning of Titanium Alloy Using Sustainable Lubrication Strategies. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2014, 15, 1979–1985, doi:10.1007/s12541-014-0554-z.

77. Ghuge, N.C.; Mahalle, A.M. Response Surface Modeling for Cutting Force and Power Consumption during Turning Using Vegetable Oils. *J. Eng. Technol.* 2016, *7*, 75–86.
78. Heinemann, R.; Hinduja, S.; Barrow, G.; Petuelli, G. Effect of MQL on the Tool Life of Small Twist Drills in Deep-Hole Drilling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006, *46*, 1–6, doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.04.003.
79. Tasdelen, B.; Wikblom, T.; Ekered, S. Studies on Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Air Cooling at Drilling. *J. Mater. Process. Technol.* 2008, *200*, 339–346, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.09.064.
80. Zhu, Z.; He, B.; Chen, J. Evaluation of Tool Temperature Distribution in MQL Drilling of Aluminum 2024-T351. *J. Manuf. Process.* 2020, *56*, 757–765, doi:10.1016/j.jmapro.2020.05.029.
81. Maruda, R.W.; Legutko, S.; Krolczyk, G.M.; Raos, P. Influence of Cooling Conditions on the Machining Process under MQCL and MQL Conditions. *Teh. Vjesn.* 2015, *22*, 965–970, doi:10.17559/TV-20140919143415.
82. Krolczyk, J.B.; Maruda, R.W.; Krolczyk, G.M.; Wojciechowski, S.; Gupta, M.K.; Korkmaz, M.E. Investigations on Surface Induced Tribological Characteristics in MQCL Assisted Machining of Duplex Stainless Steel. *J. Mater. Res. Technol.* 2022, *18*, 2754–2769, doi:10.1016/j.jmrt.2022.03.167.
83. Saleem, M.Q.; Mehmood, A. Eco-Friendly Precision Turning of Superalloy Inconel 718 Using MQL Based Vegetable Oils: Tool Wear and Surface Integrity Evaluation. *J. Manuf. Process.* 2022, *73*, 112–127, doi:10.1016/j.jmapro.2021.10.059.
84. Gaitonde, V.N.; Karnik, S.R.; Davim, J.P. Selection of Optimal MQL and Cutting Conditions for Enhancing Machinability in Turning of Brass. *J. Mater. Process. Technol.* 2008, *204*, 459–464, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.193.
85. Mia, M.; Bashir, M. Al; Khan, M.A.; Dhar, N.R. Optimization of MQL Flow Rate for Minimum Cutting Force and Surface Roughness in End Milling of Hardened Steel (HRC 40). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, *89*, 675–690, doi:10.1007/s00170-016-9080-8.
86. Deiab, I.; Raza, S.W.; Pervaiz, S. Analysis of Lubrication Strategies for Sustainable Machining during Turning of Titanium Ti-6al-4v Alloy. *Procedia CIRP* 2014, *17*, 766–771, doi:10.1016/j.procir.2014.01.112.
87. Rahim, E.A.; Sasahara, H. A Study of the Effect of Palm Oil as MQL Lubricant on High Speed Drilling of Titanium Alloys. *Tribol. Int.* 2011, *44*, 309–317, doi:10.1016/j.triboint.2010.10.032.
88. Szczotkarz, N.; Mrugalski, R.; Maruda, R.W.; Królczyk, G.M.; Legutko, S.; Leksycki, K.; Dębowski, D.; Pruncu, C.I. Cutting Tool Wear in Turning 316L Stainless Steel in the Conditions of Minimized Lubrication. *Tribol. Int.* 2021, *156*, doi:10.1016/j.triboint.2020.106813.
89. Shastri, A.; Nargundkar, A.; Kulkarni, A.J.; Benedicenti, L. Optimization of Process Parameters for Turning of Titanium Alloy (Grade II) in MQL Environment Using Multi-CI Algorithm. *SN Appl. Sci.* 2021, *3*, doi:10.1007/s42452-021-04197-0.
90. Yin, Q.; Li, C.; Dong, L.; Bai, X.; Zhang, Y.; Yang, M.; Jia, D.; Li, R. Effects of Physicochemical Properties of Different Base Oils on Friction Coefficient and Surface Roughness in MQL Milling AISI

1045. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.* 2021, doi:10.1007/s40684-021-00318-7.
91. Singh, S.; Gobinda, B.; Behera, C.; Datta, S. Effects of Cutting Speed on MQL Machining Performance of AISI 304 Stainless Steel Using Uncoated Carbide Insert : Application Potential of Coconut Oil and Rice Bran Oil as Cutting Fluids. *Arab. J. Sci. Eng.* 2020, doi:10.1007/s13369-020-04554-y.
92. Khan, A.; Maity, K. Influence of Cutting Speed and Cooling Method on the Machinability of Commercially Pure Titanium (CP-Ti) Grade II. *J. Manuf. Process.* 2018, 31, 650–661, doi:10.1016/j.jmapro.2017.12.021.
93. Khunt, C.P.; Makhesana, M.A.; Patel, K.M.; Mawandiya, B.K. Performance Assessment of Vegetable Oil-Based Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Drilling. *Mater. Today Proc.* 2021, 44, 341–345, doi:10.1016/j.matpr.2020.09.741.
94. Sun, H.; Zou, B.; Chen, P.; Huang, C.; Guo, G.; Liu, J.; Li, L.; Shi, Z. Effect of MQL Condition on Cutting Performance of High-Speed Machining of GH4099 with Ceramic End Mills. *Tribol. Int.* 2022, 167, 107401, doi:10.1016/j.triboint.2021.107401.
95. Abas, M.; Sayd, L.; Akhtar, R.; Salman, Q.; Technology, I.; Rahim, K.; Khan, Y. Optimization of Machining Parameters of Aluminum Alloy 6026-T9 under MQL-Assisted. *Integr. Med. Res.* 2020, 9, 10916–10940, doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.071.
96. Salur, E.; Kuntoglu, M.; Aslan, A.; Pimenov, D.Y. The Effects of MQL and Dry Environments on Tool Wear, Cutting Temperature, and Power Consumption during End Milling of AISI 1040 Steel. *Metals (Basel)*. 2021, 17.
97. Yildirim, Ç.V.; Kivak, T.; Sarikaya, M.; Şirin, Ş. Evaluation of Tool Wear, Surface Roughness/Topography and Chip Morphology When Machining of Ni-Based Alloy 625 under MQL, Cryogenic Cooling and CryoMQL. *J. Mater. Res. Technol.* 2020, 9, 2079–2092, doi:10.1016/j.jmrt.2019.12.069.
98. Maruda, W.R.; Legutko, S.; Krolczyk, G. Effect of Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL) on Chip Morphology and Surface Roughness in Turning Low Carbon Steels. *Appl. Mech. Mater.* 2014, 657, 38–42, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.657.38.
99. Race, A.; Zwierzak, I.; Secker, J.; Walsh, J.; Carrell, J.; Slatter, T.; Maurotto, A. Environmentally Sustainable Cooling Strategies in Milling of SA516: Effects on Surface Integrity of Dry, Flood and MQL Machining. *J. Clean. Prod.* 2021, 288, 125580, doi:10.1016/j.jclepro.2020.125580.
100. Pal, A.; Singh, S.; Hazoor, C.; Sidhu, S. Performance Evaluation of Various Vegetable Oils and Distilled Water as Base Fluids Using Eco - Friendly MQL Technique in Drilling of AISI 321 Stainless Steel. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.* 2021, doi:10.1007/s40684-021-00355-2.
101. Gupta, M.K.; Mia, M.; Jamil, M.; Singh, R.; Singla, A.K.; Song, Q.; Liu, Z.; Khan, A.M.; Rahman, M.A.; Sarikaya, M. Machinability Investigations of Hardened Steel with Biodegradable Oil-Based MQL Spray System. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 108, 735–748, doi:10.1007/s00170-020-05477-6.
102. Maruda, R.; Legutko, S.; Krolczyk, G. Influence of Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL) on

- Chip Formation Zone Factors and Shearing Force in Turning AISI 1045 Steel. *Appl. Mech. Mater.* 2014, 657, 43–47, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.657.43.
103. Singh, R.K.; Dixit, A.R.; Mandal, A.; Sharma, A.K. Emerging Application of Nanoparticle-Enriched Cutting Fluid in Metal Removal Processes: A Review. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2017, 39, 4677–4717, doi:10.1007/s40430-017-0839-0.
 104. Sidik, N.A.C.; Samion, S.; Ghaderian, J.; Yazid, M.N.A.W.M. Recent Progress on the Application of Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication Machining: A Review. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017, 108, 79–89, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.105.
 105. Grzesik, W. Media-Assisted Machining Processes Using Nano-Fluids . Part 1 : Properties and Mechanisms of Nano-Fluids Interaction. *Mechanik* 2021, 6–9.
 106. Venkatesh, K.; Sriram, G.; Uday Kiran Reddy, A.; Nikhil, S.V.R. Influence of Nano Based Metal Working Fluids on Machining Process - A Review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 390, doi:10.1088/1757-899X/390/1/012094.
 107. Venkatesh, K.; Sriram, G.; Uday Kiran Reddy, A.; Nikhil, S.V.R. An Overview on Performance of Metal Working Fluids with Enrichment of Nanoparticles for Machining Process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2018, 390, doi:10.1088/1757-899X/390/1/012097.
 108. Li, C.H.; Li, J.Y.; Wang, S.; Zhang, Q. Modeling and Numerical Simulation of the Grinding Temperature Field with Nanoparticle Jet of MQL. *Adv. Mech. Eng.* 2013, 2013, doi:10.1155/2013/986984.
 109. Zongo, A.S.; Vařtilingom, G.; Daho, T.; Caillol, C.; Hoffmann, J.-F.; Piriou, B.; Valette, J.; Segda, B.G.; Higelin, P. Temperature Dependence of Density, Viscosity, Thermal Conductivity and Heat Capacity of Vegetable Oils for Their Use as Biofuel in Internal Combustion Engines. *Adv. Chem. Eng. Sci.* 2019, 09, 44–64, doi:10.4236/aces.2019.91004.
 110. Huang, W.T.; Wu, D.H.; Chen, J.T. Robust Design of Using Nanofluid/MQL in Micro-Drilling. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 85, 2155–2161, doi:10.1007/s00170-015-7382-x.
 111. Nam, J.S.; Kim, D.H.; Chung, H.; Lee, S.W. Optimization of Environmentally Benign Micro-Drilling Process with Nanofluid Minimum Quantity Lubrication Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm. *J. Clean. Prod.* 2015, 102, 428–436, doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.057.
 112. Chatha, S.S.; Pal, A.; Singh, T. Performance Evaluation of Aluminium 6063 Drilling under the Influence of Nanofluid Minimum Quantity Lubrication. *J. Clean. Prod.* 2016, 137, 537–545, doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.139.
 113. Pal, A.; Chatha, S.S.; Sidhu, H.S. Performance Evaluation of the Minimum Quantity Lubrication with Al₂O₃- Mixed Vegetable-Oil-Based Cutting Fluid in Drilling of AISI 321 Stainless Steel. *J. Manuf. Process.* 2021, 66, 238–249, doi:10.1016/j.jmapro.2021.04.024.
 114. Pal, A.; Chatha, S.S.; Sidhu, H.S. Tribological Characteristics and Drilling Performance of Nano-MoS₂-Enhanced Vegetable Oil-Based Cutting Fluid Using Eco-Friendly MQL Technique in Drilling of AISI 321 Stainless Steel. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2021, 43, 1–20, doi:10.1007/s40430-021-02899-5.

115. Pal, A.; Chatha, S.S.; Sidhu, H.S. Experimental Investigation on the Performance of MQL Drilling of AISI 321 Stainless Steel Using Nano-Graphene Enhanced Vegetable-Oil-Based Cutting Fluid. *Tribol. Int.* 2020, *151*, 106508, doi:10.1016/j.triboint.2020.106508.
116. Rahmati, B.; Sarhan, A.A.D.; Sayuti, M. Investigating the Optimum Molybdenum Disulfide (MoS₂) Nanolubrication Parameters in CNC Milling of AL6061-T6 Alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, *70*, 1143–1155, doi:10.1007/s00170-013-5334-x.
117. Park, K.H.; Ewald, B.; Kwon, P.Y. Effect of Nano-Enhanced Lubricant in Minimum Quantity Lubrication Balling Milling. *J. Tribol.* 2011, *133*, 1–8, doi:10.1115/1.4004339.
118. Sarhan, A.A.D.; Sayuti, M.; Hamdi, M. Reduction of Power and Lubricant Oil Consumption in Milling Process Using a New SiO₂ Nanolubrication System. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012, *63*, 505–512, doi:10.1007/s00170-012-3940-7.
119. Sayuti, M.; Sarhan, A.A.D.; Hamdi, M. An Investigation of Optimum SiO₂ Nanolubrication Parameters in End Milling of Aerospace AL6061-T6 Alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, *67*, 833–849, doi:10.1007/s00170-012-4527-z.
120. Sayuti, M.; Erh, O.M.; Sarhan, A.A.D.; Hamdi, M. Investigation on the Morphology of the Machined Surface in End Milling of Aerospace AL6061-T6 for Novel Uses of SiO₂ Nanolubrication System. *J. Clean. Prod.* 2014, *66*, 655–663, doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.058.
121. Rahmati, B.; Sarhan, A.A.D.; Sayuti, M. Morphology of Surface Generated by End Milling AL6061-T6 Using Molybdenum Disulfide (MoS₂) Nanolubrication in End Milling Machining. *J. Clean. Prod.* 2014, *66*, 685–691, doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.048.
122. Khalil, A.N.M.; Azmi, A.I.; Ali, M.A.M. An Initial Study of the Effect of Minimum Quantity Lubricant of SiO₂ Nanoparticle with PEG on Surface Roughness during Milling of Mild Steel. *Appl. Mech. Mater.* 2014, *695*, 627–630, doi:10.4028/www.scientific.net/amm.695.627.
123. Najiha, M.S.; Rahman, M.M.; Yusoff, A.R. Flank Wear Characterization in Aluminum Alloy (6061 T6) with Nanofluid Minimum Quantity Lubrication Environment Using an Uncoated Carbide Tool. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 2015, *137*, 1–27, doi:10.1115/1.4030060.
124. Najiha, M.S.; Rahman, M.M. Experimental Investigation of Flank Wear in End Milling of Aluminum Alloy with Water-Based TiO₂ Nanofluid Lubricant in Minimum Quantity Lubrication Technique. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, *86*, 2527–2537, doi:10.1007/s00170-015-8256-y.
125. Najiha, M.S.; Rahman, M.M.; Kadirgama, K. Performance of Water-Based TiO₂ Nanofluid during the Minimum Quantity Lubrication Machining of Aluminium Alloy, AA6061-T6. *J. Clean. Prod.* 2016, *135*, 1623–1636, doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.015.
126. Minh, D.T.; The, L.T.; Bao, N.T. Performance of Al₂O₃ Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication in Hard Milling of 60Si2Mn Steel Using Cemented Carbide Tools. *Adv. Mech. Eng.* 2017, *9*, 1–9, doi:10.1177/1687814017710618.
127. Duc, T.M.; Long, T.T.; Dong, P.Q. Effect of the Alumina Nanofluid Concentration on Minimum Quantity

- Lubrication Hard Machining for Sustainable Production. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 2019, 233, 5977–5988, doi:10.1177/0954406219861992.
128. Haq, M.A. ul; Hussain, S.; Ali, M.A.; Farooq, M.U.; Mufti, N.A.; Pruncu, C.I.; Wasim, A. Evaluating the Effects of Nano-Fluids Based MQL Milling of IN718 Associated to Sustainable Productions. *J. Clean. Prod.* 2021, 310, 127463, doi:10.1016/j.jclepro.2021.127463.
 129. Duc, T.M.; Long, T.T.; Tuan, N.M. Performance Investigation of Mql Parameters Using Nano Cutting Fluids in Hard Milling. *Fluids* 2021, 6, doi:10.3390/fluids6070248.
 130. Vamsi Krishna, P.; Srikant, R.R.; Padmini, R.; Parakh, B. Basic Properties and Performance of Vegetable Oil-Based Boric Acid Nanofluids in Machining. *Emerg. Trends Sci. Eng. Technol.* 2012, 197–206, doi:10.1007/978-81-322-1007-8.
 131. Srikiran, S.; Ramji, K.; Satyanarayana, B.; Ramana, S. V. Investigation on Turning of AISI 1040 Steel with the Application of Nano-Crystalline Graphite Powder as Lubricant. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 2014, 228, 1570–1580, doi:10.1177/0954406213509612.
 132. Amrita, M.; Shariq, S.A.; Manoj, M.; Gopal, C. Experimental Investigation on Application of Emulsifier Oil Based Nano Cutting Fluids in Metal Cutting Process. *Procedia Eng.* 2014, 97, 115–124, doi:10.1016/j.proeng.2014.12.231.
 133. Sayuti, M.; Sarhan, A.A.D.; Salem, F. Novel Uses of SiO₂ Nano-Lubrication System in Hard Turning Process of Hardened Steel AISI4140 for Less Tool Wear, Surface Roughness and Oil Consumption. *J. Clean. Prod.* 2014, 67, 265–276, doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.052.
 134. Padmini, R.; Vamsi Krishna, P.; Krishna Mohana Rao, G. Effectiveness of Vegetable Oil Based Nanofluids as Potential Cutting Fluids in Turning AISI 1040 Steel. *Tribol. Int.* 2016, 94, 490–501, doi:10.1016/j.triboint.2015.10.006.
 135. Amrita, M.; Srikant, R.R.; Sitaramaraju, A. V. Performance Evaluation of Nanographite-Based Cutting Fluid in Machining Process. *Mater. Manuf. Process.* 2014, 29, 600–605, doi:10.1080/10426914.2014.893060.
 136. Krishna, A.G.; Rao, T.B. Performance Assessment of Carbon Nano Tube Based Cutting Fluid in Machining Process. *International J. Sci. Eng. Technol.* 2016, 10, 1059–1062.
 137. Roy, S.; Ghosh, A. High Speed Turning of AISI 4140 Steel Using Nanofluid Throught Twin Jet SQL System. *Proc. ASME 2013 Int. Manuf. Sci. Eng. Conf. collocated with 41st North Am. Manuf. Res. Conf.* 2013, 2: *Systems*.
 138. Su, Y.; Gong, L.; Li, B.; Liu, Z.; Chen, D. Performance Evaluation of Nanofluid MQL with Vegetable-Based Oil and Ester Oil as Base Fluids in Turning. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 83, 2083–2089, doi:10.1007/s00170-015-7730-x.
 139. Naresh Babu, M.; Anandan, V.; Muthukrishnan, N. Analysis of EN24 Steel in Turning Process with Copper Nanofluids under Minimum Quantity Lubrication. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2019, 41, 1–13, doi:10.1007/s40430-019-1606-1.

140. Sharma, A.K.; Singh, R.K.; Dixit, A.R.; Tiwari, A.K. Characterization and Experimental Investigation of Al₂O₃ Nanoparticle Based Cutting Fluid in Turning of AISI 1040 Steel under Minimum Quantity Lubrication (MQL). *Mater. Today Proc.* 2016, 3, 1899–1906, doi:10.1016/j.matpr.2016.04.090.
141. Sivaraman, V.; Prakash, S. Performance and Evaluation of MoS₂ Based Machining Using PVD-TiAlN Coated Tool. *J. Mech. Sci. Technol.* 2019, 33, 4383–4388, doi:10.1007/s12206-019-0834-8.
142. Hegab, H.; Kishawy, H. Towards Sustainable Machining of Inconel 718 Using Nano-Fluid Minimum Quantity Lubrication. *J. Manuf. Mater. Process.* 2018, 2, 50, doi:10.3390/jmmp2030050.
143. Singh, T.; Dureja, J.S.; Dogra, M.; Bhatti, M.S. Environment Friendly Machining of Inconel 625 under Nano-Fluid Minimum Quantity Lubrication (NMQL). *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2018, 19, 1689–1697, doi:10.1007/s12541-018-0196-7.
144. Yücel, A.; Yıldırım, Ç.V.; Sarıkaya, M.; Şirin, Ş.; Kıvak, T.; Gupta, M.K.; Tomaz, Í. V Influence of MoS₂ Based Nanofluid-MQL on Tribological and Machining Characteristics in Turning of AA 2024 T3 Aluminum Alloy. *J. Mater. Res. Technol.* 2021, 15, 1688–1704, doi:10.1016/j.jmrt.2021.09.007.
145. Zainal Ariffin, S.; Redhwan, A.A.M.; Arifuddin, A.; Aminullah, A.R.M.; Azim, M.S.; Nughero, W.; Syafiq, A.M.; Efendee, A.M. Performance Evaluation of Titanium Dioxide (TiO₂) Nano Cutting Fluids in CNC Turning of Aluminium Alloy (AL319) via Minimum Quantity Lubricant (MQL) Technique. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021, 1068, 012019, doi:10.1088/1757-899x/1068/1/012019.
146. Touggui, Y.; Uysal, A.; Emiroglu, U.; Belhadi, S.; Temmar, M. Evaluation of MQL Performances Using Various Nanofluids in Turning of AISI 304 Stainless Steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 115, 3983–3997, doi:10.1007/s00170-021-07448-x.
147. Eltaggaz, A.; Hegab, H.; Deiab, I.; Kishawy, H.A. Hybrid Nano-Fluid-Minimum Quantity Lubrication Strategy for Machining Austempered Ductile Iron (ADI). *Int. J. Interact. Des. Manuf.* 2018, 12, 1273–1281, doi:10.1007/s12008-018-0491-7.
148. Elsheikh, A.H.; Elaziz, M.A.; Das, S.R.; Muthuramalingam, T.; Lu, S. A New Optimized Predictive Model Based on Political Optimizer for Eco-Friendly MQL-Turning of AISI 4340 Alloy with Nano-Lubricants. *J. Manuf. Process.* 2021, 67, 562–578, doi:10.1016/j.jmapro.2021.05.014.
149. Das, A.; Pradhan, O.; Patel, S.K.; Das, S.R.; Biswal, B.B. Performance Appraisal of Various Nanofluids during Hard Machining of AISI 4340 Steel. *J. Manuf. Process.* 2019, 46, 248–270, doi:10.1016/j.jmapro.2019.07.023.
150. Gupta, M.K.; Sood, P.K.; Sharma, V.S. Optimization of Machining Parameters and Cutting Fluids during Nano-Fluid Based Minimum Quantity Lubrication Turning of Titanium Alloy by Using Evolutionary Techniques. *J. Clean. Prod.* 2016, 135, 1276–1288, doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.184.
151. Hegab, H.; Kishawy, H.A.; Gadallah, M.H.; Umer, U.; Deiab, I. On Machining of Ti-6Al-4V Using Multi-Walled Carbon Nanotubes-Based Nano-Fluid under Minimum Quantity Lubrication. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 97, 1593–1603, doi:10.1007/s00170-018-2028-4.
152. Gupta, M.K.; Sood, P.K. Surface Roughness Measurements in NFMQL Assisted Turning of Titanium

Alloys: An Optimization Approach. *Friction* 2017, 5, 155–170, doi:10.1007/s40544-017-0141-2.

153. Kishawy, H.A.; Hegab, H.; Deiab, I.; Eltaggaz, A. Sustainability Assessment during Machining Ti-6Al-4V with Nano-Additives-Based Minimum Quantity Lubrication. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, doi:10.3390/jmmp3030061.
154. Kim, J.S.; Kim, J.W.; Lee, S.W. Experimental Characterization on Micro-End Milling of Titanium Alloy Using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication with Chilly Gas. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 91, 2741–2749, doi:10.1007/s00170-016-9965-6.
155. Gaurav, G.; Sharma, A.; Dangayach, G.S.; Meena, M.L. Assessment of Jojoba as a Pure and Nano-Fluid Base Oil in Minimum Quantity Lubrication (MQL) Hard-Turning of Ti-6Al-4V: A Step towards Sustainable Machining. *J. Clean. Prod.* 2020, 272, 122553, doi:10.1016/j.jclepro.2020.122553.
156. Hegab, H.; Umer, U.; Deiab, I.; Kishawy, H. Performance Evaluation of Ti-6Al-4V Machining Using Nano-Cutting Fluids under Minimum Quantity Lubrication. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 95, 4229–4241, doi:10.1007/s00170-017-1527-z.
157. Singh, V.; Sharma, A.K.; Sahu, R.K.; Katiyar, J.K. Novel Application of Graphite-Talc Hybrid Nanoparticle Enriched Cutting Fluid in Turning Operation. *J. Manuf. Process.* 2021, 62, 378–387, doi:10.1016/j.jmapro.2020.12.017.
158. Nguyen, T.; Nguyen, D.; Howes, P.; Kwon, P.; Park, K.-H. Minimum Quantity Lubrication (MQL) Using Vegetable Oil With Nano-Platelet Solid Lubricant in Milling Titanium Alloy. *ASME 2015 Int. Manuf. Sci. Eng. Conf.* 2015.
159. Zaman, P.B.; Tusar, M.I.H.; Dhar, N.R. Selection of Appropriate Process Inputs for Turning Ti-6Al-4V Alloy under Hybrid Al₂O₃-MWCNT Nano-Fluid Based MQL. *Adv. Mater. Process. Technol.* 2020, 1–21, doi:10.1080/2374068X.2020.1812324.
160. Anandan, V.; Naresh Babu, M.; Muthukrishnan, N.; Dinesh Babu, M. Performance of Silver Nanofluids with Minimum Quantity Lubrication in Turning on Titanium: A Phase to Green Manufacturing. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 2020, 42, 1–15, doi:10.1007/s40430-020-02277-7.
161. Eltaggaz, A.; Nouzil, I.; Deiab, I. Machining Ti-6Al-4V Alloy Using Nano-Cutting Fluids: Investigation and Analysis. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, doi:10.3390/jmmp5020042.
162. Sahoo, S.P.; Datta, S. Dry, MQL, and Nanofluid MQL Machining of Ti-6Al-4V Using Uncoated WC-Co Insert: Application of Jatropha Oil as Base Cutting Fluid and Graphene Nanoplatelets as Additives. *Arab. J. Sci. Eng.* 2020, 45, 9599–9618, doi:10.1007/s13369-020-04849-0.
163. Klocke, F. *Manufacturing Processes I*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Berlin, 2011; ISBN 9783642119781.
164. Grzesik, W. *Podstawy Skrawania Materiałów Konstrukcyjnych*; III.; Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa, 2018;
165. Lisowicz, J.; Habrat, W.; Krupa, K.; Janocha, P. The Effect of Different MQL Supply Strategies into the Cutting Zone on the Tool Wear When Turning of Ti-6Al-4V Alloy. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021,

1037, doi:10.1088/1757-899X/1037/1/012004.

166. **Lisowicz, J.**; Habrat, W.; Krupa, K. Influence of Minimum Quantity Lubrication Using Vegetable-Based Cutting Fluids on Surface Topography and Cutting Forces in Finish Turning of Ti-6Al-4V. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2022, 16, 95–103, doi:10.12913/22998624/143289.
167. Markopoulos, A.P.; Habrat, W.; Galanis, N.I.; Karkalos, N.E. *Modelling and Optimization of Machining with the Use of Statistical Methods and Soft Computing*; 2016; ISBN 9783319238388.
168. Mello, G.D.; Pai, P.S. Surface Roughness Modeling in High Speed Turning of Ti-6Al-4V Using Response Surface Methodology. *Mater. Today Proc.* 2018, 5, 11686–11696, doi:10.1016/j.matpr.2018.02.138.
169. Kluz, R.; Habrat, W.; Bucior, M.; Krupa, K.; Sęp, J. Multi-Criteria Optimization of the Turning Parameters of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Using the Response Surface Methodology. *Eksploat. i Niezawodn.* 2022, 24, 668–676, doi:10.17531/ein.2022.4.7.
170. Leksycki, K.; Feldshtein, E.; Królczyk, G.M.; Legutko, S. On the Chip Shaping and Surface Topography When Finish Cutting 17-4 PH Precipitation-Hardening Stainless Steel under near-Dry Cutting Conditions. *Materials (Basel)*. 2020, 13, doi:10.3390/ma13092188.
171. Leksycki, K.; Feldshtein, E.; **Lisowicz, J.**; Chudy, R.; Mrugalski, R. Cutting Forces and Chip Shaping When Finish Turning of 17-4 Ph Stainless Steel under Dry, Wet, and Mql Machining Conditions. *Metals (Basel)*. 2020, 10, 1–15, doi:10.3390/met10091187.
172. **Lisowicz, J.** Influence of Coefficient of Friction on Ti-6Al-4V Titanium Alloy Turning Process - FEM Analysis. *Technol. i Autom. Montażu* 2020, 3, 22–29, doi:10.15199/160.2020.3.3.

Załącznik A Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania

Tabela A. 1 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy A3G0.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
3 657	62,93	0,49	40,95	0,99	28,79	1,06
6 104	63,23	0,61	42,49	0,90	29,94	1,19
8 551	63,75	0,59	44,00	0,86	31,30	1,21
10 998	64,27	0,69	45,54	0,87	32,71	1,30
13 445	64,99	0,47	47,29	0,72	34,13	1,27
15 892	65,69	0,46	48,97	0,80	35,83	1,07
18 339	66,34	0,58	50,75	0,91	37,45	1,21
20 786	66,98	0,91	52,70	1,12	38,90	1,70
23 234	67,91	0,68	54,54	1,35	40,55	1,48
25 681	68,76	0,56	56,78	1,72	42,41	1,42
28 128	69,67	0,63	59,24	2,15	44,478	1,50
30 575	70,71	0,82	61,93	2,80	46,66	1,79
33 022	71,84	0,98	64,91	3,46	49,28	2,25
35 469	73,09	1,05	68,59	4,25	52,16	2,58
37 916	74,34	1,28	72,89	5,15	55,39	3,00
40 364	75,87	1,48	77,85	6,27	59,152	3,20
42 811	77,67	2,01	84,08	8,32	63,41	4,13
45 258	80,37	3,16	94,71	14,69	70,61	8,33
47 705	83,47	4,57	108,97	22,67	80,13	13,63
50 152	87,72	5,39	127,20	28,20	92,42	17,06

Tabela A. 2 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy A3G15.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
4 349	62,53	0,49	40,68	1,48	28,51	0,68
6 997	62,96	0,56	42,11	1,45	29,57	1,00
9 645	63,52	0,60	43,60	1,48	30,79	1,34
12 294	64,14	0,61	45,13	1,60	32,20	1,66
14 942	64,81	0,58	46,77	1,76	33,59	1,85
17 590	65,61	0,66	48,54	1,92	35,22	2,25
20 238	66,34	0,62	50,26	2,17	36,76	2,57
22 886	67,09	0,72	52,07	2,40	38,30	2,90
25 534	67,99	0,90	54,10	2,69	39,99	3,25
28 182	68,92	1,00	56,39	2,99	41,93	3,67
30 830	69,84	1,09	58,91	3,42	44,08	4,20
33 479	70,85	1,27	61,77	3,91	46,42	4,68
36 127	71,99	1,49	64,87	4,53	48,97	5,14
38 775	73,09	1,77	68,46	5,32	51,88	5,92
41 423	74,36	1,96	72,56	6,36	55,04	6,70
44 071	75,89	2,35	77,23	7,64	58,56	7,63
46 719	77,83	2,90	83,27	8,87	62,94	8,74
49 367	80,93	4,03	94,50	13,12	69,93	11,29
52 016	84,80	5,81	109,39	20,97	78,74	15,54
54 664	88,88	7,26	125,00	27,89	87,89	19,54

Tabela A. 3 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy A3G30.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
4 467	62,53	0,81	40,57	0,21	28,65	1,34
7 226	62,89	0,88	42,08	0,24	29,78	1,60
9 984	63,41	0,78	43,60	0,34	31,04	1,72
12 742	64,03	0,72	45,13	0,43	32,30	1,69
15 500	64,64	0,73	46,55	0,46	33,48	1,65
18 258	65,32	0,66	48,10	0,33	34,75	1,52
21 017	66,06	0,65	49,89	0,35	36,24	1,50
23 775	66,92	0,63	51,91	0,67	37,95	1,71
26 533	67,83	0,62	54,11	1,03	39,93	1,85
29 292	68,72	0,72	56,58	1,29	41,93	2,11
32 050	69,64	0,81	59,23	1,48	44,17	2,30
34 808	70,58	0,90	62,17	1,76	46,61	2,64
37 567	71,59	1,08	65,40	2,34	49,16	3,25
40 325	72,80	1,22	69,08	3,21	52,05	4,02
43 083	74,07	1,49	73,54	4,21	55,50	4,48
45 841	75,59	1,86	78,99	5,91	59,61	5,28
48 600	77,43	2,44	86,01	8,90	64,71	6,96
51 358	80,14	3,84	96,22	15,32	71,91	10,81
54 116	83,66	5,45	110,30	22,33	81,59	15,77
56 875	87,31	6,87	125,35	28,07	91,87	19,77

Tabela A. 4 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy A3G60.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
4 997	62,72	0,59	41,75	1,46	29,99	0,97
7 487	63,04	0,83	43,32	1,71	31,03	1,30
9 978	63,50	0,95	44,91	1,99	32,22	1,57
12 468	64,11	0,98	46,60	2,28	33,68	1,87
14 958	64,85	0,98	48,42	2,46	35,27	2,05
17 448	65,52	1,13	50,29	2,67	36,90	2,22
19 938	66,28	1,17	52,42	2,89	38,69	2,39
22 429	67,04	1,17	54,71	3,12	40,61	2,62
24 919	67,84	1,20	57,16	3,35	42,61	2,90
27 409	68,80	1,35	59,89	3,65	44,84	3,19
29 899	69,82	1,42	62,91	3,97	47,38	3,48
32 389	70,81	1,53	66,18	4,44	49,99	4,01
34 880	71,85	1,69	69,90	5,20	52,90	4,80
37 370	73,06	1,92	73,99	6,06	56,11	5,51
39 860	74,56	2,13	78,72	7,00	59,66	6,23
42 350	76,19	2,53	84,16	8,53	63,46	7,31
44 840	78,07	3,01	90,50	10,55	67,67	8,66
47 330	80,30	3,49	98,10	13,30	72,56	10,17
49 820	83,61	4,44	110,65	17,26	81,17	13,19
52 310	87,18	5,02	125,21	18,41	90,96	14,65

Tabela A. 5 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy T2G0.

Objętość usuniętego materiału V, mm^3	Główna siła skrawania F_c, N		Siła odporowa F_p, N		Siła posuwowa F_f, N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
4 114	62,50	0,67	41,16	1,95	29,32	2,53
6 590	62,95	0,79	42,83	2,03	30,88	2,44
9 067	63,49	0,81	44,44	2,19	32,33	2,56
11 544	64,15	0,69	46,36	2,18	34,01	2,85
14 021	64,92	0,52	48,33	2,14	35,80	2,90
16 498	65,75	0,64	50,34	2,30	37,58	3,10
18 974	66,46	0,72	52,41	2,59	39,45	3,72
21 451	67,20	0,69	54,56	2,89	41,27	4,27
23 928	68,11	0,79	56,89	3,23	43,36	4,58
26 405	69,08	0,81	59,54	3,58	45,71	4,75
28 881	70,08	0,81	62,50	3,93	48,17	5,00
31 358	71,11	0,88	65,76	4,44	50,77	5,35
33 835	72,26	0,95	69,42	5,06	53,73	5,99
36 312	73,58	1,06	73,60	5,85	56,94	6,63
38 789	75,08	1,24	78,35	6,81	60,83	7,24
41 265	76,76	1,43	83,70	7,76	65,08	7,93
43 742	78,75	1,41	90,05	7,45	69,44	8,08
46 219	81,20	1,32	97,94	5,65	74,66	5,87
48 696	84,50	1,54	110,11	2,94	81,44	2,73
51 173	88,38	2,43	125,02	1,37	88,61	1,48

Tabela A. 6 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy T2G15.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
5 027	62,25	0,18	41,30	1,99	28,99	0,89
7 540	62,78	0,15	42,86	1,85	30,31	0,70
10 054	63,41	0,14	44,56	1,82	31,69	0,65
12 568	64,03	0,07	46,37	1,83	33,10	0,69
15 082	64,71	0,19	48,12	1,81	34,62	0,66
17 596	65,43	0,28	49,94	1,85	36,20	0,51
20 110	65,99	0,50	51,59	2,07	37,82	0,42
22 624	66,71	0,56	53,54	2,22	39,57	0,89
25 138	67,62	0,53	55,80	2,29	41,23	1,20
27 652	68,49	0,67	58,28	2,57	43,15	1,45
30 165	69,42	0,85	60,93	2,96	45,40	1,66
32 679	70,36	0,96	63,82	3,51	47,88	2,01
35 193	71,48	1,05	67,24	3,75	50,65	2,36
37 707	72,74	1,18	71,11	4,10	53,87	2,51
40 221	74,06	1,28	75,35	4,49	57,41	2,52
42 735	75,65	1,47	80,29	5,22	61,15	2,98
45 249	77,67	1,99	86,93	7,45	66,42	5,19
47 763	80,18	2,75	96,90	13,84	73,31	8,86
50 277	83,50	2,73	111,20	15,68	82,30	10,83
52 791	87,58	2,64	126,98	17,60	91,45	13,25

Tabela A. 7 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy T2G30.

Objętość usuniętego materiału V, mm^3	Główna siła skrawania F_c, N		Siła odporowa F_p, N		Siła posuwowa F_f, N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
4 114	62,32	0,88	41,72	2,54	28,74	1,47
6 675	62,75	1,15	43,50	2,85	30,10	1,86
9 237	63,26	1,40	45,19	3,22	31,44	2,28
11 799	63,87	1,58	47,02	3,68	33,02	2,62
14 361	64,54	1,75	48,80	4,25	34,48	3,16
16 923	65,27	1,93	50,66	4,79	36,09	3,73
19 485	66,09	2,12	52,69	5,40	37,89	4,28
22 047	66,95	2,29	54,93	6,10	39,77	4,93
24 609	67,81	2,45	57,48	7,01	41,92	5,67
27 171	68,79	2,75	60,39	8,30	44,44	6,57
29 733	69,84	3,09	63,55	9,76	47,08	7,67
32 295	70,98	3,42	67,04	11,41	49,88	8,96
34 857	72,21	3,80	71,14	13,59	53,07	10,39
37 419	73,54	4,29	75,78	15,82	56,64	11,69
39 981	74,99	4,91	80,94	18,11	60,49	12,91
42 543	76,76	5,89	86,07	19,37	63,82	12,84
45 105	78,86	6,89	92,78	22,41	67,65	13,12
47 667	81,26	7,89	101,19	26,81	72,29	13,47
50 229	83,91	8,68	110,30	30,62	77,27	13,55
52 791	87,24	8,97	121,71	32,86	84,10	12,81

Tabela A. 8 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla cieczy T2G60.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
4 555	63,24	1,33	43,51	3,10	30,95	2,59
6 834	63,63	1,29	45,13	3,21	32,34	2,60
9 113	64,06	1,27	46,76	3,39	33,73	2,72
11 392	64,81	1,41	48,58	3,74	35,34	3,00
13 671	65,52	1,57	50,46	4,05	36,88	3,21
15 950	66,15	1,64	52,41	4,37	38,46	3,49
18 229	66,92	1,75	54,66	4,86	40,32	4,07
20 508	67,75	1,94	57,10	5,38	42,42	4,56
22 788	68,65	2,17	59,71	5,99	44,57	5,16
25 067	69,62	2,42	62,55	6,74	46,90	5,96
27 346	70,70	2,61	65,76	7,87	49,65	7,11
29 625	71,80	2,85	69,28	9,14	52,46	8,07
31 904	73,04	3,18	73,30	10,64	55,62	9,10
34 183	74,45	3,58	77,88	12,31	59,19	10,28
36 462	76,02	4,00	83,21	14,07	63,17	11,34
38 741	77,77	4,57	88,70	15,48	66,94	11,83
41 020	79,81	5,47	96,92	20,09	72,56	14,56
43 299	82,17	6,50	106,31	26,40	78,67	18,71
45 578	84,87	7,37	116,80	32,58	84,99	22,93
47 857	87,82	8,14	128,10	38,48	91,41	27,18

Tabela A. 9 Zestawienie średnich wartości składowych siły skrawania oraz odchyłeń standardowych w funkcji objętości usuniętego materiału dla obróbki na sucho.

Objętość usuniętego materiału V , mm ³	Główna siła skrawania F_c , N		Siła odporowa F_p , N		Siła posuwowa F_f , N	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
1 173	65,37	0,75	45,06	1,61	30,28	1,13
2 982	66,02	0,77	46,85	2,24	32,32	2,04
4 790	66,75	0,72	48,96	2,75	34,64	2,54
6 599	67,61	0,78	51,55	3,43	37,14	2,91
8 407	68,15	1,09	54,22	4,32	39,53	3,37
10 216	68,86	1,47	57,37	5,67	42,14	4,28
12 024	70,39	1,46	61,39	7,04	45,47	5,29
13 833	71,84	1,82	65,41	8,33	48,72	5,80
15 642	73,14	2,39	69,45	9,63	51,91	5,98
17 450	74,11	2,96	73,10	9,84	54,74	5,71
19 259	76,26	3,02	77,06	9,70	57,78	6,15
21 067	78,22	3,71	85,16	13,56	62,67	7,94
22 876	79,92	4,00	95,47	20,91	67,92	10,10
24 684	82,10	4,22	109,27	28,42	75,68	13,07
26 493	84,87	3,96	126,42	32,92	86,00	13,81

ANALIZA TOCZENIA WYKOŃCZENIOWEGO STOPU TYTANU Ti-6Al-4V W WARUNKACH MQL Z ZASTOSOWANIEM DODATKU MIKROMETRYCZNEGO PROSZKU Z GRAFITU PŁATKOWEGO

Streszczenie

Praca doktorska dotyczy określenia wpływu dodatku mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego o różnym stężeniu w różnych, biodegradowalnych cieczach bazowych, na wybrane wskaźniki skrawalności stopu tytanu Ti-6Al-4V i stan technologicznej warstwy wierzchniej, w procesie toczenia wykończeniowego w warunkach MQL. W rozprawie przeprowadzono analizę oddziaływań i modelowanie związków pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem i masowym stężeniem mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej, a składowymi siły skrawania oraz parametrami chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego *Sa* i *Sz*.

W pierwszej części pracy przeprowadzono analizę literatury. Przedstawiono w niej krótką charakterystykę tytanu i jego stopów oraz zaprezentowano rozwiązania stosowane w zakresie chłodzenia i smarowania strefy skrawania podczas obróbki skrawaniem. Przedstawiono wyniki wcześniejszych prac badawczych dotyczących obróbki stopów metali w warunkach MQL z czystymi cieczami bazowymi oraz z cieczami z mikro- i nanododatkami, ze szczególnym uwzględnieniem publikacji dotyczących obróbki stopów tytanu w warunkach MQL z cieczami z dodatkiem mikro- i nanocząstek.

W dalszej części podano cel, hipotezę i zakres pracy. Następnie omówiono warunki badań doświadczalnych – stanowisko badawcze, materiał obrabiany, narzędzia skrawające oraz ciecze zastosowane w warunkach MQL. Kolejną część pracy stanowią badania wstępne. W ramach tej części pracy określono sposób doprowadzenia cieczy chłodząco-smarującej w pobliże strefy skrawania, określono wartość wydatku cieczy oraz dobrano ciecze bazowe.

Zasadniczą część pracy stanowiły badania nad wpływem stężenia masowego mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej na trwałość ostrza oraz sposób kształtowania wióra. Opracowano modele przedstawiające związek pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, tj. prędkością skrawania, posuwem i stężeniem masowym mikrometrycznego proszku z grafitu płatkowego w cieczy bazowej a składowymi siły skrawania oraz podstawowymi parametrami chropowatości powierzchni. Przedstawiono także analizę statystyczną i graficzną uzyskanych wyników. Przeprowadzono także kontrolę mikrostruktury warstwy wierzchniej po obróbce.

Pracę zakończono przedstawiając podsumowanie i wnioski końcowe. Wyartykułowano elementy nowości, które pojawiły się w pracy oraz zaprezentowano możliwe kierunki dalszych prac badawczych.

ANALYSIS OF FINISH TURNING OF Ti-6Al-4V TITANIUM ALLOY UNDER MQL CONDITIONS USING GRAPHITE MICRO-POWDER ADDITIVE

Abstract

The Ph.D. dissertation concerns on the determination of the effect of the addition of graphite micro-powder of different concentration in various biodegradable base liquids on selected machinability indexes of the Ti-6Al-4V titanium alloy and the state of the technological surface layer in the finishing turning in MQL conditions. In the thesis, an analysis of interactions and modelling of relationships between the process setting parameters, i.e. cutting speed, feed rate and mass concentration of micrometric graphite micro-powder in the base liquid, and the components of the cutting force and the surface roughness parameters of the workpiece S_a and S_z , was carried out.

In the first part of the work, an analysis of the literature was carried out. It presents a brief characteristic of titanium and its alloys and presents solutions used in the cooling and lubrication of the cutting zone during machining. The results of earlier research on the machining of metal alloys in MQL conditions with the use of pure base liquids and liquids with micro- and nanoadditives are presented, with particular emphasis on publications on the machining of titanium alloys in MQL conditions with liquids with the addition of micro- and nanoparticles.

In the following chapter, the aim, hypothesis, and scope of the work are given. Then, the conditions of experimental research were discussed: test stand, workpiece, cutting tools, and liquids used in MQL conditions. The next part of the work is preliminary research. The method of supplying the cooling and lubricating liquid to the cutting zone and the value of the liquid output were determined, and the base liquids were selected.

The main part of the work was research on the influence of mass concentration of graphite micro-powder in the base liquid on tool life and chip shaping. Models were developed showing the relationship between the setting parameters of the process, i.e. cutting speed, feed rate and mass concentration of micrometric graphite micro-powder in the base liquid, and the components of the cutting force and the basic parameters of surface roughness. Statistical and graphical analysis of the results obtained was also presented. The microstructure of the surface layer after machining was also checked.

The work was concluded with a summary and final conclusions. The elements of novelties that appeared in the work were articulated and possible directions for further research were presented.