



**UNIwersytet Zielonogórski**  
**Wydział Mechaniczny**  
**Instytut Inżynierii Mechanicznej**



Dziedzina: Nauk Inżynieryjno-Technicznych  
Dyscyplina: Inżynieria Mechaniczna

## ROZPRAWA DOKTORSKA

### **WYBRANE ZAGADNIENIA PROCESU WIERCENIA OTWORÓW W STOPIE ALUMINIUM AlSi10Mg(Cu) W WARUNKACH ZMINIMALIZOWANEGO SMAROWANIA Z SYSTEMEM DWUKANAŁOWYM WIERTEL PEŁNOWĘGLIKOWYCH**

SELECTED ISSUES OF THE HOLE DRILLING PROCESS IN  
AlSi10Mg(Cu) ALUMINIUM ALLOY UNDER MINIMUM QUANTITY  
LUBRICATION CONDITIONS WITH A TWO-CHANNEL SYSTEM

Promotor:

dr hab. inż. Radosław Maruda, prof. UZ

Autor:

mgr inż. Roland Mrugalski

*Pracę akceptuję*

.....  
(data i podpis promotora)

Zielona Góra, 2023 r.



*mgr inż. Roland Mrugalski*

WYBRANE ZAGADNIENIA PROCESU WIERCENIA  
OTWORÓW W STOPIE ALUMINIUM  $AlSi10Mg(Cu)$   
W WARUNKACH ZMINIMALIZOWANEGO  
SMAROWANIA Z SYSTEMEM DWUKANAŁOWYM  
WIERTEL PEŁNOWĘGLIKOWYCH





## Spis treści

|                                                                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....</b>                                                                                                   | <b>7</b>  |
| <b>WSTĘP.....</b>                                                                                                                                    | <b>9</b>  |
| <b>1. ANALIZA LITERATUROWA.....</b>                                                                                                                  | <b>13</b> |
| 1.1. Ciecze chłodząco-smarujące stosowane podczas wiercenia.....                                                                                     | 13        |
| 1.1.1. Podstawowe zadania stawiane cieczom chłodząco-smarującym .....                                                                                | 13        |
| 1.1.2. Podział i charakterystyka cieczy chłodząco-smarujących .....                                                                                  | 14        |
| 1.1.3. Ciecze chłodząco-smarujące na bazie oleju mieszalne z wodą.....                                                                               | 15        |
| 1.1.4. Ciecze chłodząco-smarujące na bazie oleju niemieszalne z wodą.....                                                                            | 17        |
| 1.1.5. Roztwory wodne .....                                                                                                                          | 19        |
| 1.2. Dodatki wprowadzane do cieczy chłodząco-smarujących .....                                                                                       | 20        |
| 1.2.1. Dodatki przeciwzatarciowe EP .....                                                                                                            | 21        |
| 1.2.2. Dodatki przeciwzużyciowe AW.....                                                                                                              | 22        |
| 1.2.3. Nanocząsteczki.....                                                                                                                           | 24        |
| 1.2.4. Dodatki zmieniające właściwości chemiczne .....                                                                                               | 30        |
| 1.2.5. Dodatki zmieniające właściwości fizyczne cieczy chłodząco-smarujących .....                                                                   | 31        |
| 1.3. Metody doprowadzania cieczy chłodząco-smarujących do strefy skrawania podczas wiercenia .....                                                   | 31        |
| 1.3.1. Chłodzenie zewnętrzne swobodnym strumieniem.....                                                                                              | 32        |
| 1.3.2. Chłodzenie pod ciśnieniem przez kanały wewnątrz narzędzia .....                                                                               | 33        |
| 1.3.3. Metoda zminimalizowanego smarowania.....                                                                                                      | 33        |
| 1.3.4. Parametry wejściowe tworzenia medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania.....                                                    | 37        |
| 1.3.5. Parametry wyjściowe tworzenia medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania.....                                                    | 42        |
| 1.3.6. Porównanie metod chłodzenia z doprowadzeniem wewnętrznym i zewnętrznym.....                                                                   | 46        |
| 1.3.8. Wiercenie na sucho .....                                                                                                                      | 58        |
| 1.3.9. Wnioski dotyczące stanu wiedzy o właściwościach użytkowych.....                                                                               | 59        |
| <b>2. , CEL, ZAKRES I HIPOTEZA PRACY .....</b>                                                                                                       | <b>61</b> |
| 2.1. Elementy nowości w pracy .....                                                                                                                  | 61        |
| 2.2. Cel i zakres pracy.....                                                                                                                         | 61        |
| 2.3. Hipoteza naukowa .....                                                                                                                          | 63        |
| <b>3. BADANIA SYMULACYJNE PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH I WYJŚCIOWYCH TWORZENIA AEROZOLU W METODZIE ZMINIMALIZOWANEGO SMAROWANIA PODCZAS WIERCENIA.....</b> | <b>65</b> |
| 3.1. Cel i zakres badań symulacyjnych.....                                                                                                           | 65        |

|                                                                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2. Opis cech oprogramowania i stanowiska komputerowego użytego do badań symulacyjnych .....                   | 66         |
| 3.3. Założenia i uproszczenia w modelu matematycznym CFD .....                                                  | 66         |
| 3.4. Opis geometrycznego układu objętego modelem symulacyjnym .....                                             | 67         |
| 3.5. Dyskretyzacja modelu geometrycznego .....                                                                  | 70         |
| 3.6. Charakterystyka środowiska przebiegu symulacji.....                                                        | 75         |
| 3.7. Wyniki badań symulacyjnych.....                                                                            | 77         |
| 3.8. Wnioski.....                                                                                               | 97         |
| <b>4. METODYKA I WARUNKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH .....</b>                                                        | <b>99</b>  |
| 4.1. Cel badań doświadczalnych.....                                                                             | 99         |
| 4.2. Metoda badań.....                                                                                          | 99         |
| 4.3. Charakterystyka badanych materiałów .....                                                                  | 100        |
| 4.3.1. Materiał obrabiany .....                                                                                 | 100        |
| 4.3.2. Ciecz chłodząco-smarująca .....                                                                          | 101        |
| 4.4. Warunki i zakres badań .....                                                                               | 102        |
| 4.4.1. Narzędzie skrawające .....                                                                               | 102        |
| 4.4.2. Warunki dostarczania medium czynnego do strefy skrawania .....                                           | 104        |
| 4.4.3. Badania drgań narzędzia .....                                                                            | 105        |
| 4.4.4. Badania topografii powierzchni .....                                                                     | 107        |
| 4.4.5. Badania dokładności wymiarowo-kształtowej otworów.....                                                   | 108        |
| 4.4.6. Badania zużycia narzędzi .....                                                                           | 109        |
| <b>5. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH .....</b>                                                                    | <b>113</b> |
| 5.1. Ocena drgań narzędzia.....                                                                                 | 113        |
| 5.1.1. Analiza przebiegów czasowych i charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań .....   | 113        |
| 5.1.2. Analiza statystycznej istotności wpływu parametrów wejściowych wiercenia na przyspieszenia drgań .....   | 121        |
| 5.1.3. Analiza wpływu parametrów wejściowych wiercenia na wartości średniokwadratowe przyspieszenia drgań ..... | 124        |
| 5.2. Ocena topografii powierzchni obrobionej .....                                                              | 133        |
| 5.3. Ocena dokładności wykonania otworów .....                                                                  | 151        |
| 5.4. Ocena zużycia narzędzia.....                                                                               | 158        |
| 5.5. Wnioski z badań doświadczalnych.....                                                                       | 165        |
| <b>6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>                                                                          | <b>168</b> |
| 6.1. Wnioski poznawcze .....                                                                                    | 168        |
| 6.2. Wnioski utylitarne .....                                                                                   | 170        |
| 6.3. Wnioski do dalszych badań .....                                                                            | 171        |
| <b>LITERATURA.....</b>                                                                                          | <b>175</b> |
| <b>STRESZCZENIE.....</b>                                                                                        | <b>191</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                                                                           | <b>193</b> |

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

### Ważniejsze oznaczenia

|              |                                                                                    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$          | – wydłużenie procentowe po zerwaniu, %                                             |
| $a_p$        | – głębokość skrawania, mm                                                          |
| $A_{RMS}$    | – wartość średniokwadratowa wypadkowej przyspieszeń drgań, $m/s^2$                 |
| $A_x$        | – przyspieszenie drgań w kierunku poprzecznym osi X, $m/s^2$                       |
| $A_{x\_RMS}$ | – wartość średniokwadratowa przyspieszenia drgań w osi X, $m/s^2$                  |
| $A_y$        | – przyspieszenie drgań w osi Y, $m/s^2$                                            |
| $A_{y\_RMS}$ | – wartość średniokwadratowa przyspieszenia drgań w osi Y, $m/s^2$                  |
| $A_z$        | – przyspieszenie drgań w kierunku osi Z, $m/s^2$                                   |
| $A_{z\_RMS}$ | – wartość średniokwadratowa przyspieszenia drgań w osi Z, $m/s^2$                  |
| $d$          | – średnica kropel, mm                                                              |
| $D$          | – średnica otworu, mm                                                              |
| $d_{max}$    | – maksymalna średnica kropel, mm                                                   |
| $d_{min}$    | – minimalna średnica kropel, mm                                                    |
| $E$          | – natężenie przepływu objętościowego cieczy chłodząco-smarującej, ml/h             |
| $f$          | – posuw, mm/obr.                                                                   |
| $f_{no}$     | – składowa częstotliwościowa prędkości obrotowej wrzeciona, Hz                     |
| $f_o$        | – składowa częstotliwościowa przejścia ostrzy, Hz                                  |
| $F_o$        | – siła osiowa, N                                                                   |
| $HB$         | – twardość w skali Brinella                                                        |
| $KB$         | – szerokość żłobka, mm                                                             |
| $l$          | – długość otworu, mm                                                               |
| $L$          | – zależność liniowa w analizie Pareto efektów standaryzowanych                     |
| $n$          | – prędkość obrotowa narzędzia, obr./min                                            |
| $P$          | – natężenie przepływu objętościowego powietrza, l/min                              |
| $Q$          | – zależność kwadratowa w analizie Pareto efektów standaryzowanych                  |
| $Ra$         | – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej, $\mu m$ |
| $R_m$        | – wytrzymałość na rozciąganie, MPa                                                 |
| $R_{p0,2}$   | – umowna granica plastyczności, MPa                                                |

|             |                                                                                                   |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Rz$        | – największa wysokość profilu chropowatości, $\mu\text{m}$                                        |
| $Rz_{1max}$ | – największa wysokość chropowatości, $\mu\text{m}$                                                |
| $Sa$        | – średnia arytmetyczna wysokość powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}$                   |
| $Sku$       | – współczynnik nachylenia powierzchni o ograniczonej skali, –                                     |
| $Ssk$       | – współczynnik asymetrii powierzchni o ograniczonej skali, –                                      |
| $Sq$        | – średnia kwadratowa wysokości powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}$                    |
| $Sz$        | – największa wysokość powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}$                             |
| $t$         | – czas skrawania, s                                                                               |
| $VB$        | – średnia szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia, mm                                  |
| $VB_{max}$  | – maksymalna szerokość pasma zużycia na powierzchni przyłożenia, mm                               |
| $v_c$       | – prędkość skrawania, m/min                                                                       |
| $Vmc$       | – objętość materiału rdzenia powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$      |
| $Vmp$       | – objętość materiału wierzchołków powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ |
| $Vvc$       | – objętość pustek rdzenia powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$         |
| $Vvv$       | – objętość pustek wgłębień powierzchni o ograniczonej skali, $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$        |
| $\theta$    | – kąt zwilżania, $^\circ$                                                                         |

### Ważniejsze skróty

|           |                                                                              |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------|
| 2D        | – układ dwuwymiarowy                                                         |
| 3D        | – układ trójwymiarowy                                                        |
| EDS       | – <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> – spektroskopia dyspersyjna energii  |
| EIS       | – <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i> – spektroskopia impedancyjna |
| $E_{kor}$ | – potencjał korozyjny                                                        |
| MQL       | – <i>Minimum Quantity Lubrication</i> – zminimalizowane smarowanie           |
| SBF       | – <i>Simulated Body Fluid</i> – symulowany płyn fizjologiczny                |
| SEM       | – <i>Scanning Electron Microscope</i> – skaningowa mikroskopia elektronowa   |
| SGP       | – struktura geometryczna powierzchni                                         |
| WW        | – warstwa wierzchnia                                                         |

## WSTĘP

Zainteresowanie naukowców ekologicznymi metodami chłodzenia podczas obróbki skrawaniem, zwłaszcza przy wierceniu i frezowaniu, znacząco wzrasta z uwagi na rosnące potrzeby związane z ochroną środowiska, efektywnością energetyczną oraz ograniczeniem generowania odpadów i emisji substancji szkodliwych [1]. Wprowadzenie ekologicznych metod chłodzenia ma na celu zmniejszenie negatywnego wpływu obróbki skrawaniem na środowisko, jednocześnie zachowując jakość i wydajność procesu. Zainteresowanie ekologicznymi metodami chłodzenia w obróbce skrawaniem wynika również z dążenia do zrównoważonego rozwoju przemysłu, redukcji negatywnego wpływu na środowisko naturalne oraz ochronny zdrowia operatorów obrabiarek [2].

Do ekologicznych metod chłodzenia zalicza się metodę zminimalizowanego smarowania MQL (ang. – Minimum Quantity Lubrication). Metoda MQL polega na dostarczaniu bardzo małej ilości cieczy chłodząco-smarującej w postaci aerozolu bezpośrednio do strefy skrawania. To pozwala na zmniejszenie zużycia ilości płynu obróbkowego i generowanie mniejszej ilości odpadów płynnych. Dlatego MQL jest stosunkowo bardziej przyjazne dla środowiska w porównaniu do tradycyjnych metod chłodzenia jak obróbka na mokro. W metodzie zminimalizowanego smarowania wykorzystuje się tylko od 10 do 500 ml/h wydatku cieczy chłodząco-smarującej [3].

Metoda MQL została wprowadzona na rynek i zyskała na popularności w latach 90. XX wieku. Pierwsze badania nad tą metodą sięgają jednak nieco wcześniejszych lat. Za jedno z kluczowych osiągnięć w rozwoju metody MQL uważa się prace przeprowadzone w laboratoriach niemieckich uczelni i ośrodków badawczych. Pionierską pracą był projekt realizowany przez Instytut Technologii Produkcji (WZL) Uniwersytetu w Aachen (Niemcy) w latach 80. i wczesnych 90. Prace te doprowadziły do opracowania i demonstracji metody MQL na przykładzie właśnie obróbki skrawaniem. Prace naukowe związane z poznaniem zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących w strefie skrawania [4, 5] doprowadziły do możliwości zastosowania jej w wielu branżach przemysłowych: motoryzacyjnej, lotniczej, medycznej oraz wielu innych gałęziach produkcji [6].

Metoda zminimalizowanego smarowania dzięki swoim zaletom znajduje coraz większe zastosowanie do obróbki różnych materiałów konstrukcyjnych, nawet tych trudnoskrawalnych [7]. Do takich materiałów można zaliczyć również stopy aluminium, których trudności wynikają ze względu na specyficzne właściwości tego materiału.

Aluminium ma tendencję do tworzenia zagnieć i zaczopowań na ostrzach narzędzi skrawających, co może prowadzić do szybszego zużycia narzędzi i pogorszenia jakości obrabianego elementu, natomiast wióry mogą być kruche i tworzyć się w formie długich taśm, co może wpłynąć na proces obróbki. Warto jednak w dalszym ciągu pogłębiać wiedzę na temat obróbki stopów aluminium, ponieważ znajdują one coraz szersze zastosowanie, w szczególności w przemyśle motoryzacyjnym. np. (w głowicach cylindrów, blokach cylindrów i kołach itp.) ze względu na ich wysokie właściwości mechaniczne, dobrą odporność na korozję, doskonałą zdolność odlewania i lekkość [8, 9]. W ciągu ostatniej dekady stopy odlewnicze Al-Si są coraz częściej stosowane jako odpowiednia alternatywa dla żeliwa w produkcji komponentów silnika [10].

Bardzo ważnym zagadnieniem jest wówczas poznanie wszystkich zjawisk zachodzących w strefie skrawania podczas wiercenia przy zastosowaniu metody zminimalizowanego smarowania, w szczególności przy większych prędkościach obrotowych. Przemysł dąży zawsze do zwiększenia wydajności i efektywności procesu, stąd w dalszym ciągu następuje zwiększenie parametrów skrawania. Należy wówczas pamiętać o znaczeniu dwóch głównych parametrów tworzenia aerozolu dostarczanego do strefy styku materiał obrabiany–narzędzie–wiór, czyli natężenia przepływu powietrza oraz cieczy chłodząco-smarującej. W związku z tym, że proces odbywa się w strefie zamkniętej a aerosol podawany jest przez kanały wewnątrz wiertła, ważnym narzędziem do pogłębiania wiedzy stają się badania symulacyjne.

Badania symulacyjne oparte na zastosowaniu metody obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) mogą być wykorzystane do optymalizacji procesu wiercenia przy użyciu metody MQL. Badania CFD pozwalają na modelowanie i analizę rozkładu cieczy chłodząco-smarującej w obszarze strefy skrawania podczas wiercenia. To pozwala zrozumieć, jak aerosol rozmieszcza się wokół krawędzi skrawających narzędzia i obrabianego materiału, co ma wpływ na zmniejszenie tarcia, temperatury, narzędzia oraz zwiększenie dokładności i jakości powierzchni obrobionej. Badania symulacyjne mogą pomóc również w analizie strumieni powietrza i cieczy chłodząco-smarującej wokół narzędzia oraz ich oddziaływania z wiórami i powierzchnią obrabianego materiału. To pozwala zidentyfikować obszary, w których koncentruje się chłodziwo oraz ocenić wydajność procesu MQL w chłodzeniu i smarowaniu.

Analiza literatury wykazała znaczenie stosowania metody MQL podczas wiercenia, jednak nie stwierdzono badań symulacyjnych rozpatrujących warunki tworzenia aerozolu,

w szczególności przy zastosowaniu większych prędkości obrotowych. Dlatego Autor niniejszej rozprawy doktorskiej podjął próbę przeprowadzenia badań symulacyjnych z uwzględnieniem parametrów tworzenia aerozolu i powiązania ich z badaniami doświadczalnymi takimi jak: drgania i zużycie narzędzia, topografia powierzchni obrobionej, dokładność wymiarowa otworu.





# 1. ANALIZA LITERATUROWA

## 1.1. Ciecze chłodząco-smarujące stosowane podczas wiercenia

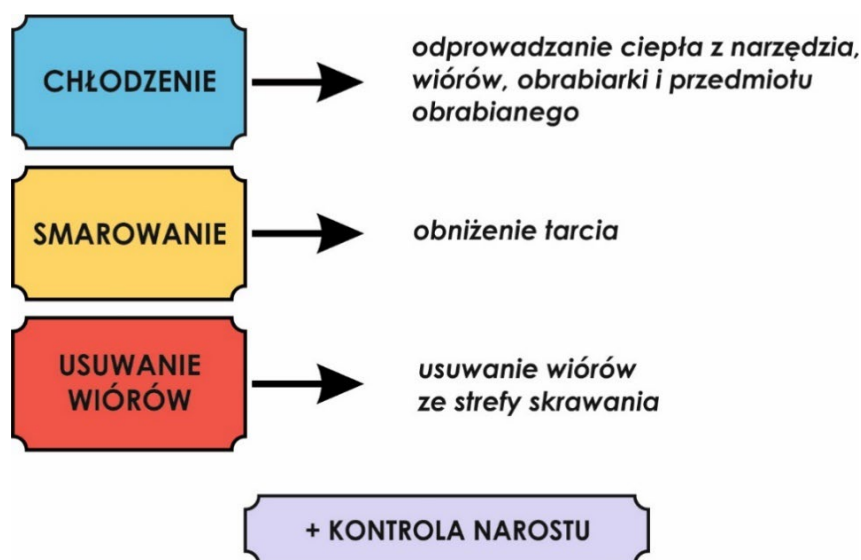
Podczas wiercenia występują zjawiska mechaniczne i cieplne w strefie skrawania, które wpływają na jakość powierzchni obrabianej [11]. Ponad połowa ilości energii, która jest wtedy wykorzystywana, odpowiada za usunięcie materiału, przy czym jej część ulega zamianie w ciepło [12]. Skutecznym sposobem zmniejszania temperatury w strefie skrawania poprzez odprowadzanie generowanego ciepła jest dostarczanie płynów obróbkowych [13]. Ma to szczególne znaczenie podczas wiercenia, w trakcie którego powstające długie wióry mogą gromadzić się w rowkach narzędzia, a to z kolei przyczynia się do zwiększenia temperatury skrawania i w konsekwencji może prowadzić do uszkodzenia otworu [14]. Stosowanie cieczy chłodząco-smarujących jest więc aspektem odgrywającym kluczową rolę w kwestii efektywności procesów wiercenia [15].

### 1.1.1. Podstawowe zadania stawiane cieczom chłodząco-smarującym

Ciecze chłodząco-smarujące muszą spełniać kilka podstawowych zadań, aby mogły być z sukcesem stosowane podczas obróbki skrawaniem (rys. 1.1). Oprócz podstawowych zadań jakimi są odprowadzanie ciepła, transport wiórów ze strefy skrawania oraz zwiększanie trwałość narzędzia, ciecze chłodząco-smarujące spełniają wiele innych funkcji [16–19]. Wśród licznych wymagań stawianym płynom obróbkowym w literaturze wyróżnia się [7, 10–15]:

- szybką penetrację strefy skrawania;
- skuteczną zwilżalność obrabianej powierzchni;
- zmniejszenie tarcia i zachodzącego zużycia w jego wyniku;
- wysoka temperatura wrzenia oraz niska temperatura krzepnięcia;
- możliwość tworzenia filmu smarującego;
- utrzymania wymaganej jakości i dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu obrabianego;
- brak toksycznego działania;
- ochronę przed korozją, obejmującą zarówno obrabiarkę jak i przedmiot obrabiany;
- zapobieganie powstawaniu narostu;
- skład charakteryzujący się dobrą stabilnością;

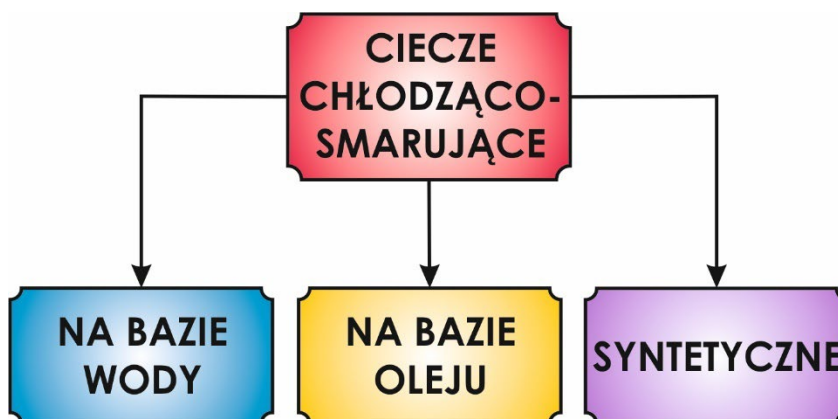
- brak zdolności do tworzenia osadów lub piany;
- łatwą utylizacją.



Rys. 1.1. Podstawowe zadania cieczy chłodząco-smarującym – opracowanie własne na podstawie [25]

### 1.1.2. Podział i charakterystyka cieczy chłodząco-smarujących

Podstawowy podział cieczy chłodząco-smarujących przedstawiono na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Podział cieczy chłodząco-smarujących – opracowanie własne na podstawie [26]

Chłodziwa na bazie wody zawierające oleje rozpuszczalne, sole oraz cieczy na bazie oleju mineralnego stanowią większość spośród cieczy chłodząco-smarujących dostępnych na rynku. Oleje mineralne cechują się zawartością m.in. chloru czy siarki i są w stanie skutecznie zmniejszać tarcie podczas obróbki w warunkach mniejszych prędkości skrawania. Niestety zakres ich stosowania jest ograniczony ze względu na ryzyko

wystąpienia dymu i ognia, dlatego też mogą pracować jedynie w mniejszych temperaturach panujących w strefie styku ostrze skrawające-materiał obrabiany-wiór [7, 17].

Z kolei ciecze na bazie wody mogą być z powodzeniem stosowane w zakresie większych temperaturach skrawania, a więc i przy większych prędkościach skrawania, a ich skład jest zbliżony do chłodziw na bazie oleju – występują jednak w postaci emulsji. Płyny takie są również tańsze i pełnią głównie funkcję chłodzenia strefy skrawania [26]. Ich receptury są określone z wysoką dokładnością, dzięki czemu stanowią płyny o dobrej stabilności i mniejszej zdolności do pienienia się. Płyny obróbkowe na bazie wody występują zwykle w postaci koncentratów olejów, które należy przed użyciem wymieszać z wodą uzyskując stężenie wynoszące najczęściej od 3 do 12% [16, 18].

Trzeci rodzaj płynów obróbkowych stanowią syntetyczne chłodziwa, które występują w postaci nieorganicznych, wodorozcieńczalnych koncentratów. Często w swoim składzie posiadają również biocydy, dodatki przeciwpieniące, inhibitory korozji czy środki powierzchniowo-czynne. Syntetyczne ciecze obróbkowe charakteryzują się wieloma zaletami, takimi jak [17, 19]:

- brak ryzyka wystąpienia dymu;
- łatwość filtracji za pomocą standardowych filtrów;
- ekonomiczność;
- większa stabilność chemiczna w porównaniu do olejów mineralnych;
- odporność na jełczenie;
- brak toksycznego działania;
- szybkość w odprowadzaniu ciepła.

Niestety nie sprawdzają się podczas obróbki materiałów trudnoskrawalnych, ponieważ nie zapewniają wtedy odpowiedniego smarowania. Ponadto wykazują również zdolność do pozostawiania osadów na powierzchni oraz do reagowania z materiałami niemetalicznymi. Jednak ich utylizacja zachodzi łatwiej niż w przypadku olejów emulgujących, dlatego też stanowią bardzo popularną alternatywę [26].

### **1.1.3. Ciecze chłodząco-smarujące na bazie oleju mieszalne z wodą**

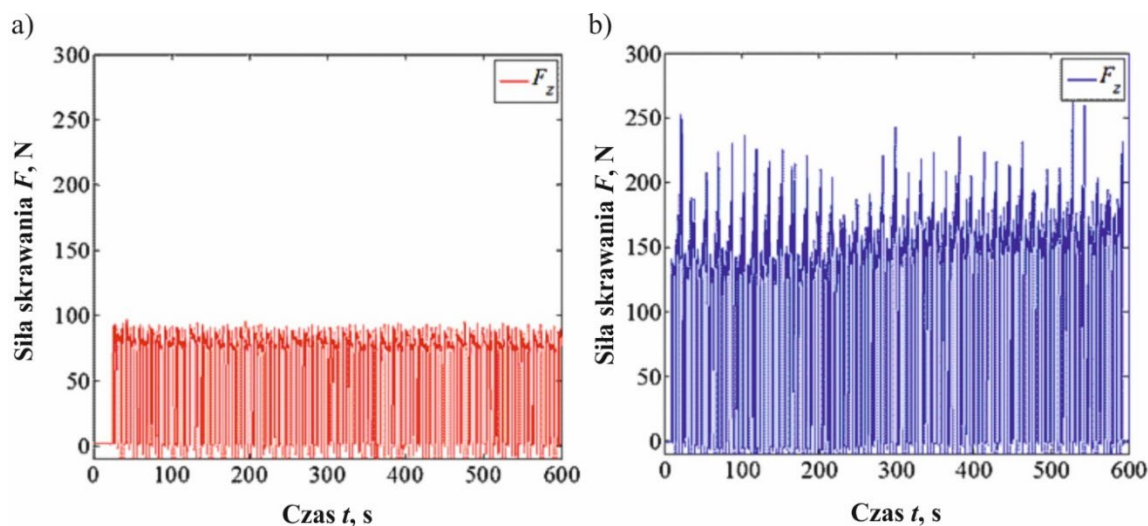
Cechą charakterystyczną cieczy chłodząco-smarujących mieszalnych z wodą jest to, iż jej zawartość wynosi zwykle od 90 do 95%. Pozostałą część stanowią dodatki oraz olej, które albo uległy rozpuszczeniu w wodzie, albo występują w postaci emulsji [29]. Główną funkcją wody w takim płynie obróbkowym jest odprowadzanie ciepła, które zachodzi

nawet 3-krotnie szybciej w porównaniu do oleju, którego głównym zadaniem jest z kolei smarowanie strefy kontaktu między narzędziem a materiałem obrabianym [30]. Ciecz chłodząco-smarująca w takiej postaci zawierać może nawet 60 składników, spośród których wyróżnić można m.in. emulgatory (aminoalkohole lub alkohole tłuszczowe), inhibitory pienienia oraz korozji (kwasy tłuszczowe, borany bądź aminy) oraz biocydy [31]. Ze względu na swój skład, ciecze chłodząco-smarujące mieszalne z wodą są narażone na rozwój mikroorganizmów, gdyż obecne w nich związki chemiczne mogą pełnić funkcję składników odżywczych [29]. Skażenie płynu obróbkowego grzybami bądź bakteriami powoduje nie tylko zmianę jego barwy oraz występowanie nieprzyjemnego zapachu, ale również przyczynia się do pogorszenia jakości powierzchni obrobionej i trwałości narzędzi. Ponadto, ma to również negatywny wpływ na zdrowie operatorów. W związku z tym należy zadbać o konserwację takiego płynu obróbkowego, aby zwiększyć jego trwałość i jednocześnie uniknąć dodatkowych kosztów [31].

Cambiella i in. [30] udowodnili w trakcie badań, iż zmieszanie chłodziwa zawierającego 3% syntetycznej poliolefiny i estru trioleinianu trimetylopropanu z emulgatorami niejonowymi, kationowymi i anionowymi pozwala na zwiększenie działania smarującego w obszarze ekstremalnych ciśnień, gdzie następuje zatarcie powierzchni w porównaniu do cieczy chłodząco-smarującej bez ww. dodatków podczas testów tribologicznych na aparacie czterokulkowym. Dodatkowo Autorzy dzięki zastosowaniu anionowego emulgatora (eteru olejowego etoksylanu kwasu glikolowego) uzyskali poprawę nośności filmu olejowego.

Yang i in. [32] podczas eksperymentu porównywali działanie cieczy chłodząco-smarującej zawierającego ester samoemulgujący, a także dodatki w postaci: regulatora PH, inhibitorów korozji, dodatków bakteriobójczych i przeciwpiennych. Jej stężenie po rozpuszczeniu w wodzie wynosiło 5%. Dla porównania, podczas wiercenia stopu TC4 w warunkach obróbki na mokro, zastosowano również 5%-owe stężenie standardowego chłodziwa stosowanego powszechnie do obróbki stopów tytanu. Autorzy przeanalizowali otrzymane wartości siły osiowej  $F_z$  (rys. 1.3) wykazując, iż dla sporządzonego przez nich płynu obróbkowego jej maksymalna wartość wynosiła 100 N, natomiast dla tradycyjnego chłodziwa – 250 N. W drugim przypadku zaobserwowano także występowanie dużych skoków wartości  $F_z$ . Ze względu na fakt, iż na siłę skrawania podczas wiercenia wpływa tarcie między narzędziem a materiałem obrabianym, uznano, iż opracowany przez naukowców płyn obróbkowy wykazywał zwiększone własności smarowe. Ponadto, liczba wywierconych otworów przy jej zastosowaniu wynosiła 123, podczas gdy przy użyciu

komercyjnego płynu obróbkowego wiertło uległo złamaniu już po wykonaniu 37 otworów. Wskazuje to więc na pozytywny wpływ opracowanej cieczy chłodząco-smarującej na trwałość narzędzia, dzięki któremu wzrosła ona trzykrotnie. Autorzy podkreślają, iż na zredukowane zużycie wiertła miała również wpływ utworzona warstwa filmu smarującego, dzięki której adhezja wiórów na powierzchnię narzędzia zachodziła w mniejszym stopniu.



Rys. 1.3. Siła osiowa  $F_z$  podczas wiercenia stopu TC4: a) w warunkach chłodzenia zmodyfikowaną cieczą chłodząco-smarującą, b) w warunkach chłodzenia tradycyjną cieczą chłodząco-smarującą – opracowanie własne na podstawie [32]

#### 1.1.4. Ciecze chłodząco-smarujące na bazie oleju niemieszalne z wodą

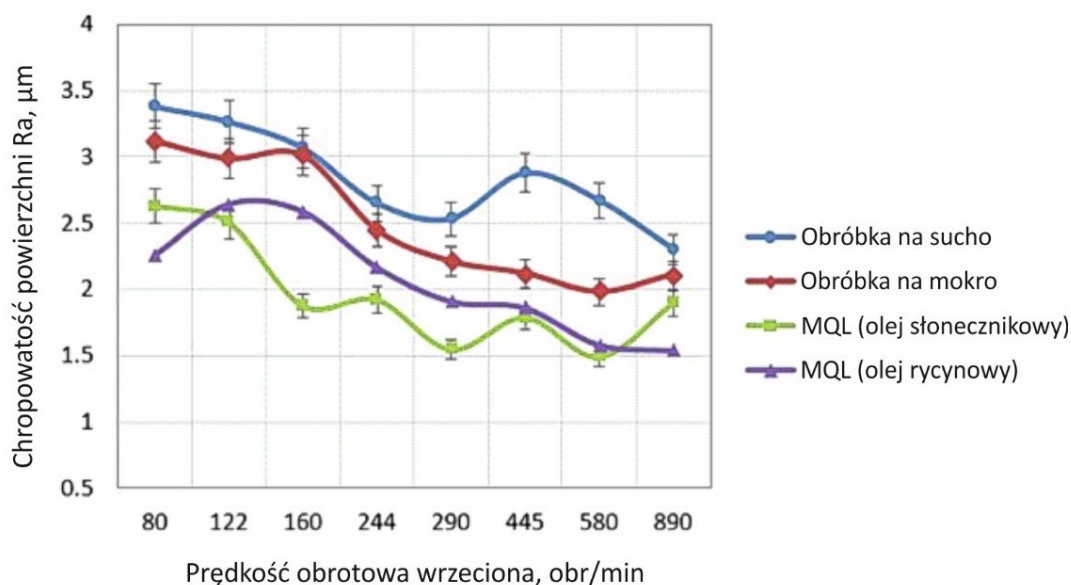
Ciecze chłodząco-smarujące niemieszalne z wodą zawierają 100% oleju wraz z niepolarnymi dodatkami [20, 24]. Ich bazę stanowią najczęściej oleje węglowodorowe. Są szeroko stosowane i występują w postaci parafin o prostym łańcuchu węglowym, ale mogą również być to produkty syntetyczne, jak np. poliizobuteliny czy polialfaolefiny, które zapewniają wzrost wydajności zarówno w zakresie mniejszych jak i większych wartości temperatur. W przypadku, gdy kładzie się nacisk na wykorzystanie zasobów odnawialnych, oleje węglowodorowe zastępuje się estrami pochodzenia zwierzęcego oraz roślinnego. Zwykle, tak jak w przypadku estrów syntetycznych, cechują się one większymi wartościami temperatury zapłonu, a także posiadają dobre własności smarowe [34].

Niezaprzeczalną wadą płynów obróbkowych niemieszalnych z wodą jest to, iż nie posiadają one właściwości chłodzących w takim zakresie, w jakim występują one w chłodziwach rozpuszczonych w wodzie. W zależności od potrzeb, skuteczność działania takich cieczy chłodząco-smarujących można poprawić poprzez zastosowanie

odpowiednich dodatków, dobieranych pod kątem materiału obrabianego. W przypadku stali często stosuje się związki chloru, fosforu czy siarki, przy czym ta ostatnia sprawdza się szczególnie dobrze przy większych temperaturach skrawania. Z kolei do stopów miedzi i aluminium stosuje się często produkty oleochemiczne, takie jak np. naturalne tłuszcze i oleje, alkohole i kwasy tłuszczowe, a także estry syntetyczne. Zaletą cieczy niemieszalnych z wodą jest to, iż w porównaniu z chłodziwami mieszanymi z wodą, są one łatwe w utrzymaniu. Nie trzeba kontrolować stabilności emulsji oraz jej stężenia, eliminowane są również problemy związane z obecnością mikroorganizmów i zachodzeniem korozji [34].

Khunt i in. [35] wykorzystali olej słonecznikowy i rycynowy podczas wiercenia stopu aluminium 6063 w warunkach zminimalizowanego smarowania. W trakcie badań wykorzystano obróbkę na mokro i obróbkę na sucho. Autorzy udowodnili skuteczność aerozolu olejowego bazującego na oleju roślinnym w zmniejszeniu wartości momentu skręcającego oraz siły osiowej przy większych prędkościach skrawania w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia. Za taki rezultat odpowiadały poprawione własności smarowe i chłodzące medium czynnego. Największe wartości wspomnianych parametrów zaobserwowano dla obróbki na sucho. Analizie poddano również strukturę geometryczną powierzchni obrobionej (rys. 1.4). Najmniejszymi wartościami parametru  $Ra$  cechowały się powierzchnie poddane wierceniu w warunkach zminimalizowanego smarowania, gdyż aerozol olejowy na bazie olejów roślinnych umożliwiła łatwe odprowadzanie wiórów ze strefy skrawania oraz skutecznie zmniejszył współczynnik tarcia. Z kolei wiercenie bez obecności cieczy chłodząco-smarującej skutkowało uzyskaniem największych wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionej.

Mawandiya i in. [36] również wykorzystali dwa płyny obróbkowe w metodzie MQL w postaci aerozolu olejowego, na bazie: oleju rycynowego oraz oleju słonecznikowego z dodatkiem  $MoS_2$ . Dla porównania przeprowadzono również obróbkę na sucho, a jako materiał obrabiany wykorzystano stal AISI 4340. Autorzy przeanalizowali chropowatość powierzchni obrobionej, wskazując, iż najmniejsze wartości parametru  $Ra$  otrzymano w wyniku chłodzenia mgłą olejową wzbogaconą o dwusiarczek molibdenu. Większe wartości parametrów chropowatości powierzchni obrobionej uzyskano przy obróbce na sucho. W przypadku trwałości narzędzia oraz ilości zużytej energii zastosowanie medium czynnego w obu przypadkach również skutkowało lepszymi rezultatami niż przy obróbce na sucho.



Rys. 1.4. Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości  $R_a$  powierzchni obrobionej po wierceniu w warunkach obróbki na sucho oraz na mokro i przy zastosowaniu metody MQL z udziałem olejów roślinnych – opracowanie własne na podstawie [35]

#### 1.1.5. Roztwory wodne

Ciecze chłodząco-smarujące w postaci roztworów wodnych charakteryzuje brak emulgatora w ich składzie. Wzbogacane są jednak o dodatki polarne substancji hydrofilowych, a także m.in. dodatki zmiękczające, myjące czy też inhibitory korozji [25]. Zakres ich stosowania obejmuje głównie obróbkę wiórową oraz szlifowanie. Proporcje wody oraz koncentratu w roztworach wodnych sięgają od 20:1 do nawet 50:1 [37].

Tego rodzaju chłodziwa są przezroczyste, a zamiast zawartości oleju, mogą posiadać micelle surfaktantów. Ich zaletą są bardzo dobre właściwości chłodzące, jednak ze względu na obecność środków powierzchniowo-czynnych mogą wykazywać skłonność do pienienia się [34]. Dotyczy to np. roztworu mydła, który stosuje się głównie podczas procesów szlifowania i który posiada skuteczne działanie płuczące, jak i czyszczące [38]. Stosowanie dodatków przeciwpiannych może rozwiązać ten problem pod warunkiem, iż dobierze się je prawidłowo – zastosowanie silikonowych dodatków może wpływać negatywnie na przyczepność różnego rodzaju powłok. Kolejną negatywną cechą roztworów wodnych jest zdolność do emulgowania olejów, która powoduje ich zmętnienie [25, 29]. Po kontakcie ze smarami obecnymi w urządzeniach, takie płyny obróbkowe mogą się przyczyniać do ich wypłukiwania, a w konsekwencji – do szybszego zużycia części tych maszyn [34].

Heinemann i in. [39] udowodnili skuteczne działanie roztworu wodnego zawierającego 40% syntetycznego płynu obróbkowego w porównaniu do cieczy chłodząco-smarujących zawierających: ester syntetyczny i dodatki oraz ester syntetyczny, dodatki i alkohol. W trakcie eksperymentu przeprowadzono wiercenie głębokich otworów w stali węglowej AISI 1045 przy zastosowaniu zminimalizowanego smarowania, na podstawie którego wykazano, iż liczba wykonanych otworów przy chłodzeniu roztworem wodnym wyniosła 1177, co wskazywało na poprawę trwałości narzędzia o 100% w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia. Autorzy tłumaczą, iż przyczyną efektywnego działania płynu obróbkowego z większą zawartością wody są bardzo dobre właściwości chłodzące oraz mniejsza lepkość, zapewniająca skuteczną penetrację strefy skrawania.

Xuedong i in. [40] przeprowadzili testy tribologiczne, stosując roztwory wodne zawierające: dialkiloditiofosforan molibdenu, dietyloamid kwasu laurynowego i jego odpowiednik w postaci związku kwasu borowego. Jako parę trącą wykorzystano próbki ze stopu tytanu i spiekanego węgla wolframu. W efekcie zaobserwowano, iż o ile pierwszy z wymienionych dodatków nie wykazywał żadnego działania smarującego, tak w przypadku pozostałych dwóch – podczas procesów tarcia stwierdzono powstawanie tlenków tytanu, które poprawiły właściwości przeciwzużyciowe badanych roztworów wodnych.

## **1.2. Dodatki wprowadzane do cieczy chłodząco-smarujących**

Ciecze chłodząco-smarujące zwykle stanowią połączenie płynu bazowego w postaci np. olejów bądź estrów syntetycznych oraz dodatków, które mają za zadanie poprawiać jego własności. Zawartość tych dodatków różni się w zależności od m.in. przeznaczenia chłodziwa i rodzaju dodatku, ale średnio wynosi ok. 7% [41]. Zwykle dodatki wprowadzane do cieczy chłodząco-smarujących posiadają działanie o charakterze chemicznym.

Badania naukowców wykazują również, że zwiększenie właściwości smarowych poszczególnych cieczy chłodząco-smarujących uzyskuje się poprzez zastosowanie dodatków przeciwzatarciowych, przeciwzużyciowych oraz coraz bardziej popularnych nanocząstek itp.

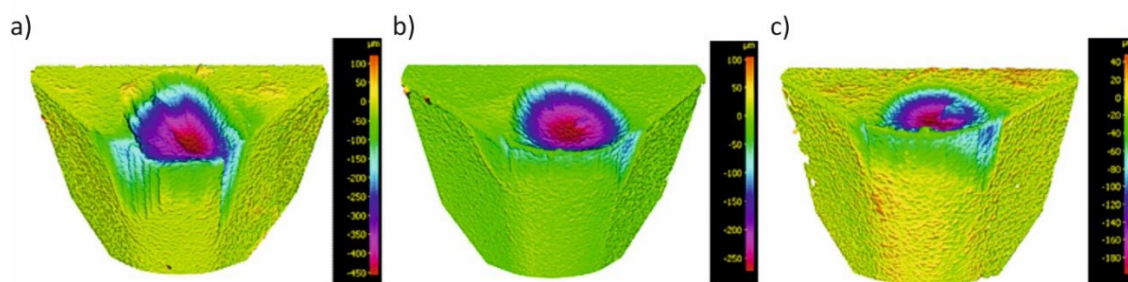


### 1.2.1. Dodatki przeciwzatarciowe EP

Ze względu na ciężkie warunki obróbki wymagana jest poprawa wydajności chłodziw, emulsje lub oleje wzbogaca się dodatkami EP (ang. extreme pressure) [42–44]. Wykazują one bowiem działanie przeciwzatarciowe, pomagają w zmniejszeniu temperatury skrawania i występują w postaci związków fosforu i siarki, polisiarczków czy też związków chloru [15, 16, 18, 36–38]. Większe temperatury występujące w strefie styku ostrze skrawające-materiał obrabiany-wiór, powodują reakcję tych dodatków z powierzchnią obrabianą w wyniku czego uzyskuje się siarczki, chlorki bądź fosforki, które silnie przywierają do powierzchni obrabianej tworząc film smarowy oddzielający powierzchnie trące [6]. Dodatki ww. przyczyniają się również do łatwiejszego odrywania powstających wiórów, które zachodzi w wyniku rozluźnienia powierzchniowego. To z kolei prowadzi do zmniejszenia mocy oraz siły skrawania i przyczynia się do zwiększenia trwałości narzędzia [47]. Zastosowanie dodatków EP w połączeniu z dodatkami AW podczas skrawania z zastosowaniem metody MQCL umożliwia uzyskanie warstewki tribofilmu zawierającego wapń i fosfor, dzięki której tarcie w strefie skrawania oraz temperatura zostają zredukowane, a chropowatość powierzchni zmniejszona [36, 40].

Maruda i in. [42] udowodnili, że film smarowy powstały w strefie skrawania na bazie estru fosforanowego w warunkach chłodzenia mgłą emulsyjną zmniejsza jego zużycie (rys. 1.5) o 25% w porównaniu do metody MQCL bez dodatków o około 27%-34% dla większych prędkości skrawania ( $v_c > 350$  m/min) podczas toczenia stali węglowej C45. Dla mniejszych prędkości skrawania ( $v_c = 200$  m/min) różnice pomiędzy badanymi metodami chłodzenia nie przekraczała różnicy 12%. Największe zużycie dla wszystkich rozpatrywanych prędkości skrawania zaobserwowano dla obróbki na sucho. Dodatki EP wprowadzane do medium czynnego w metodzie zminimalizowanego chłodzenia i smarowania przyczyniają się również do zmniejszenia zużycia zachodzącego w wyniku zjawiska dyfuzji oraz adhezji [49].

W innej pracy naukowej Marudy i in. [50] wprowadzone dodatki EP do mgły emulsyjnej w połączeniu z dodatkami przeciwzużyciowymi pozwoliły na zmniejszenie współczynnika tarcia na powierzchni natarcia narzędzia, jak również uzyskania korzystnego kształtu wióra ułatwiającego jego odprowadzanie ze strefy skrawania.

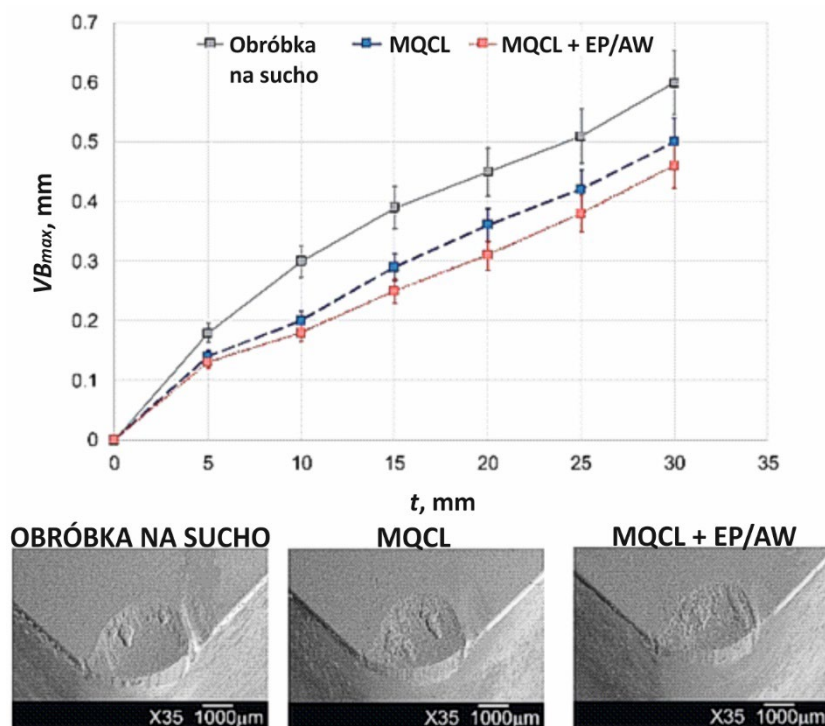


Rys. 1.5. Topografia ostrza skrawającego po toczeniu stali AISI 1045 w warunkach:  
a) obróbki na sucho, b) metody MQCL, c) metody MQCL+EP/AW – opracowanie  
własne na podstawie [42]

### 1.2.2. Dodatki przeciwzużyciowe AW

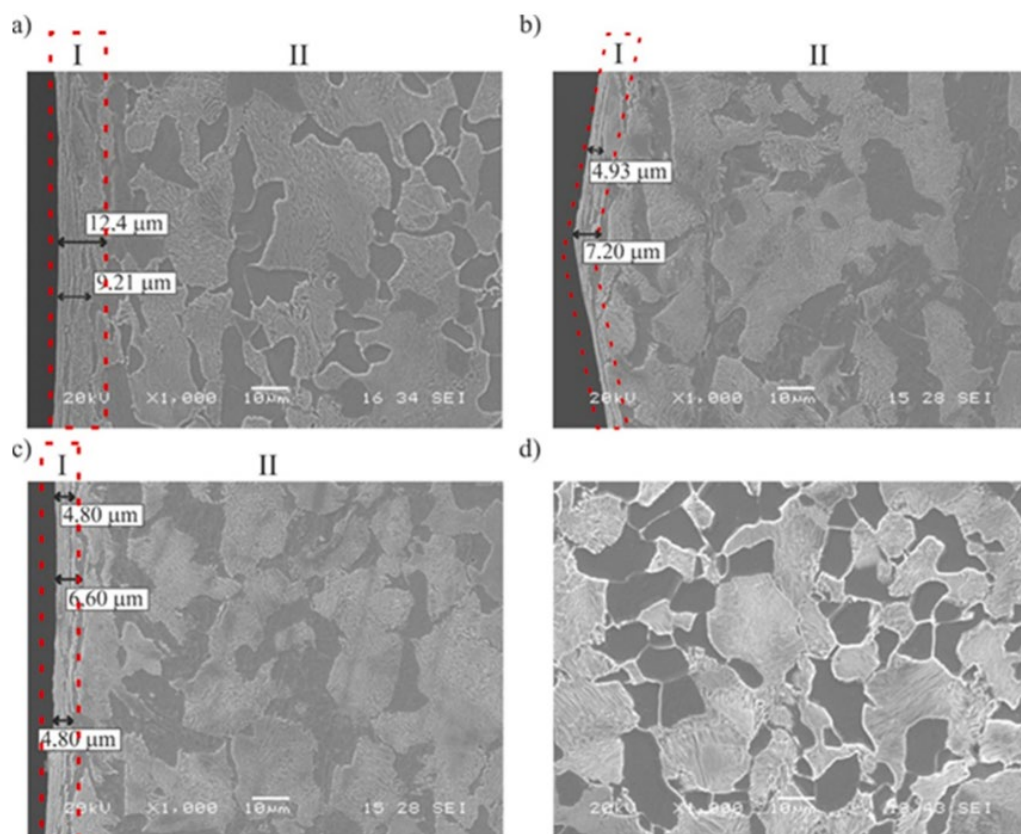
Dodatki przeciwzużyciowe AW (ang. anti-wear) stosowane są w celu poprawienia wydajności płynów obróbkowych [25]. Są one stosowane m.in. w olejach estrowych podczas wiercenia głębokich otworów [51]. Podobnie jak w przypadku dodatków przeciwzatarciowych, mają one za zadanie zapobiegać powstawaniu dużych ilości ciepła i zmniejszać tarcie występujące między narzędziem a materiałem obrabianym, prowadząc tym samym do ochrony ich powierzchni na skutek poprawy własności smarowych cieczy chłodząco-smarującej i utworzenia ochronnej warstewki filmu smarowego [16, 39, 40, 44, 45]. Ich działanie polega na wiązaniu bądź przyłączeniu się polarnych cząsteczek do metalowych powierzchni i zachodzi w temperaturze do 250°C [41]. Warto zauważyć, iż dodatki przeciwzużyciowe oraz przeciwzatarciowe są często stosowane razem w płynach obróbkowych o czym świadczą badania naukowców [33, 36, 46, 47]. Spośród różnych rodzajów dodatków AW, do najbardziej popularnych zalicza się kwasy dikarboksyłowe oraz dialkyloditiofosforany cynku, ale mogą to być również np. alkoksylowane estry kwasu fosforowego [16, 18]. Właściwości przeciwzużyciowe posiadają również estry boranowe, które ponadto charakteryzują się przyjemnym zapachem oraz mniejszą toksycznością, dzięki czemu uznaje się je za ekologiczny rodzaj dodatków [56]. Maruda i in. [57] wykorzystali dodatki AW oraz EP na bazie estru fosforanowego w mgle emulsyjnej. Autorzy zaobserwowali, iż taki skład medium czynnego umożliwił powstanie warstwy tribofilmu w strefie styku narzędzia z wiórem, który odpowiadał za zmniejszenie wartości współczynnika tarcia na powierzchni natarcia. W porównaniu z medium czynnym stosowanym w metodzie MQCL bez dodatków oraz obróbką na sucho zauważono również zmniejszenie chropowatości powierzchni – wartości

parametru  $Sa$  zostały bowiem zmniejszone o około 6–35% oraz 8–38% dla prędkości skrawania  $v_c = 150$  m/min, posuwu  $f = 0,1$  mm/obr oraz głębokości skrawania  $a_p = 0,5$  mm. Zastosowanie metody MQCL w połączeniu z dodatkami przeciwzużyciowymi i przeciwzatarciowymi spowodowało zmniejszenie wskaźnika zużycia  $VB_{max}$  o 23% w porównaniu z obróbką na sucho oraz o 8% w porównaniu z metodą MQCL (rys. 1.6).



Rys. 1.6. Wielkość maksymalnej szerokości pasma zużycia na powierzchni przyłożenia oraz topografia narzędzia w zależności od metody chłodzenia – opracowanie własne na podstawie [57]

W innych badaniach, Maruda i in. [58] udowodnili korzystne efekty zastosowania dodatków AW na jakość powierzchni obrobionej. Autorzy w wyniku obróbki w warunkach chłodzenia metodą MQCL+EP/AW zaobserwowali zmniejszenie wartości parametrów  $Sa$  i  $Sz$  o wartość 29% w zestawieniu z metodą MQCL bez dodatków, natomiast w porównaniu do obróbki na sucho ich wartości zmniejszyły się od 12% do 70%. Naukowcy przeanalizowali również wpływ metody chłodzenia na głębokość strefy umocnienia (rys. 1.7), wskazując, iż jej zwiększenie jest ściśle powiązane z uplastycznieniem materiału obrobionego na skutek działania wysokich temperatur podczas obróbki. Zastosowanie chłodzenia metodą MQCL z dodatkami przeciwzużyciowymi i przeciwzatarciowymi umożliwiło zmniejszenie strefy zgniotu o 60% w zestawieniu z obróbką na sucho oraz o 21% w porównaniu do metody MQCL.



Rys. 1.7. Głębokość strefy umocnienia (I) w zależności od metody chłodzenia [58]:

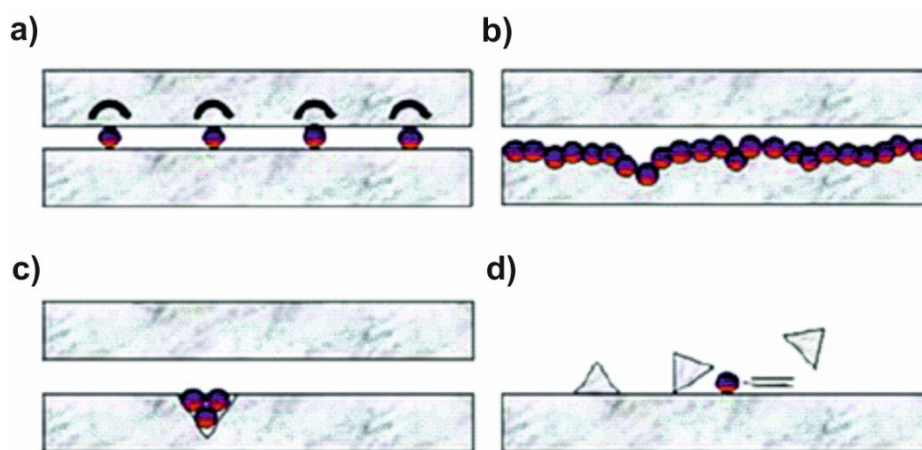
a) obróbka na sucho, b) metoda MQCL, c) metoda MQCL+EP/AW, d) rdzeń

### 1.2.3. Nanocząsteczki

W celu zwiększenia właściwości smarowych cieczy chłodząco-smarujących naukowcy rozpoczęli prace mające na celu wprowadzania do ich składu nanocząsteczek. Badania wskazują, iż otrzymane w ten sposób nanociecze posiadają większe możliwości w zakresie zmniejszenia tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami i odprowadzania ciepła w porównaniu do klasycznych cieczy chłodząco-smarujących [59]. Do najczęściej wykorzystywanych do poprawy właściwości płynów obróbkowych zaliczyć można nanocząsteczki m.in.: nanorurek węglowych [52, 53], dwusiarczku molibdenu [62–64], diamentu [57, 58], grafenu [51, 59], grafitu [68–70], miedzi [67] tlenków tytanu [63, 64] oraz tlenków glinu [73–75].

Działanie nanocząsteczek bazuje na czterech podstawowych mechanizmach. Pierwszy z nich opiera się na kulistym kształcie nanocząsteczek (rys. 1.8a). Gdy znajdują się one między dwiema powierzchniami, ich kształt pozwala na to, że zaczynają się toczyć. W efekcie początkowo panujące tarcie ślizgowe ulega zamianie na kombinację zarówno

tarcia tocznego, jak i ślizgowego. W drugim przypadku (rys. 1.8b) nanocząsteczki wykazują wzajemne oddziaływanie z parami trącymi, co prowadzi do utworzenia ochronnego filmu na powierzchni. Trzeci mechanizm działania nanocząsteczek (rys. 1.8c) znajdujących się w strefie kontaktu polega na utworzeniu warstwy, która kompensuje powstające straty materiału. Z kolei czwarty sposób, w jaki nanocząsteczki funkcjonują w strefie skrawania opiera się na ich działaniu ściernym (rys. 1.8d), dzięki któremu chropowatość powierzchni trących ulega zmniejszeniu [76].



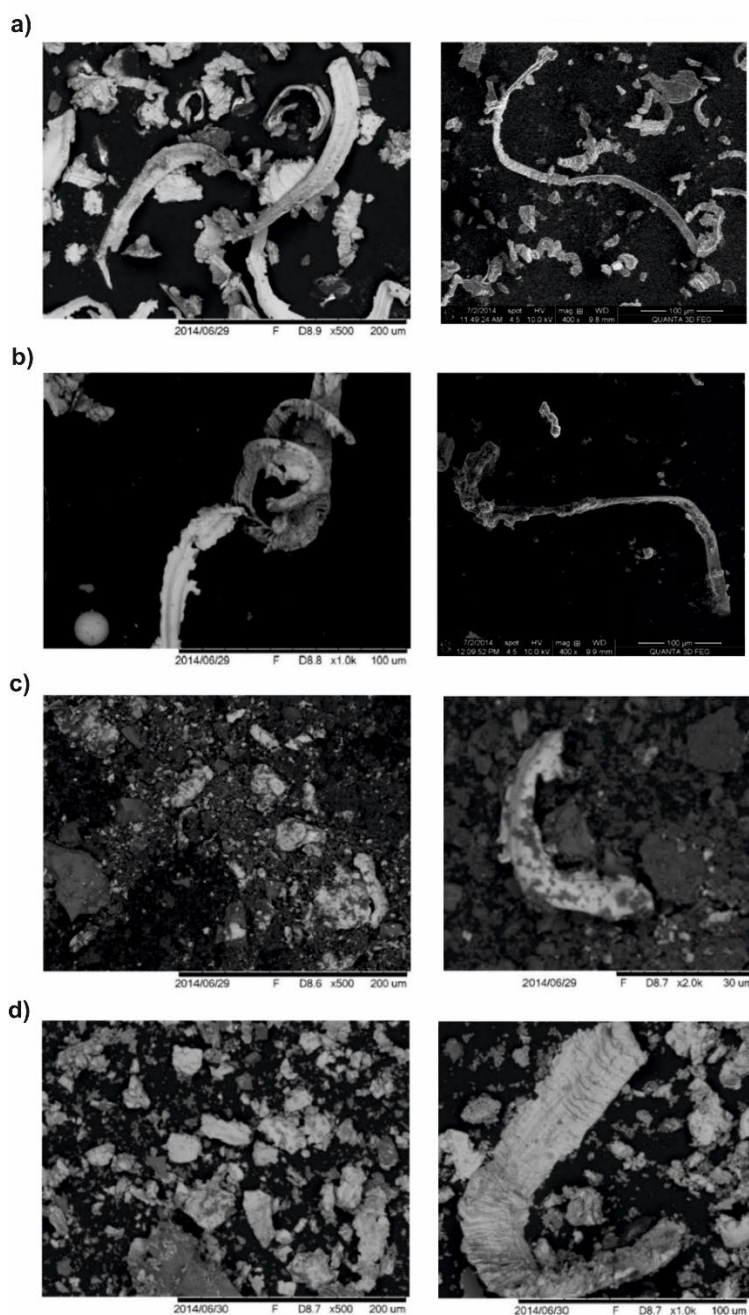
*Rys. 1.8. Mechanizmy funkcjonowania nanocząsteczek w strefie skrawania:*

- a) generowanie tarcia tocznego, b) warstewka ochronna,  
c) wypełnianie ubytków w materiale, d) działanie ściernie  
opracowanie własne na podstawie [76]*

Badania wskazują, iż dodanie nanocząsteczek miedzi do metody MQL podczas wiercenia stali AISI 4140 pozwala na uzyskanie mniejszego zużycia narzędzia, a ponadto wpływa pozytywnie na jakość powierzchni obrobionej w porównaniu do standardowej mgły olejowej [67]. Nanocząsteczki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dodane do płynu obróbkowego umożliwiają uzyskanie krótkich wiórów, łatwych do odprowadzenia (rys. 1.9) oraz redukują współczynnik tarcia [74] w trakcie szlifowania. W wyżej wymienionej pracy Setti i in. [77] wskazują, iż jest to związane z utworzeniem przez nanociecz warstwy tribofilmu na obrabianej powierzchni. Woda zawarta w badanym medium czynnym reaguje z nanocząsteczkami tworząc wodorotlenek, który powoduje odrywanie cząstek materiału obrabianego oraz tlenków glinu. Wysokie ciśnienie, jakim charakteryzuje się w tym przypadku metoda zminimalizowanego smarowania również wpływa pozytywnie na odprowadzanie zanieczyszczeń ze strefy skrawania. Nanociecz z kolei zapobiega



osadzaniu się ich na ściernicy. Autorzy wskazują, iż łącznie te trzy czynniki odpowiadają za skuteczniejsze wypłukiwanie wiórów podczas szlifowania.

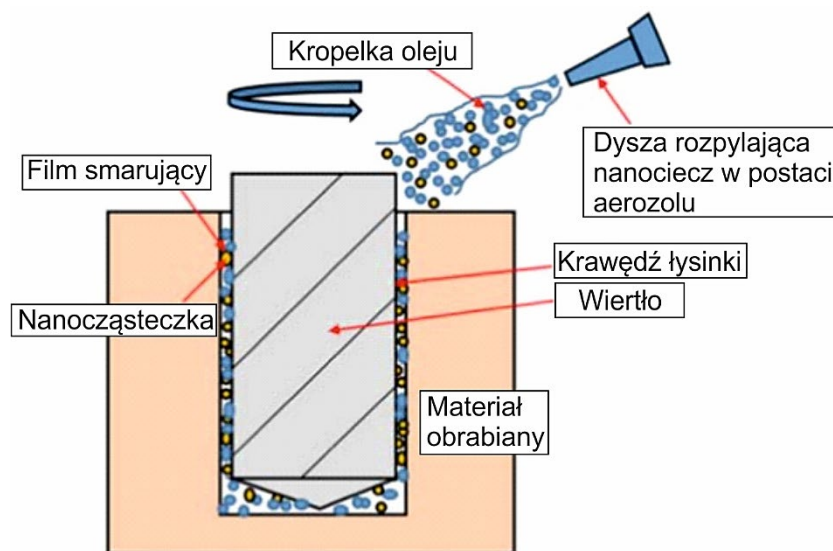


Rys. 1.9. Wióry powstałe podczas szlifowania stopu Ti-6Al-4V w warunkach:  
a) obróbki na sucho, b) obróbki na mokro, c) chłodzenia aerozolem olejowym zawierającym nanocząsteczki  $Al_2O_3$ , d) chłodzenia aerozolem olejowym zawierającym nanocząsteczki CuO [74]

Kalita i in. [78] swoimi badaniami udowodnili, iż nanociecze mogą być z powodzeniem stosowane podczas obróbki żeliwa sferoidalnego. W przeprowadzonym przez nich eksperymencie jako płyn obróbkowy wykorzystano nanociecze na bazie oleju

parafinowego, do których dodano nanocząsteczki  $\text{MoS}_2$  wzbogacone o fosfolipidy i trójglicerydy. Ich stężenie wynosiło 2% i 8%. Oprócz tego zastosowano metodę zalewową, chłodzenie aerozolem olejowym bez nanocząsteczek, a także z dodatkiem 8% mikrocząsteczek  $\text{MoS}_2$ . W rezultacie, przy zastosowaniu nanocieczy o stężeniu równym 8% zaobserwowano zmniejszenie energii właściwej o 53% w porównaniu z obróbką na mokro i o 44% w porównaniu z metodą MQL opierającą się na wykorzystaniu samego oleju parafinowego. Odpowiadać za to może zdolność nanocieczy do penetracji strefy kontaktu między materiałem obrabianym a ściernicą. W efekcie aerozol olejowy z dodatkiem nanocząsteczek może skutecznie smarować krawędzie ziaren ściernych, co z kolei zmniejsza straty powiązane z występowaniem tarcia ślizgowego. Ponadto Autorzy wskazują, iż nanociecze poprawiają trwałość ściernicy o 48-55% w porównaniu do metody zalewowej oraz mgły olejowej bez żadnych dodatków, za co odpowiadać mogą warstewki tribofilmu powstające dzięki zastosowaniu metody MQL wzbogaconej o nanocząsteczki.

Khanafer i in. [79] sprawdzili działanie nanocieczy podczas wiercenia stopu Inconel 718. Mechanizm funkcjonowania mgły olejowej zawierającej 4% nanocząsteczek  $\text{Al}_2\text{O}_3$  przedstawiono na rys. 1.10.



Rys. 1.10. Mechanizm działania nanocieczy w strefie skrawania podczas wiercenia – opracowanie własne na podstawie [79]

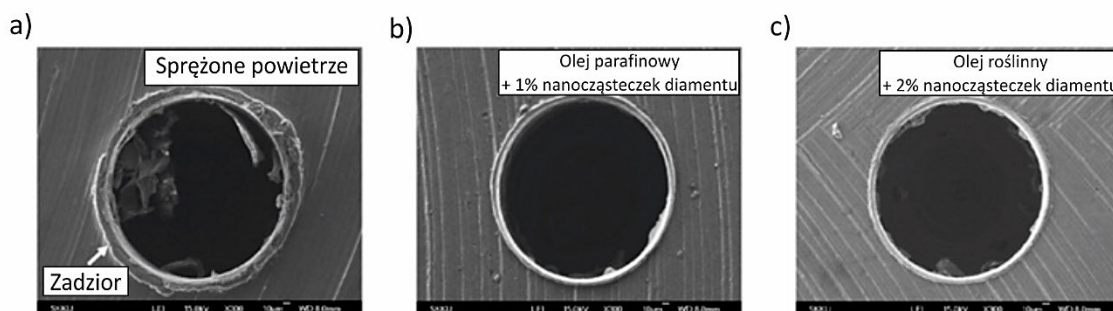
Dla porównania eksperyment przeprowadzono również w warunkach obróbki na mokro oraz mgły olejowej bez dodatków. Otrzymane wyniki wskazują na zmniejszenie siły osiowej po zastosowaniu nanocieczy w zestawieniu z pozostałymi metodami chłodzenia.

Również zużycie narzędzia zostało w tym przypadku zmniejszone. Naukowcy podkreślają, iż zastosowanie nanocząsteczek  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w mgłę olejowej powoduje zwiększoną penetrację strefy skrawania przez medium czynne, dzięki czemu zachodzi efekt łożyska kulkowego, który prowadzi do zaobserwowanej zmniejszonej siły osiowej oraz do obniżenia tarcia. Kolejnym pozytywnym efektem działania nanocieczy jest poprawa jakości wywierconych otworów. Autorzy zaobserwowali, iż powstawanie zadziorów zostało zredukowane, a sama dokładność otworów, związana z błędami okrągłości i wysokością wspomnianych zadziorów, uległa poprawie. Naukowcy wskazują, iż odpowiada za to poprawa własności tribologiczno-smarnych medium czynnego w wyniku zastosowania dodatku w postaci nanocząsteczek  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

W pracy Mosleh i in. [15] przeprowadzono badania ekstremalnych ciśnień (EP) cieczy chłodząco-smarujących modyfikowanych nanocząstkami diamentu i dwusiarczku molibdenu ( $\text{MoS}_2$ ), jako możliwego wyznacznika zachowania się tych cieczy podczas stosowania w konwencjonalnym wierceniu. Badania EP wykazały, że nanociecze zawierające 2–4% nanocząstek  $\text{MoS}_2$  zwiększają nośność do 16% przy jednoczesnym znacznym ograniczeniu przenoszenia materiału z bardziej miękkich kulek ze stali nierdzewnej na twardsze kulki z węgla wolframu. Z kolei nanociecze zawierające do 1% nanocząstek diamentu zmniejszyły nośność o 10%. Podczas testów dotyczących wiercenia stali AISI 4340 nanociecz  $\text{MoS}_2$  wykazała o 25% dłuższą żywotność wiertła oraz stabilniejszą oraz mniejszą siłę skrawania i moment obrotowy. Ponadto, w przypadku wiertel z nanocieczą zawierającą nanocząstki  $\text{MoS}_2$ , narost na ostrzu skrawającym był łatwo usuwany ze strefy skrawania. Wprowadzenie nanocząstek diamentu w płynie bazowym nie wpłynęła natomiast na poprawę wyżej wymienionych wskaźników skrawalności w testach wiercenia.

Skuteczność zastosowania nanocząsteczek diamentu w płynach obróbkowych potwierdzają natomiast badania przeprowadzone podczas wiercenia stopu aluminium 6061 [65]. W zestawieniu ze sprężonym powietrzem, nanociecz doprowadzana do strefy skrawania w postaci mgły olejowej zwiększa liczbę wywierconych otworów z 87 do 150, a ponadto umożliwia zmniejszenie wartości siły osiowej oraz momentu obrotowego. Jakość uzyskanych otworów także uległa poprawie (rys. 1.11) – zadziory dookoła zostały znacznie zredukowane, a liczba wiórów wewnątrz zmalała na skutek poprawionego działania smarującego medium czynnego, powodującego mniejsze przywieranie wióra do narzędzia i w rezultacie jego łatwiejsze odprowadzanie ze strefy skrawania.



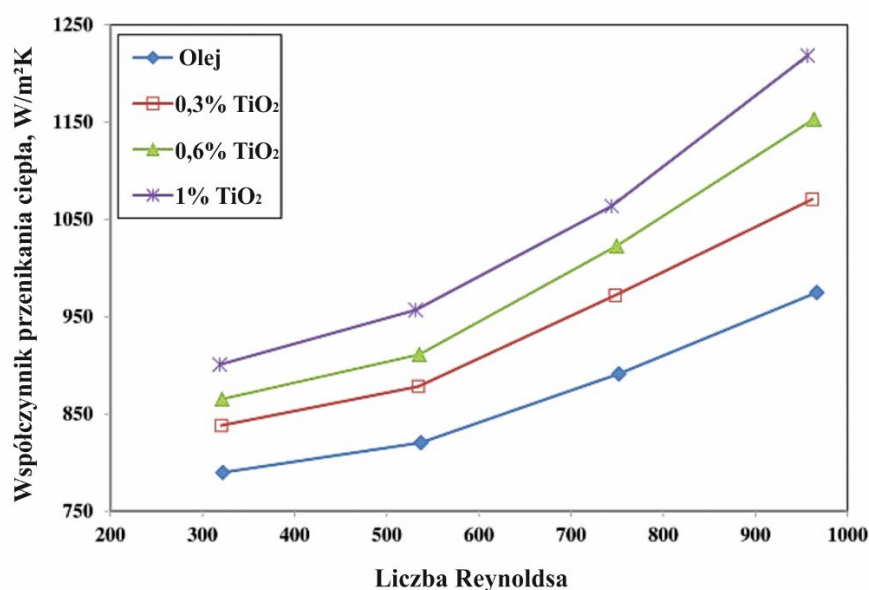


*Rys. 1.11. Obrazy SEM wywierconych otworów: a) przy chłodzeniu sprężonym powietrzem, b) przy chłodzeniu mgłą olejową na bazie oleju parafinowego z zawartością 1% nanocząstek diamentu, c) przy chłodzeniu mgłą olejową na bazie oleju roślinnego z zawartością 2% nanocząstek – opracowanie własne na podstawie [65]*

Nam i Lee [80] również wykorzystali nanocząstki diamentu podczas wiercenia stopu Ti-6Al-4V. Naukowcy zestawili działanie takiej mgły olejowej z tradycyjną metodą MQL oraz z chłodzeniem sprężonym powietrzem. W trakcie eksperymentu udowodniono, iż zastosowanie nanocząsteczek o wielkości 35 nm przy stężeniu równym 0,4% w warunkach posuwu wynoszącego 10 mm/min umożliwia uzyskanie mniejszych wartości siły osiowej oraz momentu obrotowego. Nie bez znaczenia pozostaje w tym przypadku kulisty kształt nanocząsteczek – dzięki niemu bowiem mogły one skutecznie docierać do strefy kontaktu narzędzia z materiałem obrabianym. W efekcie zachodził efekt łożyska kulkowego skutkujący obniżeniem tarcia w strefie skrawania, a zużycie wiertła zostało zmniejszone. Co więcej, nasilenie wspomnianego efektu przyczyniło się do poprawy smarowania, przez co adhezja wiórów do powierzchni narzędzia oraz powstawanie zadziórów zostały również zredukowane.

Rosnan i in. [81] wskazują, iż przy wierceniu stopu NiTi zastosowanie nanocząsteczek  $Al_2O_3$  w mgłę olejową pozwala na poprawę przewodności cieplnej medium czynnego oraz zwiększenie współczynnika przenikania ciepła. W efekcie zaobserwowano pozytywny wpływ nanocieczy na chropowatość powierzchni. Autorzy wskazują również na zmniejszenie siły osiowej wynikające z zastosowanej metody chłodzenia. Taki efekt uzasadniają zdolnością cząsteczek  $Al_2O_3$  do utworzenia warstewki tribofilu między materiałem obrabianym a narzędziem, a także zamianą tarcia ślizgowego w połączenie tarcia tocznego ze ślizgowym. Ponadto, nanociecz umożliwiła zmniejszenie zużycia wiertła, jednak takie jej działanie jest ograniczone do skrawania w zakresie prędkości wynoszących od 10 m/min do 20 m/min. Kolejny eksperyment obejmujący zastosowanie

nanocząsteczek tlenku aluminium w metodzie MQL w trakcie wiercenia stali nierdzewnej AISI 321 potwierdza skuteczność mgły olejowej wzbogaconej takim dodatkiem [82]. W zestawieniu z obróbką na mokro, wykorzystanie nanocieczy przy zminimalizowanym smarowaniu zapewniło zmniejszenie momentu obrotowego oraz siły osiowej, a także temperatury wiertła i chropowatości powierzchni o kolejno: 67%, 44%, 26% i 56%. Również zużycie ostrza uległo redukcji ze względu na właściwości smarujące nanocząsteczek, które doprowadziły do poprawy właściwości chłodzących medium czynnego. Z kolei badania przeprowadzone przez Salimi-Yasar i in. [83] świadczą o skutecznym zastosowaniu nanocząsteczek  $\text{TiO}_2$  podczas wiercenia stali. Zaobserwowano, iż w porównaniu do zwykłego chłodziwa i obróbki na sucho, nanociecz zapewnia mniejszą temperaturę skrawania. Nanocząsteczki w tym przypadku wykazują zdolność do zwiększenia współczynnika przenikania ciepła płynu bazowego (rys. 1.12), który rośnie wraz ze wzrostem stężenia  $\text{TiO}_2$ .



Rys. 1.12. Wartości współczynnika przenikania ciepła dla oleju bazowego oraz nanociecz w zależności od stężenia nanocząstek  $\text{TiO}_2$  – opracowanie własne na podstawie [83]

#### 1.2.4. Dodatki zmieniające właściwości chemiczne

Dokonując klasyfikacji dodatków stosowanych w cieczach chłodząco-smarujących na podstawie ich funkcji, wyróżnia się również takie, które modyfikują chemiczne właściwości środków smarowych [71, 72]. Można je podzielić na trzy podstawowe grupy [84]:

- inhibitory utleniania, których zadaniem jest opóźnianie oraz zmniejszanie utleniania płynu bazowego,
- detergentowe składniki aktywne, których główną funkcją jest zapobieganie powstawaniu osadów w warunkach wysokich temperatur,
- dyspergujące składniki aktywne, które odpowiadają za eliminowanie osadzania szlamu w niskich temperaturach.

#### **1.2.5. Dodatki zmieniające właściwości fizyczne cieczy chłodząco-smarujących**

Ostatnim rodzajem dodatków, którymi wzbogaca się cieczy chłodząco-smarujące, są dodatki wpływające na ich właściwości fizyczne [85]. Podobnie, jak w przypadku dodatków oddziałujących na właściwości chemiczne chłodziw, tutaj również można wyróżnić trzy podstawowe grupy [84]:

- dodatki obniżające temperaturę krzepnięcia, do których zalicza się np. polimetakrylan alkilu,
- ulepszacze wskaźnika lepkości, których zadaniem jest poprawa zachowania lepkości pod wpływem temperatury (jako tego rodzaju dodatek stosuje się np. polimetakrylan metylu),
- środki przeciwpieniące, które wpływają na napięcie powierzchniowe (należy do nich np. polidimetylosiloksan).

### **1.3. Metody doprowadzania cieczy chłodząco-smarujących do strefy skrawania podczas wiercenia**

Jednym ze zjawisk, zachodzących podczas wiercenia w sposób utrudniony w porównaniu do innych sposobów obróbki skrawaniem np. toczenia i frezowania jest odprowadzanie wióra i ciepła. Wynika to m.in. z konstrukcji wykorzystywanych wiertel podczas obróbki. Dlatego bardzo ważnym zagadnieniem jest sposób dostarczania cieczy chłodząco-smarujących, które umożliwiają poprawę nie tylko trwałości narzędzia, ale również jakości powierzchni obrobionej, co powoduje zmniejszenie kosztów obróbki [86]. Podczas wiercenia na sucho należy liczyć się z konsekwencjami wynikającymi z utrudnionego odprowadzania wiórów oraz zasłoniętej strefy skrawania. Następuje wtedy wzrost temperatury skrawania, gdyż ciepło jest oddawane do narzędzia przez powstające podczas obróbki wióry. W efekcie wiertło narażone jest na zjawisko adhezji i powstawanie

nalepień na jego powierzchniach. Dodatkowo zapchaniu mogą ulec rowki wiórowe, a tym samym przestrzeń wiórowa narzędzia. Ostatecznie wiertło może zostać zniszczone [87]. Zastosowanie płynów obróbkowych jest więc w tym przypadku uzasadnione. Z tego względu ważne jest, aby dobrać optymalny sposób, w jaki będą one doprowadzane do strefy skrawania, uwzględniający nie tylko parametry obróbki oraz jej rodzaj, ale również geometrię narzędzia i materiał, z którego zostało wykonane, konstrukcję obrabiarki, właściwości płynów obróbkowych oraz ich skład [86]. W przypadku skrawania materiałów łatwo obrabialnych przy wysokich prędkościach (toczenie, frezowanie, wiercenie) możliwe jest stosowanie cieczy chłodząco-smarujących charakteryzujących się głównie właściwościami chłodzącymi (emulsje bądź roztwory wodne), tak dla bardziej wymagających operacji (m.in. rozwiercanie, gwintowanie) i trudniejszych w obróbce materiałów ważniejsze stają się właściwości smarowe, występujące w chłodziwach olejowych. Również sposób podawania cieczy chłodząco-smarujących może się różnić w zależności od cech obróbki [88]. Nieprawidłowy dobór metody chłodzenia wiąże się z licznymi konsekwencjami, do których zaliczyć można: powstawanie oparów, zmniejszoną trwałość narzędzi i cieczy chłodząco-smarującej, rozkład jej składników pod wpływem temperatury oraz przegrzanie (dotyczące szczególnie cieczy olejowych) [86].

### **1.3.1. Chłodzenie zewnętrzne swobodnym strumieniem**

Popularną metodą dostarczania płynów obróbkowych do strefy skrawania podczas wiercenia jest wykorzystanie strumienia spływającego w wyniku działania siły ciężkości. Charakteryzuje się on niewielkim ciśnieniem wynoszącym 0,03-0,1 MPa oraz mniejszą prędkością przepływu [1]. Wydatek cieczy przy zastosowaniu tej metody waha się w granicach od 10 do ponad 200 l/min [3]. Fakt, iż ciecz chłodząco-smarująca przepływa przez strefę skrawania bez przerwy zapewnia łatwiejsze odprowadzanie wiórów [2]. Stosowanie konwencjonalnej metody zalewowej wiąże się jednak z częściowym brakiem kontroli nad tym, który obszar strefy skrawania będzie penetrowany przez płyn obróbkowy. Transportowana ciecz chłodząco-smarująca zalewa bowiem często zewnętrzną stronę wióra, natomiast obszary, w których występują największe temperatury (powierzchnia natarcia, strefa blisko głównej krawędzi skrawającej), zostają przez nią pominięte. Powstające podczas obróbki wysokie temperatury przyczyniają się do parowania chłodziwa, a tworząca się para blokuje możliwość efektywnego chłodzenia obszaru wokół krawędzi skrawającej [2].

### **1.3.2. Chłodzenie pod ciśnieniem przez kanały wewnątrz narzędzia**

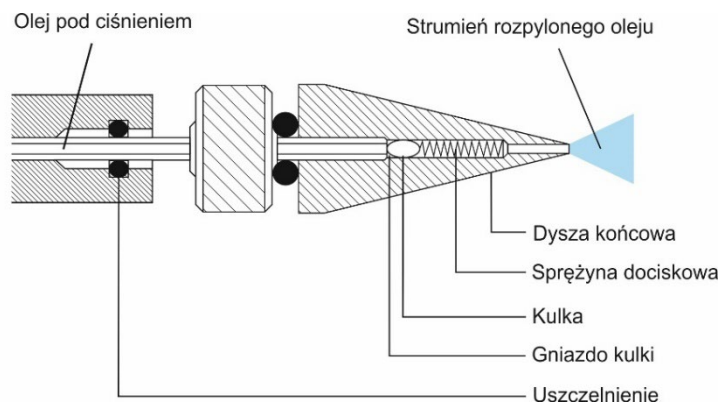
Dostarczanie płynów obróbkowych pod ciśnieniem sięgającym nawet 14 MPa znajduje zastosowanie m.in. w przypadku operacji wiercenia głębokich otworów. Metoda ta służy wtedy efektywnemu odprowadzaniu wiórów [88]. Strumień płynu obróbkowego dostarczany jest zarówno w sposób zewnętrzny, poprzez zastosowanie dyszy i skierowanie cieczy na obszar przyłożenia narzędzia, jak również w skutek wykorzystania kanałów znajdujących się wewnątrz nowoczesnych wiertel składanych i jednolitych [1, 4]. Rozwiązaniem stosowanym w celu uniknięcia powstawania mgły i intensywnego rozbryzgiwania płynu obróbkowego jest wykorzystanie dwóch strumieni: swobodnego oraz pod ciśnieniem. Oprócz tego pomocne są również płyty, których zadaniem jest odchyłanie strumienia bądź specjalne osłony przeciwbryzgowe [88].

Dostarczanie płynów pod ciśnieniem jest szczególnie przydatne podczas obróbki w warunkach wysokich prędkości skrawania, w przypadku której zarówno wióry, jak i siły odśrodkowe oddziałują na chłodziwo, odrzucając je i uniemożliwiając skuteczne działanie [88].

### **1.3.3. Metoda zminimalizowanego smarowania**

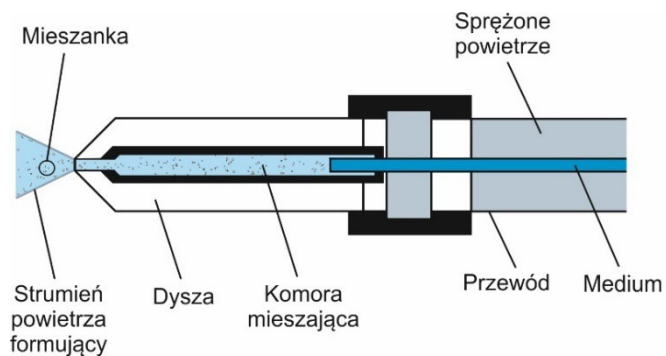
Kolejna metoda chłodzenia opiera się na podawaniu cieczy chłodząco-smarującej w postaci kropeł tworzących aerozol, zwany również potocznie „mgłą” [88]. W tym celu wykorzystuje się strumień sprężonego powietrza, który połączony z płynem obróbkowym, podawany jest do strefy skrawania [22]. Taki rozpylony czynnik chłodzący ulega szybszemu parowaniu w porównaniu do strumienia, dzięki czemu jest w stanie skutecznie odprowadzać ciepło ze strefy skrawania [89]. Dostarczanie medium czynnego odbywa się więc w sposób zewnętrzny poprzez dwa rodzaje dysz (rys. 1.13-1.14).

W pierwszym przypadku (rys. 1.13) olej podaje się w sposób pulsacyjny. Gdy ciśnienie wzrasta, zawór kulkowy ulega otwarciu, a w efekcie dawka oleju transportowana jest do końcówki dyszy, gdzie odbywa się jej rozpylanie. Taka rozpylona ciecz chłodząco-smarująca trafia do strefy skrawania w sposób bezpośredni, nie stosuje się tutaj bowiem dodatkowego strumienia powietrza. W wyniku wykorzystania takiej metody, podczas obróbki nie zachodzi chłodzenie, za którego odpowiedzialny byłby wspomniany strumień. Występuje tu jedynie działanie smarowe zapewniane przez olej, które przyczynia się do zmniejszenia tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami [22].



*Rys. 1.13. Dysza służąca do rozpylania medium czynnego – opracowanie własne na podstawie [22]*

Drugą metodą wytwarzania aerozolu jest zastosowanie podwójnej dyszy (rys. 1.14). Olej jest wtedy dostarczany poprzez dyszę środkową, a jego wymieszanie z powietrzem zachodzi w komorze mieszającej. Dysza zewnętrzna, która ją otacza, służy do doprowadzania sprężonego powietrza. Jego celem jest wytworzenie osłony zapobiegającej rozpylaniu oleju. Strumienie „mgły olejowej”, które powstają w komorach: powietrza i mieszającej, zostają ze sobą wymieszane dopiero kiedy trafiają na powierzchnię narzędzia [22].

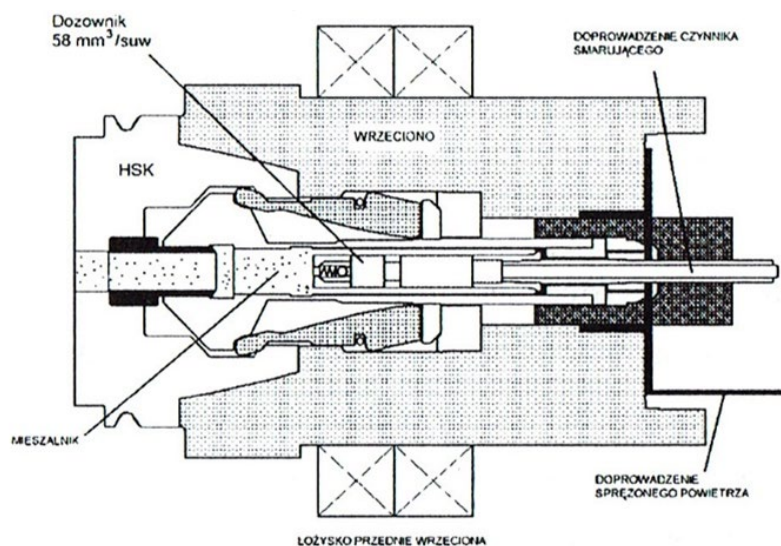


*Rys. 1.14. Podwójna dysza służąca do wytwarzania mgły olejowej [22]*

W metodzie zewnętrznego dostarczania płynu obróbkowego stosować można nie tylko jedną, ale również kilka dysz, w każdym przypadku jednak ich położenie względem narzędzia jest niezwykle ważne. Takie rozwiązanie, opierające się na wykorzystaniu zewnętrznego transportu mgły olejowej, znajduje zastosowanie albo w przypadku narzędzi nieposiadających wewnętrznych kanałów, albo dla obrabiarek, które nie są dostosowane do doprowadzania płynu obróbkowego w sposób wewnętrzny. Zwykle taka sytuacja dotyczy toczenia, frezowania walcowo-czołowego bądź też przecinania. Istnieją jednak warunki, w których można wykorzystać tę metodę w trakcie wiercenia. Warunkiem jest

jednak ograniczenie się do płytkich otworów, spełniających warunek  $l/D < 3$ , gdyż dla dłuższych otworów konieczne byłoby wycofywanie się narzędzia, aby uległo zwilżeniu. Ostatecznie skutkowałoby to spadkiem wydajności obróbki [2, 6].

Dostarczanie płynu obróbkowego metodą zewnętrzną zapewnia powstawanie filmu olejowego. Odprowadzanie wiórów jest wtedy ułatwione, a ponadto zmniejszeniu ulega tarcie zachodzące pomiędzy narzędziem a powierzchnią obrabianą. W efekcie obniżona zostaje temperatura skrawania, a zużywanie narzędzia zachodzi w wolniejszym tempie. Uzyskanie filmu olejowego przy odpowiednim usytuowaniu dyszy tak, aby ciecz chłodząco-smarująca trafiała idealnie na ostrza narzędzi, jest w przypadku wiercenia utrudnione. W takiej sytuacji znajdują zastosowanie wiertła, w których występują specjalne kanały smarujące. Warto zaznaczyć, iż kanałki przeznaczone do transportu czynników smarujących różnią się od kanałów przeznaczonych do dostarczania cieczy chłodząco-smarującej. W tym wypadku bowiem pełnią funkcję dysz – przyspieszają przepływ aerozolu, ale jednocześnie zapewniają spadek ciśnienia. Smarowanie wewnętrzne strefy skrawania wymaga zastosowania specjalnych mieszalników, odpowiedzialnych za powstawanie aerozolu (rys. 1.15). Częsteczki oleju ulegają w tym przypadku zmieszaniu ze sprężonym powietrzem, po czym następuje ich transport przez kanały narzędzia aż do strefy skrawania [22].

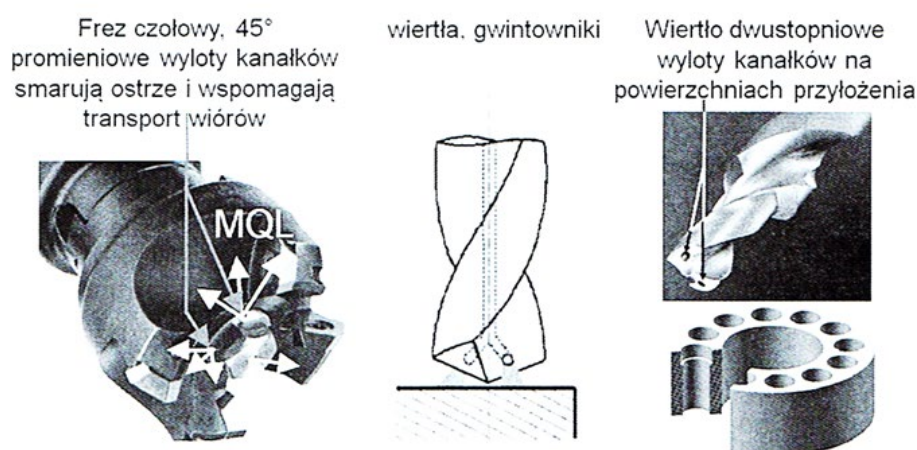


Rys. 1.15. Mieszalnik służący do tworzenia aerozolu olejowego przy wewnętrznym dostarczaniu medium czynnego [22]

Stosowanie wewnętrznego doprowadzania aerozolu olejowego jest szczególnie zalecane w przypadku otworów o większych wartościach  $l/D$  i staje się wręcz konieczne



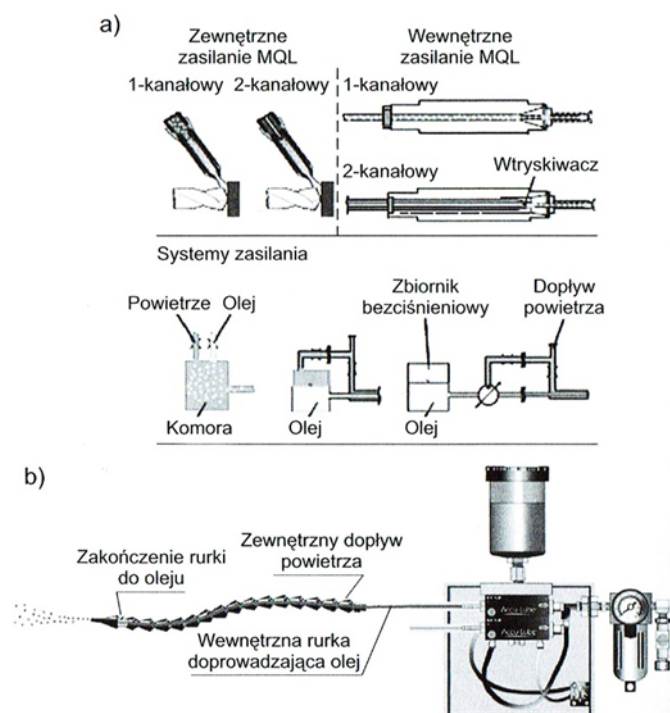
podczas wiercenia głębokich otworów [90]. Co więcej, eliminuje potrzebę określenia optymalnego ustawienia dyszy względem narzędzia, zapewniając tym samym niezmienny transport czynnika smarującego bez względu na położenie narzędzia [87]. Przykładowe dostosowanie konstrukcji narzędzi do zastosowania wewnętrznego transportu medium czynnego przedstawiono na rys. 1.16.



Rys. 1.16. Narzędzia o konstrukcji umożliwiającej wewnętrzne doprowadzanie mgły olejowej [87]

Z kolei metody zewnętrznego i wewnętrznego doprowadzania mgły olejowej do strefy skrawania zestawiono na rys. 1.17. Tak jak przy metodzie zewnętrznego dostarczania czynnika smarującego, również w przypadku techniki wewnętrznej wyróżnia się system 1 i 2-kanałowy (rys. 1.17a). Podczas wykorzystania systemu jednokanałowego tworzenie aerozolu następuje poza wrzecionem, natomiast przez wrzeciono zachodzi jego transport. Następnie trafia do złącza narzędzia oraz kanałów znajdujących się w wiertle, skąd doprowadzany jest do strefy skrawania. Wadą tej metody jest fakt, iż w wyniku działania sił odśrodkowych, na ściance kanału dolotowego dochodzi do osiadania kropeł oleju. W efekcie powstaje film przyścienny. Jeśli prędkość wrzeciona będzie duża, może on negatywnie oddziaływać na skład powstającej mieszaniny. Takie zjawisko określa się mianem „odmieszania” się aerozolu. Pomimo tej wady, system jednokanałowy z powodzeniem stosowany jest w automatycznych liniach obróbkowych, w których narzędzia nie ulegają częstej wymianie.





Rys. 1.17. Metody dostarczania mgły olejowej do strefy skrawania  
(a) oraz system zasilania MQL Accu-Lube (b) [90]

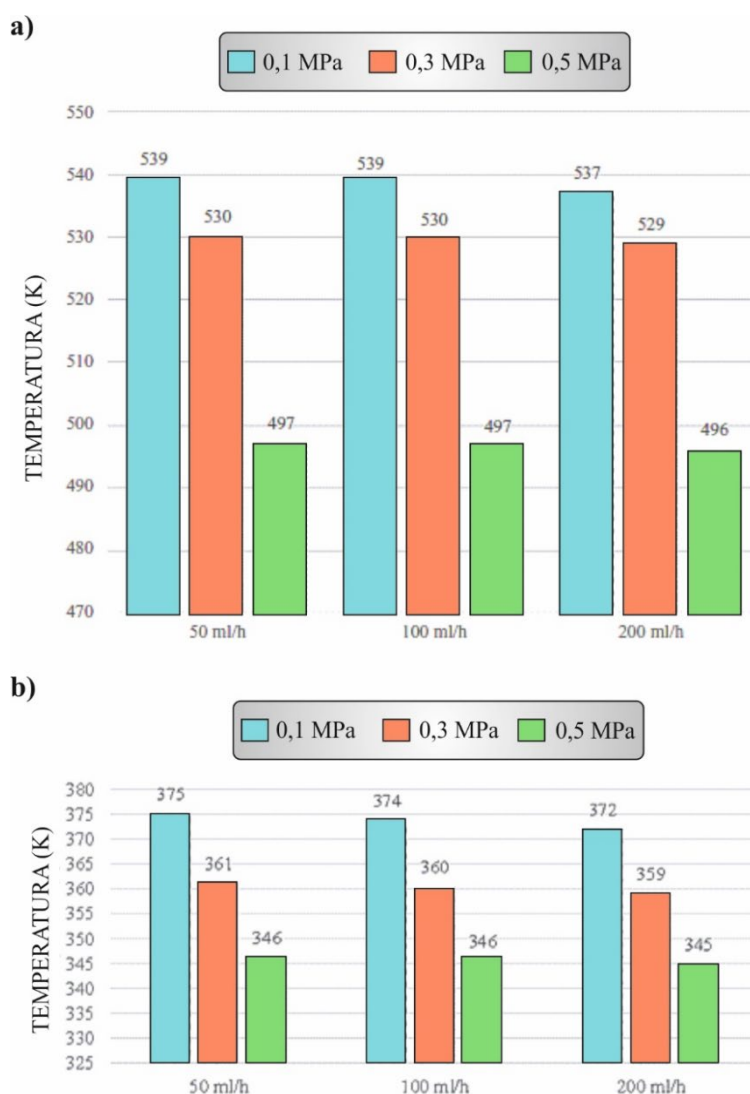
W systemie dwukanałowym (rys. 1.17a) do wytworzenia mgły olejowej dochodzi w komorze znajdującej się przed złączem narzędzia. Dwukanałowy rozdzielacz obrotowy umożliwia niezależny transport oleju i powietrza do komory, a samo dozowanie oleju odbywa się w sposób precyzyjny dzięki zastosowaniu zaworu. Co więcej, możliwe jest dostarczanie jedynie samego powietrza. System dwukanałowy przeznaczony jest głównie do obróbki materiałów trudnoskrawalnych, instaluje się go również zwykle na centrach obróbkowych.

#### 1.3.4. Parametry wejściowe tworzenia medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania

Stosując podczas obróbki metodę zminimalizowanego smarowania trzeba mieć na uwadze wiele czynników wpływających na efektywność i wydajność chłodzenia strefy skrawania. Zalicza się do nich parametry wejściowe tworzenia aerozolu olejowego, spośród których wyróżnia się m.in. natężenie przepływu powietrza oraz oleju, odległość dyszy od strefy obróbki czy rozmieszczenie i średnica kanałów wewnątrz narzędzia, przez które odbywa się transport medium czynnego. Zmiana każdego z ww. parametrów wraz z samą konstrukcją dysz, kanałów w narzędziu ma wpływ na intensywność smarowania

strefy skrawania. W określaniu i doborze zmiennych parametrów tworzenia medium czynnego bardzo ważną rolę odgrywają również badania symulacyjne.

El-Bouri i in. [91] zastosowali model CFD (ang. computational fluid dynamics) czyli numeryczną mechanikę płynów do oceny, m.in. zmiany temperatury na powierzchniach przyłożenia i natarcia ostrza skrawającego podczas toczenia z zastosowaniem metody MQL. Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisko oprogramowania ANSYS Fluent uwzględniając zmienne wartości zarówno natężenia przepływu płynu obróbkowego (50 ml/h, 100 ml/h oraz 200 ml/h), jak ciśnienia powietrza (0,1 MPa, 0,3 MPa oraz 0,5 MPa). Autorzy wskazali, iż zmiana natężenia przepływu płynu obróbkowego nie wpływa na temperaturę na rozpatrywanych powierzchniach narzędzia (rys. 1.18).



Rys. 1.18. Wpływ wartości ciśnienia powietrza i przepływu medium czynnego na temperaturę:

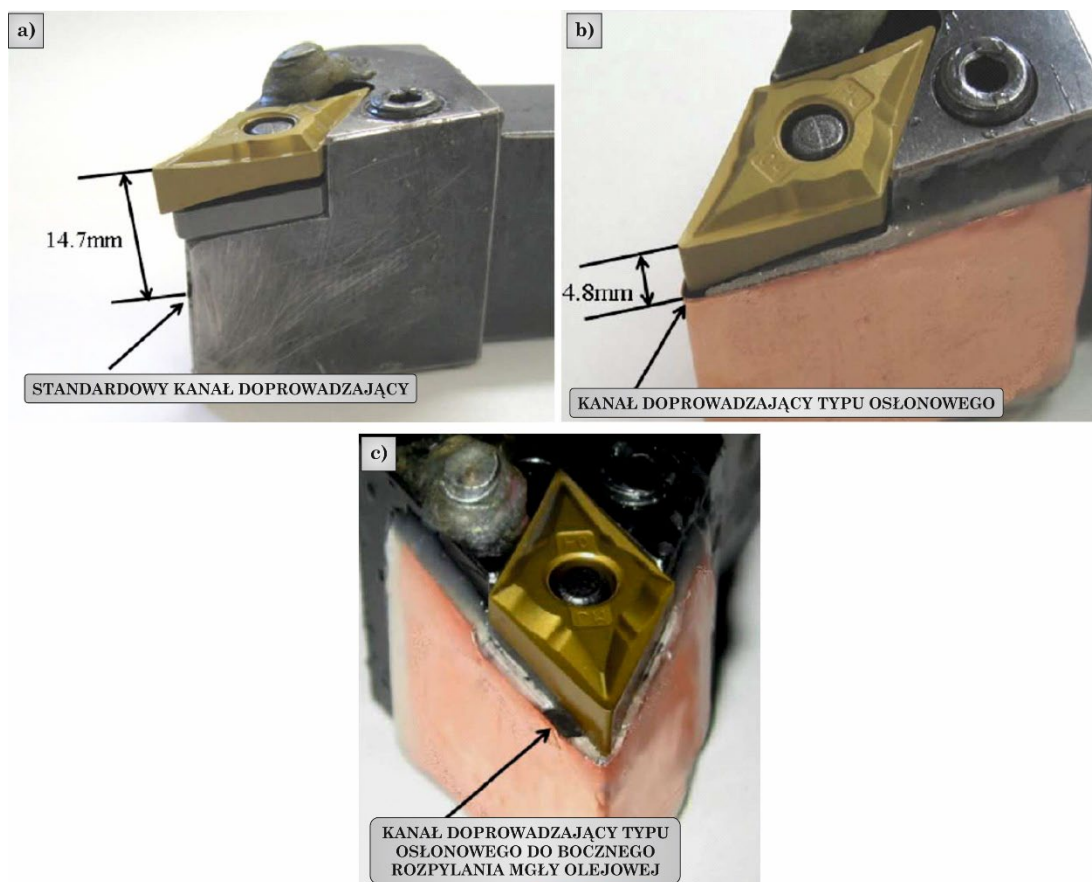
a) na powierzchni natarcia narzędzia, b) na powierzchni przyłożenia narzędzia

opracowanie własne na podstawie [91]

W pracy [91] podkreślono, iż wzrost ciśnienia na wejściu prowadzi do zmniejszenia temperatury w strefie skrawania. Uzasadniono to występowaniem konwekcji, która powstała na skutek zwiększonego przepływu powietrza i w głównej mierze odpowiadała za wymianę ciepła, zmniejszając tym samym temperaturę na powierzchniach ostrza skrawającego. Autorzy porównywali także wartości temperatur przy zastosowaniu mgły olejowej oraz wodnego aerozolu. W tym przypadku zastosowano stałą wartość ciśnienia równą 0,1 MPa i zaobserwowano, iż dla każdego przyjętego natężenia przepływu cieczy chłodząco-smarującej wartości temperatur są mniejsze przy użyciu wodnego aerozolu, niż przy zastosowaniu oleju. Przyczyną takiego zjawiska były zwiększone właściwości chłodzące kropel wody. Gorąca powierzchnia generowana podczas obróbki powoduje zjawisko tzw. pulsowania kropel wody, które wykorzystuje ciepło utajone w cząsteczkach do zmniejszenia temperatury rozpatrywanej powierzchni. Zastosowanie metody MQL w tej sytuacji nie daje takiego samego rezultatu, ponieważ wymagana jest większa energia do naśladowania zachowania kropel wody. Dlatego też różnica temperatury powierzchni natarcia pomiędzy zmianami natężenia przepływu MQL jest znacznie mniejsza niż w przypadku zastosowania kropel na bazie wody. Główną korzyścią ze stosowania metody MQL jest zwiększenie właściwości smarowych, ponieważ pokrywa ona narzędzie skrawające i obrabiany przedmiot warstwą filmu olejowego, który zmniejsza współczynnik tarcia podczas obróbki, co z kolei zmniejsza zużycie termiczne narzędzia.

Badania dotyczące przepływu medium czynnego w oparciu o analizę CFD zrealizowali również Obikawa i in. [92]. Tym razem rozpatrywano trzy różne sposoby dostarczania medium czynnego poprzez kanały wewnątrz noża tokarskiego (rys. 1.19). Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, iż zmniejszenie odległości między dyszami konstrukcji osłonowej a narożem ostrza skrawającego powoduje wzrost prędkości oraz ciśnienia sprężonego powietrza (rys. 1.20). W efekcie prowadzi to do wzrostu tempa, z jakim medium czynne transportowane jest do strefy styku ostrze skrawające-materiał obrabiany. Spośród trzech dysz, dysza typu osłonowego do rozpylania ukośnego charakteryzuje się największą wydajnością dostarczania aerozolu olejowego do strefy skrawania, co jest zgodne z największą wydajnością tej dyszy w eksperymentach podczas toczenia stopu Inconel 718. Autorzy przeanalizowali również drogę jaką pokonuje kropla oleju w stosunku do strumienia powietrza. Zauważono, iż względna droga kropel zwiększa się wraz z wartością jej średnicy do kwadratu. Stąd też wywnioskowano, że przy zastosowaniu metody MQL, zbyt małe średnice kropel oleju nie zapewniają właściwego smarowania. Ostatecznie podkreślono, iż dostarczanie medium czynnego pod kątem  $45^\circ$

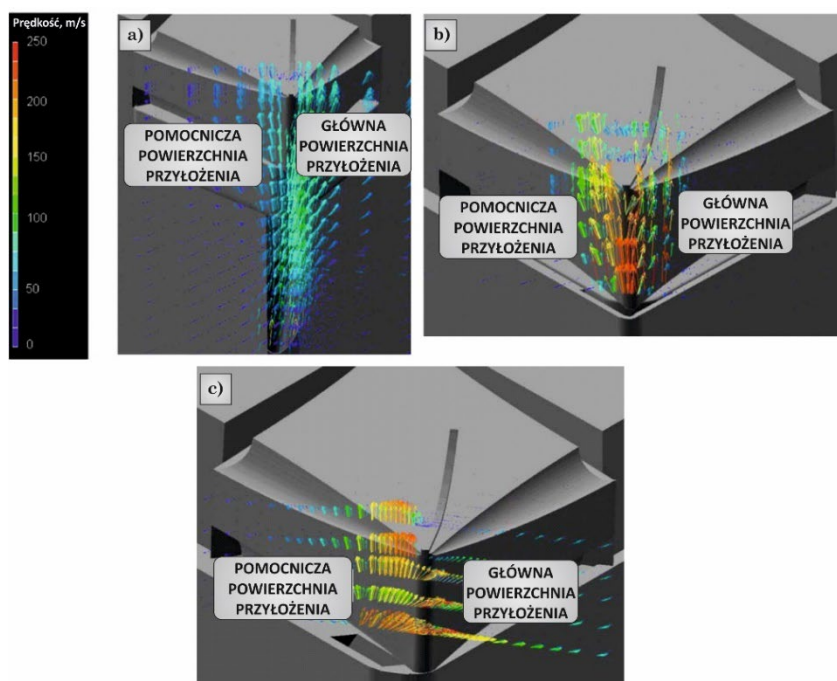
zapewnia najlepsze warunki do obróbki zarówno pod kątem chłodzenia i smarowania strefy skrawania.



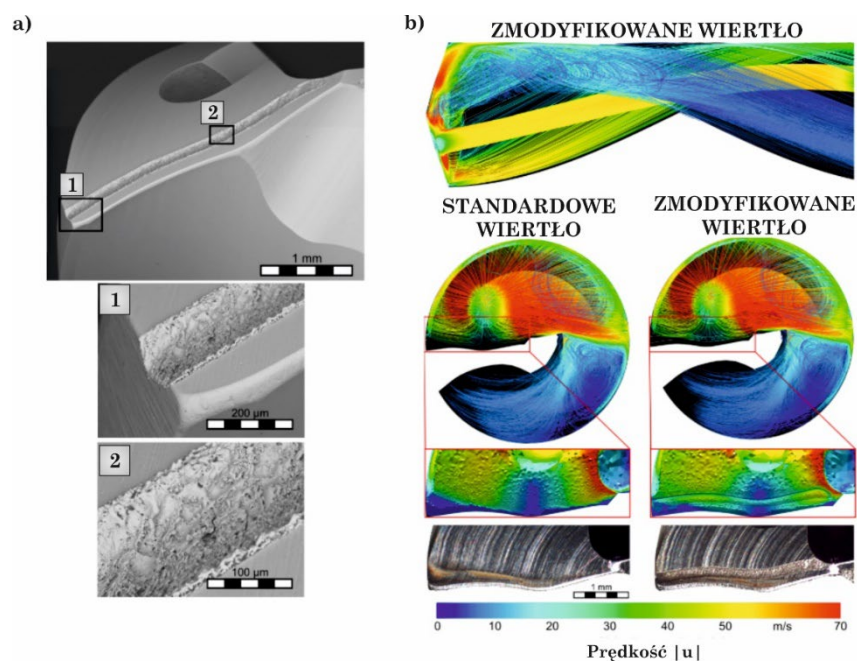
Rys. 1.19. Narzędzia skrawające z trzema rodzajami kanałów doprowadzających:  
a) standardowy, b) typu osłonowego, c) typu osłonowego z bocznym rozpylaniem pod kątem  $45^\circ$   
opracowanie własne na podstawie [92]

Inne symulacje przeprowadzone w oparciu o modelowanie CFD dotyczyły zmodyfikowanej geometrii wiertła. Beer i in. [93] zmienili konstrukcję narzędzia poprzez dodanie na powierzchni przyłożenia specjalnego rowka (rys. 1.21a) i przeanalizowali pole prędkości chłodziwa dla standardowego wiertła oraz opracowanej przez nich nowej jego wersji. W rezultacie wykazano, iż przy zastosowaniu narzędzia o niezmienionej geometrii, prędkość cieczy chłodząco-smarującej przy krawędzi skrawającej szybko ulega zmniejszeniu, a ponadto w obrębie jego naroża jej wartość wynosi niemal zero (rys. 1.21b). Zmodyfikowanie powierzchni przyłożenia umożliwia natomiast dodatkowe miejsce do zachodzenia ponownej cyrkulacji przepływu chłodziwa, co prowadzi do przesunięcia momentu pędu płynu obróbkowego w stronę krawędzi skrawającej. W efekcie w okolicach naroża oraz w obrębie głównej krawędzi skrawającej, wartość prędkości, z jaką przepływa

ciecz chłodząco-smarująca, jest większa. Ostatecznie prowadzi to do wzrostu ilości odprowadzanego ciepła, a więc również skuteczniejszego chłodzenia.



Rys. 1.20. Symulacja przepływu powietrza dostarczanego przez a) standardowy kanał, b) kanał typu osłonowego, c) kanał typu osłonowego do skośnego rozpylania  
opracowanie własne na podstawie [92]



Rys. 1.21. Zmodyfikowana geometria wiertła (a) oraz badania symulacyjne prędkości przepływu i zużycie powierzchni przyłożenia w zależności od budowy wiertła (b)  
opracowanie własne na podstawie [93]

Oezkaya i in. [94] badali natomiast zmianę średnicy kanałów wewnątrz wiertła ze względu na zmianę natężenia przepływu chłodziwa oraz jego ciśnienia. Zastosowane średnice wynosiły kolejno: 1 mm i 1,25 mm, z kolei dla natężenia przepływu oraz ciśnienia przyjęto wartości: 4,1 l/min, 5,7 l/min i 7,3 l/min oraz 1,6 MPa, 2,85 MPa i 4,3 MPa. Wykorzystanie symulacji CFD pozwoliło na ustalenie, iż zwiększenie średnicy kanałów wewnątrz wiertła nie wpływa na zmniejszenie obciążeń termicznych generowanych podczas wiercenia stopu Inconel 718. Autorzy uzasadnili to faktem, iż kanały o większej średnicy zapewniają wzrost przepływu płynu obróbkowego, jednakże w większości jest on transportowany do rowka, przez co nadal w obrębie krawędzi skrawającej stwierdza się występowanie stref, do których chłodziwo nie dociera. Podkreślono jednak, iż pozytywne rezultaty zapewnia zwiększenie ciśnienia, z jakim podawana jest ciecz obróbkowa. Prowadziło to bowiem do tego, że natężenie przepływu wzrastało w okolicach krawędzi skrawającej, co z kolei gwarantowało skuteczniejszą wymianę ciepła i poprawę wydajności chłodzenia. Choć w tym przypadku również stwierdzono występowanie stref, do których płyn obróbkowy nie był doprowadzony, ostatecznie zauważono zwiększenie trwałości wiertła.

O tym, że odpowiednie usytuowanie dyszy względem strefy skrawania ma szczególne znaczenie, świadczą z kolei badania, które zrealizowali Park i in. [95]. Tym razem rozpatrywano wpływ jej odległości od miejsca dostarczania aerozolu olejowego oraz zmienne ciśnienie powietrza na liczbę oraz wielkość trafiających na powierzchnię kropeł. Dzięki przeprowadzonemu eksperymentowi Autorzy stwierdzili, iż im większa jest odległość dyszy od strefy skrawania, tym mniej kropeł jest do niej dostarczane. Zwiększenie wartości ciśnienia miało jednak odwrotny efekt i zapewniło doprowadzenie większej ilości kropeł na badanej powierzchni, o ile dysza nie była odsunięta o ponad 50 mm. Wtedy bowiem nie zauważono pozytywnego wpływu wzrostu ciśnienia na zwilżalność. Ostatecznie ustalono, iż optymalne ciśnienie, zapewniające skuteczne zwilżanie powierzchni wynosi ok. 0,08 MPa, a odległość dyszy – 30 mm.

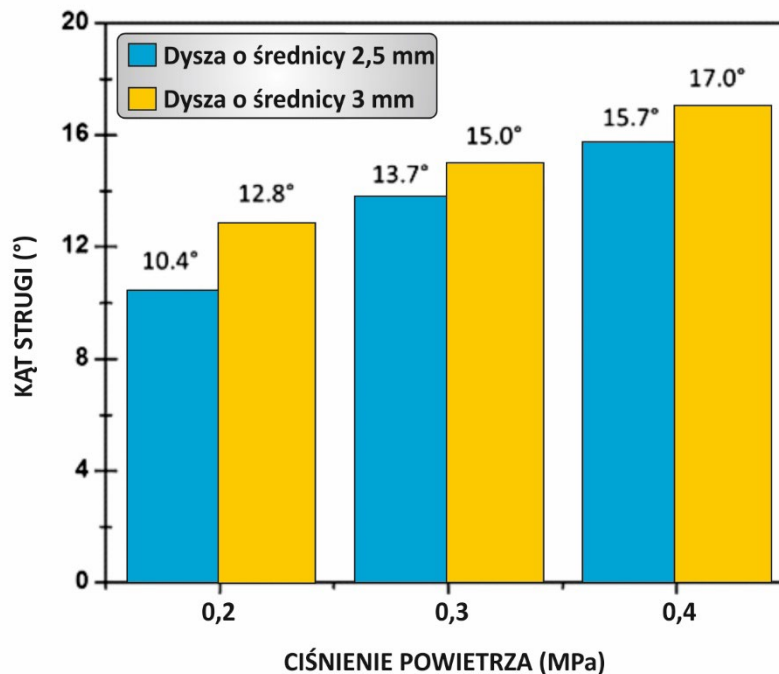
### **1.3.5. Parametry wyjściowe tworzenia medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania**

Oprócz parametrów wejściowych tworzenia mgły olejowej, duże znaczenie mają również parametry wyjściowe. Spośród nich wyróżnia się m.in. wielkość i liczbę kropeł powstającego aerozolu czy kąt rozpylanej strugi. Należy do nich również zwilżalność,



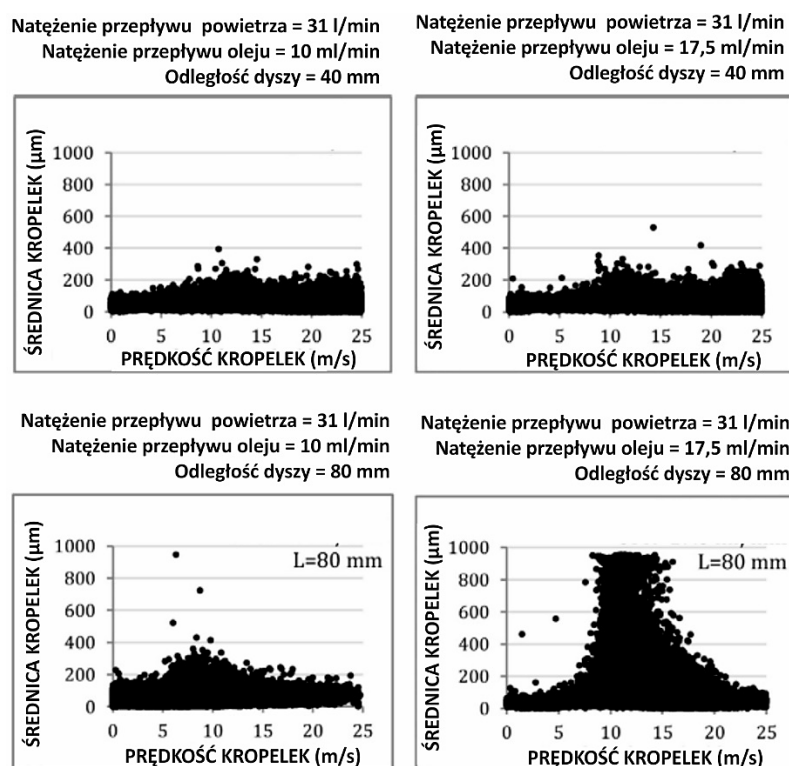
jakim cechuje się medium czynne dostarczane do strefy skrawania. Gdy aerozol olejowy cechuje się dobrą zwilżalnością (o której świadczy wartość kąta kontaktu  $\theta$ , który powinien być zbliżony do wartości  $0^\circ$ ). Taki kąt oznacza, iż jest w stanie wytworzyć pewną warstwę w strefie styku ostrze skrawające–materiał obrabiany [17, 86].

Kąt rozpylania strugi przeanalizowali w swoich badaniach Rahim i Dorairaju [96]. Na potrzeby eksperymentu przeprowadzonego w warunkach toczenia stali AISI 20145 rozpatrywano zmienne wartości: odległości dyszy wynoszących 3 mm, 6 mm, 7 mm oraz 9 mm, ich średnic na wylocie (2,5 mm i 3 mm) oraz ciśnienia powietrza w zakresie od 0,2 MPa do 0,4 MPa. Dyszę w każdym przypadku ustawiano pod kątem  $45^\circ$  względem narzędzia. W rezultacie wykazano, iż ustawiając dyszę w odległości 3–6 mm względem strefy skrawania, wybierając większą jej średnicę oraz stosując ciśnienie powietrza wynoszące 0,4 MPa, możliwe jest zmniejszenie siły i temperatury skrawania. Wynika to z faktu, iż do strefy skrawania trafia większa ilość mgły olejowej na skutek użycia dyszy o większej średnicy w jej końcowej części. Zaobserwowano również, że największa przyjęta wartość ciśnienia powietrza zapewnia największy kąt rozpylania mgły olejowej (rys. 1.22).



*Rys. 1.22. Wpływ ciśnienia powietrza na kąt rozpylania aerozolu olejowego w zależności od średnicy dyszy  
opracowanie własne na podstawie [96]*

Kolejny parametr wejściowy czyli liczba kropeł aerozolu olejowego zbadali Iskandar i in. [97]. Ponownie zastosowano różne odległości dyszy od strefy skrawania, które tym razem wynosiły 40, 60 oraz 80 mm. Rozpatrywano również zmienne wartości natężenia przepływu oleju oraz powietrza, które zastosowano do wizualizacji przepływu medium czynnego metodami PIV (ang. Particle Image Velocimetry) i PDA (ang. Phase Doppler Anemometry). Wynosiły one kolejno 10 ml/min, 17,5 ml/min i 24 ml/min oraz 20 l/min, 25 l/min, 28 l/min, 31 l/min (testy PIV) i 10 ml/min, 17,5 ml/min oraz 25 l/min, 28 l/min, 31 l/min (testy PDA). Eksperyment zrealizowano podczas frezowania kompozytu CFRP. Autorzy wskazali, iż najmniejsza badana wartość natężenia przepływu oleju oraz największa natężenia przepływu powietrza, a także jak najbliższe położenie dyszy względem strefy skrawania zapewniają wydajniejszy transport kropeł na rozpatrywaną powierzchnię. Parametry takie powodują również rozbijanie kropeł oraz wzrost ich liczby (rys. 1.23). Ostatecznie prowadzi to do otrzymania spójnego strumienia aerozolu olejowego, który skutecznie penetruje strefę skrawania i charakteryzuje się zmniejszoną ilością powstających wirów podczas obróbki kompozytu CFRP.



Rys. 1.23. Zależność średnicy kropeł oraz ich prędkości od zmiennych wartości natężenia przepływu oleju i powietrza oraz odległości dyszy od strefy skrawania  
opracowanie własne na podstawie [97]



Damir i in. [98] wykorzystali model CFD i metodę elementów skończonych do oceny charakterystyki przepływów podczas chłodzenia ciekłym azotem i aerozolem olejowym. Przeprowadzono również badania eksperymentalne podczas toczenia stopu tytanu Ti6Al4V. Ciekły azot dostarczano na powierzchnię natarcia w następujący sposób: dyszą o średnicy 2,2 mm przy przepływie równym 0,5 l/min lub na powierzchnię przyłożenia dyszą o średnicy 1,5 mm przy takim samym przepływie. Dla metody MQL zastosowano dyszę skierowaną na powierzchnię natarcia, której średnica wynosiła 4,6 mm, a przepływ był równy 30 l/min. Z kolei dla metody hybrydowej, łączącej chłodzenie ciekłym azotem i mgłą olejową zastosowano dysze: skierowaną na powierzchnię natarcia (MQL) oraz skierowaną na powierzchnię przyłożenia (ciekły azot), a każda z nich posiadała średnicę równą 1,5 mm. Dla każdej z tych dwóch metod chłodzenia zastosowano wspomniane wcześniej natężenie przepływu. Autorzy wskazali, iż dzięki przygotowanym modelom stwierdzono, iż metoda hybrydowa charakteryzuje się najskuteczniejszym chłodzeniem strefy skrawania. Potwierdziły to efekty badań eksperymentalnych, gdzie w porównaniu z obróbką na mokro, chłodzeniem pod wysokim ciśnieniem oraz metodą kriogeniczną, chłodzenie hybrydowe stwierdzono najmniejsze wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej i zużycia ostrza skrawającego.

Jadhav i Deivanathan [99] wykorzystali natomiast model fazy dyskretniej (DPM) do oceny temperatury i wartości średniej średnicy Sautera (SMD), jaką charakteryzowały się krople aerozolu olejowego podczas frezowania stopu tytanu Ti6Al4V. Zastosowano zmienne wartości ciśnienia powietrza (0,2 MPa, 0,3 MPa i 0,4 MPa) oraz natężenia przepływu oleju (100 ml/h, 150 ml/h i 200 ml/h). Stwierdzono iż największą wartość SMD równą 16,85  $\mu\text{m}$ , osiągnięto przy ciśnieniu i natężeniu przepływu oleju wynoszącym kolejno 0,2 MPa i 100 ml/h. Prędkość chłodziwa wyniosła jednak wtedy 57,6 m/s. Z kolei przy ciśnieniu równym 0,4 MPa i przepływie wynoszącym 100 ml/h wartość średniej średnicy Sautera była najmniejsza – wynosiła bowiem 13  $\mu\text{m}$ , a prędkość medium czynnego osiągnęła największą wartość (82,7 m/s). Autorzy podkreślają jednak, iż wzrost prędkości kropli przy większym ciśnieniu prowadzi do zmniejszenia SMD, gdyż cząstki aerozolu są wówczas bardziej rozdrobione. Kiedy SMD jest zbyt małe, mniejsze krople mogą ulegać odbiciu od strefy skrawania przez co nie będą w stanie skutecznie jej zwilżać. Natomiast gdy SMD przyjmuje zbyt duże wartości, transport kropli do strefy skrawania będzie utrudniony. Dzięki przeprowadzonym badaniom symulacyjnym Autorzy ustalili, iż optymalne chłodzenie aerozolem olejowym zachodzi w warunkach ciśnienia równego

0,3 MPa oraz natężenia przepływu oleju równego 200 ml/h, dla których osiągnięto prędkość medium czynnego wynoszącą 71,6 m/s i średnią średnicę Sautera równą 15,39  $\mu\text{m}$ .

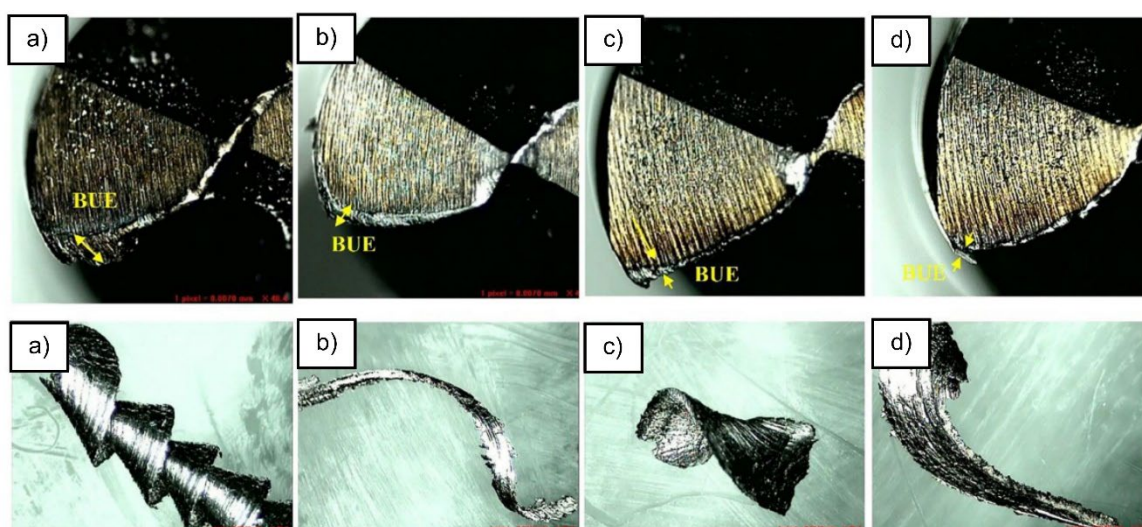
### **1.3.6. Porównanie metod chłodzenia z doprowadzeniem wewnętrznym i zewnętrznym**

Naukowcy badający zjawiska towarzyszące procesowi wiercenia często stosują zarówno metody zewnętrznego chłodzenia strefy skrawania, jak i techniki uwzględniające wewnętrzne doprowadzanie płynów obróbkowych. Zeilmann i Weingaertner [100] w trakcie badań porównali oba sposoby transportu aerozolu olejowego podczas obróbki stopu tytanu Ti6Al4V w trakcie wiercenia. W wyniku przeprowadzonego eksperymentu wykazano, iż zastosowanie wewnętrznego smarowania przyczyniło się do zmniejszenia wartości temperatur w strefie skrawania o ok. 50% w porównaniu do procesu, podczas którego aerozol olejowy dostarczany był z zewnątrz narzędzia. W badaniach Berzosa i in. [101] podczas obróbki stopu magnezu UNS M11917 porównano metodę MQL z podawaniem zewnętrznym z obróbką na sucho ze względu na chropowatość powierzchni obrobionej. Wyniki zostały oparte na wartościach parametru  $Ra$ , przy zmiennej prędkości skrawania i posuwie oraz kącie wierzchołkowym wiertła. Najmniejszą wartość tego parametru (0,13  $\mu\text{m}$ ) osiągnięto podczas skrawania z zastosowaniem chłodzenia aerozolem olejowym, większą prędkością skrawania (60 m/min), mniejszym kącie wierzchołkowym ( $118^\circ$ ) i mniejszym posuwie (0,05 mm/obr).

Amini i in. [102] w swoim eksperymencie przeprowadzili wiercenie stali AISI 1045 z wykorzystaniem wibracji ultradźwiękowych, zewnętrznego dostarczania aerozolu olejowego, połączenia metody MQL z wibracjami ultradźwiękowymi oraz w warunkach obróbki na sucho. Pomiar siły osiowej  $F_o$  oraz parametru chropowatości  $Ra$  wykazały, że zastosowanie metody MQL połączonej z wibracjami ultradźwiękowymi jest w stanie zapewnić najmniejsze wartości wspomnianych parametrów w porównaniu do pozostałych warunków obróbki. Wykorzystana metoda zapewnia również korzystniejszy kształt wiórów, zmniejszając tym samym tarcie między narzędziem a wiórem, a tym samym zmniejszenie narostu na krawędziach skrawających (rys. 1.24).

Teimouri i in. [103] również wykorzystali jednocześnie wibracje ultradźwiękowe oraz zewnętrzny transport aerozolu olejowego do strefy skrawania. Naukowcy eksperyment przeprowadzali wykorzystując stal węglową AISI 1045, a medium czynne wzbogacili

o nanorurki węglowe. Wyniki ich eksperymentu wykazały, iż dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe było zmniejszenie siły osiowej i momentu skręcającego w porównaniu do obróbki na sucho. Nandgaonkar i in. [104] przeprowadzili badania w warunkach obróbki na sucho oraz metody MQL, wykorzystując w roli medium czynnego aerozol wodno-olejowy. Autorzy zastosowali tutaj połączenie oleju estrowego wymieszanego z wodą w celu uzyskania mniejszej temperatury strefy skrawania i zwiększenia smarowania podczas tarcia wiórów o powierzchnię narzędzia podczas wiercenia stopu tytanu Ti6Al4V. W wyniku eksperymentu stwierdzono, iż podczas skrawania ww. stopu przy zewnętrznym dostarczaniu medium czynnego zużycie na powierzchni przyłożenia było mniejsze niż w przypadku obróbki na sucho. Ponadto, obróbka w warunkach zminimalizowanego chłodzenia i smarowania zapobiegała zużyciu ściernemu i dyfuzyjnemu wiertła.

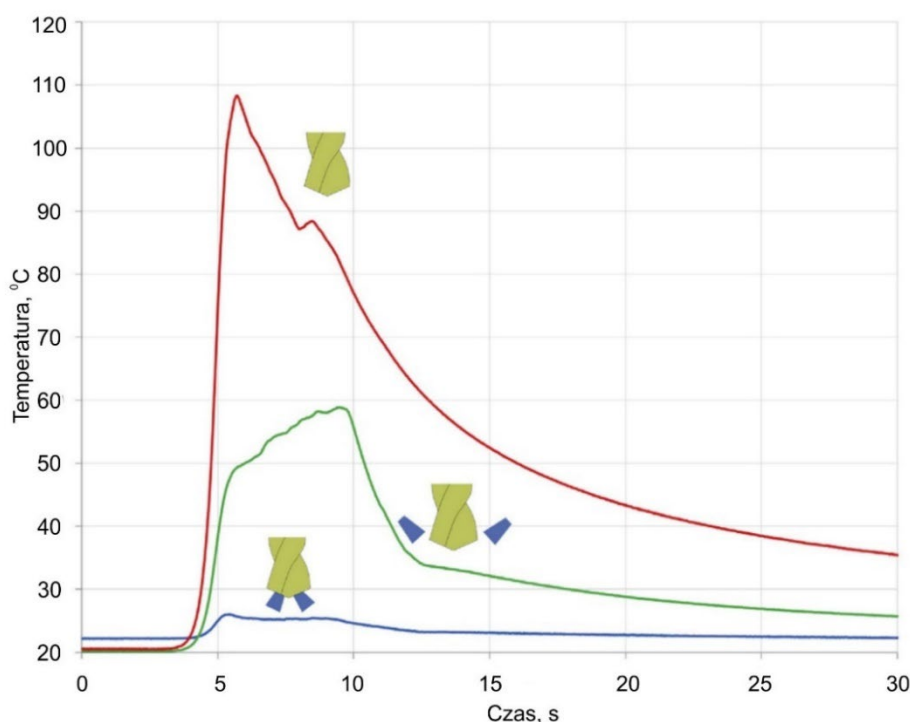


Rys. 1.24. Narost na ostrzu i kształt wióra po obróbce stali AISI 1045: a) obróbka na sucho; b) metoda MQL; c) wibracje ultradźwiękowe; d) metoda MQL + wibracje ultradźwiękowe  
opracowanie własne na podstawie [102]

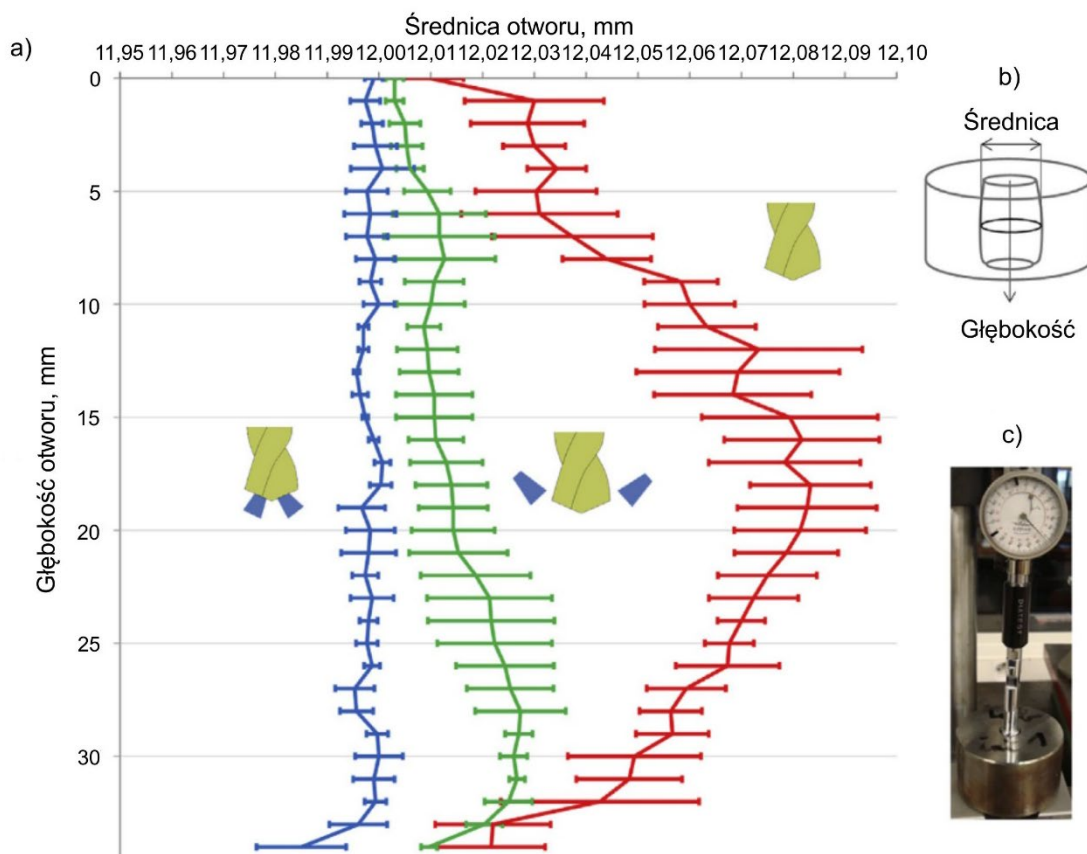
Girion i in. [105] swoje badania przeprowadzili na stali austenitycznej 316L z wykorzystaniem chłodzenia zarówno zewnętrznego i wewnętrznego przy użyciu emulsji o stężeniu równym 8,3%. Uzyskane wyniki porównano z obróbką na sucho. W wyniku braku płynu obróbkowego zaobserwowano wytworzenie się większych ilości ciepła, co z kolei doprowadziło do powstania rozciągających naprężeń resztkowych. W przypadku chłodzenia zewnętrznego w strefie skrawania wytwarzały się mniejsze ilości ciepła, zaobserwowano jednak obwodowe rozciągające naprężenia resztkowe. Przy zastosowaniu chłodzenia przez kanały wiertła, powstające ciepło było już skutecznie odprowadzane, dzięki czemu uzyskano ściskające naprężenia resztkowe. Parametry chropowatości  $Ra$  oraz

$Rz_{1max}$  również cechowały się najmniejszymi wartościami przy zastosowaniu chłodzenia wewnętrznego, a nieco większe wartości uzyskano w wyniku zewnętrznego dostarczania medium czynnego, natomiast najgorszą jakość otworów zaobserwowano przy obróbce na sucho. Zwiększona temperatura w strefie skrawania przy obróbce na sucho (rys. 1.25) spowodowała również największą niedokładność wymiarową wykonywanych otworów o średnicy 12 mm (rys. 1.26).

Huang i in. [106] zastosowali chłodzenie zewnętrzne podczas mikrowiercenia stopu aluminium 7075-T6. Naukowcy wykorzystali nie tylko klasyczną „mgłę olejową”, ale również wzbogacili ją o nanocząsteczki diamentu. Rezultaty przeprowadzonych badań zestawili z obróbką na sucho, dzięki czemu wykazali, iż nanociecz dostarczana poprzez dwie dysze przyczyniła się do zmniejszenia sił i momentu skrawania w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia. Redukcji uległa również temperatura mikrowiercenia. Skuteczne odprowadzanie ciepła ze strefy skrawania, jakim cechowało się połączenie cieczy chłodziwo-smarującej z nanocząstkami, doprowadziło do zmniejszenia zużycia narzędzia. Ostatnim pozytywnym wpływem nanocieczy zaobserwowanym przez naukowców była eliminacja powstawania zadziorów przy wywierconych otworach. Warto dodać, iż najgorsze rezultaty w każdym przypadku otrzymano dla obróbki na sucho, a nieco lepsze – dla aerozolu olejowego bez dodatków.



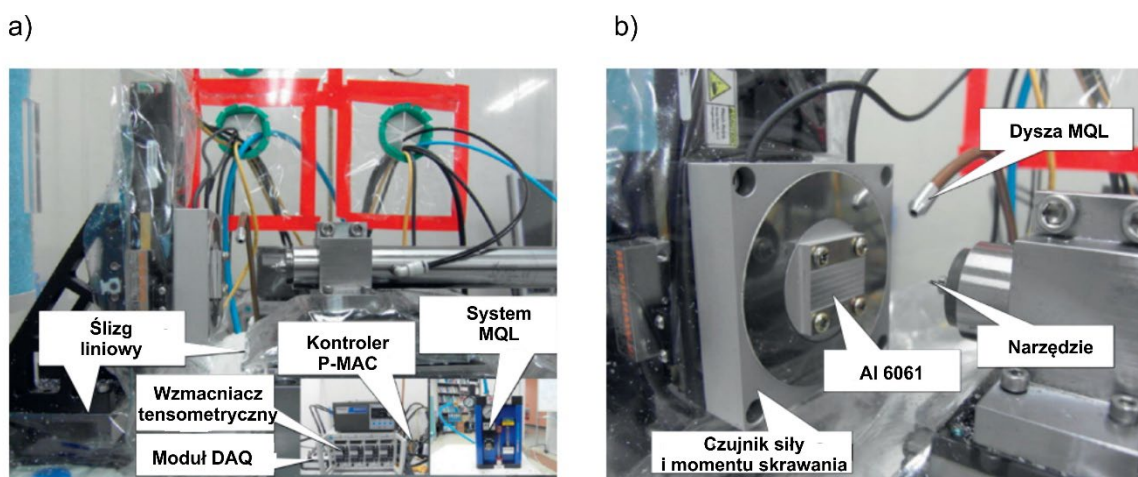
Rys. 1.25. Wpływ doprowadzania medium czynnego na temperaturę przedmiotu obrabianego podczas wiercenia stali austenitycznej 316L – opracowanie własne na podstawie [105]



Rys. 1.26. Dokładność wymiarowa otworu: a) w zależności od sposobu chłodzenia;  
 b) zasada pomiaru średnicy otworu c) przykładowy pomiar za pomocą czujnika  
 opracowanie własne na podstawie [105]

Również Nam i Lee [80] wykorzystali w swoim eksperymencie nanocząsteczki diamentu podczas przeprowadzania mikrowiercenia. Naukowcy przeprowadzili swoje badania na stopie tytanu Ti-6Al-4V, który należy sklasyfikować do materiałów trudnoskrawalnych. Oprócz chłodzenia tzw. nanocieczą, skrawanie zostało przeprowadzone w obecności sprężonego powietrza i tradycyjnego aerozolu olejowego. Medium czynne w każdym przypadku dostarczano od strony zewnętrznej narzędzia. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły, iż zastosowanie nanocząsteczek diamentu powoduje zmniejszenie wartości sił i momentu skrawania w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia, co było szczególnie zauważalne dla mniejszych posuwów, wynoszących do 10 mm/min. Ze względu na fakt, iż zastosowane nanocząstki cechowały się kulistym kształtem, zachodzący efekt łożyska kulkowego w ich przypadku został zintensyfikowany, co w konsekwencji prowadziło do lepszego smarowania strefy skrawania. Dzięki temu zmniejszono również ryzyko występowania zadziorów oraz zjawiska zużycia adhezyjnego na powierzchni narzędzia. W innym eksperymencie przeprowadzonym przez Nam i in. [65]

uwzględniono zastosowanie nanocieczy podczas mikrowiercenia stopu aluminium 6061. Płyn bazowy został również wzbogacony o nanocząstki diamentu, a samo dostarczanie medium czynnego odbywało się przez dyszę zewnętrzną (rys. 1.27). Pozostałe warunki chłodzenia uwzględnione w tych badaniach obejmowały użycie: sprężonego powietrza oraz tradycyjnego aerozolu olejowego, podobnie jak ww. badaniach [80]. Wyniki badań potwierdziły, że wykorzystanie nanocieczy nie tylko powoduje wzrost liczby możliwych do wywiercenia otworów, ale także przyczynia się do zmniejszenia wartości momentu i siły skrawania w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia, poprawę jakości powstałych otworów oraz wyeliminowała powstawanie zadziorów i zapewniła skuteczne odprowadzanie wiórów.



Rys. 1.27. System obrabiarki wykorzystanej do eksperymentu z mikrowierceniem:  
a) system doświadczalny; b) szczegółowy widok obszaru mikrowiercenia zawierający mikrowiertło, przedmiot obrabiany (Al 6061), głowicę pomiarową i dyszę MQL  
opracowanie własne na podstawie [65]

Rosnan i in. [81] w celu zwiększenia właściwości smarowych płynu obróbkowego w metodzie MQL zastosowali natomiast nanocząsteczki  $Al_2O_3$  i tak przygotowaną mgłę olejową porównali z obróbką na mokro. Dostarczanie medium czynnego odbywało się za pomocą dwóch dysz. Naukowcy w swoich badaniach przeprowadzili wiercenie wykorzystując stop NiTi w roli materiału obrabianego. Dzięki результатам obróbki podkreślili zdolność użytych nanocząstek do zwiększania przewodności cieplnej i współczynnika przenikania ciepła, jakimi cechował się płyn obróbkowy z nanocząstkami. Zaobserwowano też, iż nanociecz zmniejsza zużycie narzędzi, szczególnie tych powlekanych, jednak działanie to jest ograniczone przez prędkość skrawania i zachodzi tylko w zakresie prędkości skrawania 10-20 m/min. Zastosowany rodzaj nanocząstek



doprowadził również do zmniejszenia siły skrawania na skutek utworzenia cienkiej warstwy tribofilmu na powierzchni styku narzędzia i materiału obrabianego. Jednak ta metoda chłodzenia, w porównaniu do obróbki na mokro nie zapewniła wymaganej dokładności wymiarowej otworów ani zwiększenia ich jakości.

Perçin i in. [107] natomiast podczas mikrowiercenia stopu tytanu Ti6Al4V użyli czterech metod chłodzenia: kriogenicznego, MQL, obróbki na mokro oraz obróbki na sucho. Ponadto zastosowano zewnętrzny transport medium czynnego do strefy skrawania. Naukowcy zaobserwowali, iż żadna z zastosowanych metod nie przyczynia się w sposób szczególny do zmniejszenia wysokości zadziorów. Podkreślili jednak, iż przy chłodzeniu kriogenicznym wartość ta była najmniejsza. Najmniejszą wartość parametru  $Ra$  zaobserwowano przy obróbce na mokro. Zarówno metoda zalewowa jak i MQL umożliwiły zmniejszenie momentu skrawania w porównaniu do obróbki na sucho, przy czym najmniejsze wartości osiągnięto przy zastosowaniu mgły olejowej.

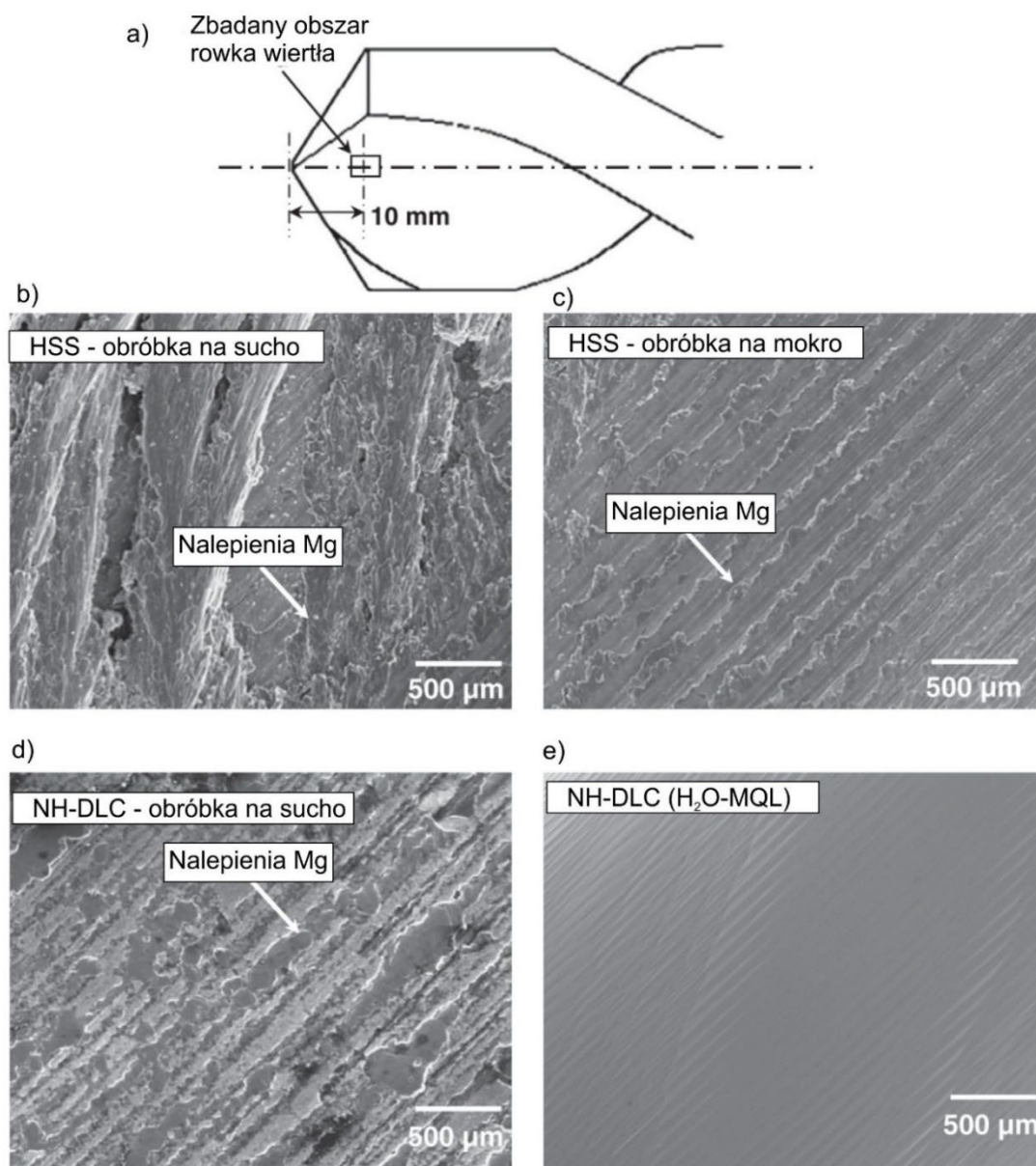
Meena i Mansori [108] przeprowadzili badania porównując obróbkę na mokro z obróbką na sucho oraz zewnętrznym dostarczaniem aerozolu olejowego w metodzie MQL. Wiercenie przeprowadzono w żeliwie ADI, badając wpływ warunków chłodzenia na: jakość powierzchni, siłę i moment skrawania oraz zużycie narzędzia, którym było wiertło kręte z powłoką TiAlN. W wyniku przeprowadzonych badań udowodniono, że wartości ww. wskaźników skrawalności dla obróbki na mokro i zminimalizowanego smarowania są porównywalne podczas wiercenia 40 otworów. Przy wykonaniu większej ilości otworów, mniejsze wartości momentu skrawania i parametru chropowatości  $Ra$  zaobserwowano dla obróbki na mokro. W przypadku siły skrawania – aerozol olejowy zapewniła jej zmniejszenie jedynie w porównaniu do obróbki na sucho. Dominującym rodzajem zużycia w przypadku tych dwóch metod chłodzenia było zużycie kraterowe ze względu na wysokie temperatury występujące w strefie styku wiór-narzędzie. Zaobserwowano, że warunki wiercenia z wykorzystaniem metody MQL znacznie zmniejszają zużycie narzędzia i poprawiają jego trwałość w porównaniu z wierceniem na sucho. W początkowej fazie wiercenia, autorzy zauważyli, że warstwa powłoki jest ścierana aż do węgla spiekanego, począwszy od krawędzi skrawającej w pobliżu wierzchołka ostrza. Po wykonaniu znacznej liczby otworów tym samym narzędziem, siła tarcia stale wzrasta i zaczyna się tworzyć narost, co prowadzi do wykruszania się krawędzi skrawającej w pobliżu wierzchołka wiertła, co prowadzi do dalszej utraty powłoki. W połączeniu ze zużyciem kraterowym prowadzi do uszkodzenia wiertła, co zaobserwowano w szczególności dla obróbki na sucho.

Bhowmick i Alpas [109] zastosowali połączenie zewnętrznej metody zminimalizowanego smarowania z wodą ( $H_2O$ -MQL), które porównali z obróbką na mokro i obróbką na sucho podczas wiercenia stopu magnezu AZ91 wiertłem krętym ze stali szybkoobrotowej oraz wiertłem z powłoką NH-DLC (nieuwodnorodniona – osadzona na narzędziu za pomocą systemu jonowego napylania magnetronowego w polu zamkniętym). Naukowcy zaobserwowali, że połączenie wody z metodą MQL spowodowało zmniejszenie momentu skrawania i zużycia narzędzia. Podkreślili również, iż w takich warunkach obróbki osiągnięto mniejszy współczynnik tarcia, dzięki czemu ograniczono wzrost temperatury, a tym samym również zjawisko adhezji magnezu (rys. 1.28). Wspomniana technika chłodzenia została ostatecznie uznana przez naukowców za skuteczną alternatywę dla obróbki na mokro podczas wiercenia stopu AZ91, gdyż zapewniła otrzymanie porównywalnych rezultatów.

Giasin i in. [110] przeprowadzili wiercenie w laminacie metalowo-włóknistym GLARE 2B 11/10-0.4 przy wykorzystaniu metody kriogenicznej (chłodzenia ciekłym azotem) oraz metodą MQL. Wyniki eksperymentu porównano do rezultatów uzyskanych podczas obróbki na sucho. Naukowcy skupili się na jakości otrzymanych otworów, dzięki czemu możliwe było określenie wpływu zewnętrznego chłodzenia strefy skrawania na powstawanie zadziorów. W efekcie wykazano, iż zarówno ciekły azot, jak i mgła olejowa, są w stanie zredukować tworzenie zadziorów na wyjściu z otworu kolejno o 47% i 36,4% w porównaniu do obróbki na sucho. Z kolei na wejściu otworu wspomniane zadziory cechowały się większą wysokością przy zastosowaniu aerozolu olejowego. W wyniku obróbki w warunkach chłodzenia metodą MQL uzyskano większą niż wymagana średnicę otworów w górnej ich części, z kolei w dolnych części otworów ich wielkości były mniejsze od zakładanej średnicy. Przy chłodzeniu kriogenicznym stwierdzono, że wielkość średnicy otworu zależy szczególnie od prędkości obrotowej. Natomiast Heinemann i in. [102] zbadali wpływ zewnętrznego chłodzenia strefy skrawania metodą MQL podczas wiercenia głębokich otworów. Materiał obrabiany w tym przypadku stanowiła stal węglowa C45. W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano, iż w przypadku wiertel o mniejszej średnicy, wykorzystywanych podczas przyjętych warunków obróbki, ciągłe dostarczanie aerozolu olejowego wpływa pozytywnie na trwałość narzędzia, podczas gdy stosowanie przerywanego doprowadzania medium czynnego skutkowało jego przyspieszonym zużyciem. Pozytywny wpływ dostarczania niewielkich ilości aerozolu olejowego (18 ml/h) do strefy skrawania zauważono szczególnie w przypadku wiertel niepowlekanych. Autorzy podkreślają też, iż w trakcie obróbki na sucho niezbędne jest



wykorzystanie narzędzi z powłokami (np. TiAlN), gdyż wzrost temperatur podczas obróbki uniemożliwia osiągnięcie wymaganej trwałości narzędzi niepowlekanych.



Rys. 1.28. Analiza SEM: a) miejsce analizowanego obszaru rowka wiertła; b) wiertło HSS po obróbce na sucho; c) wiertło HSS po obróbce na mokro; d) wiertło z powłoką NH-DLC po obróbce na sucho; e) wiertło z powłoką NH DLC po zastosowaniu MQL  
opracowanie własne na podstawie [109]

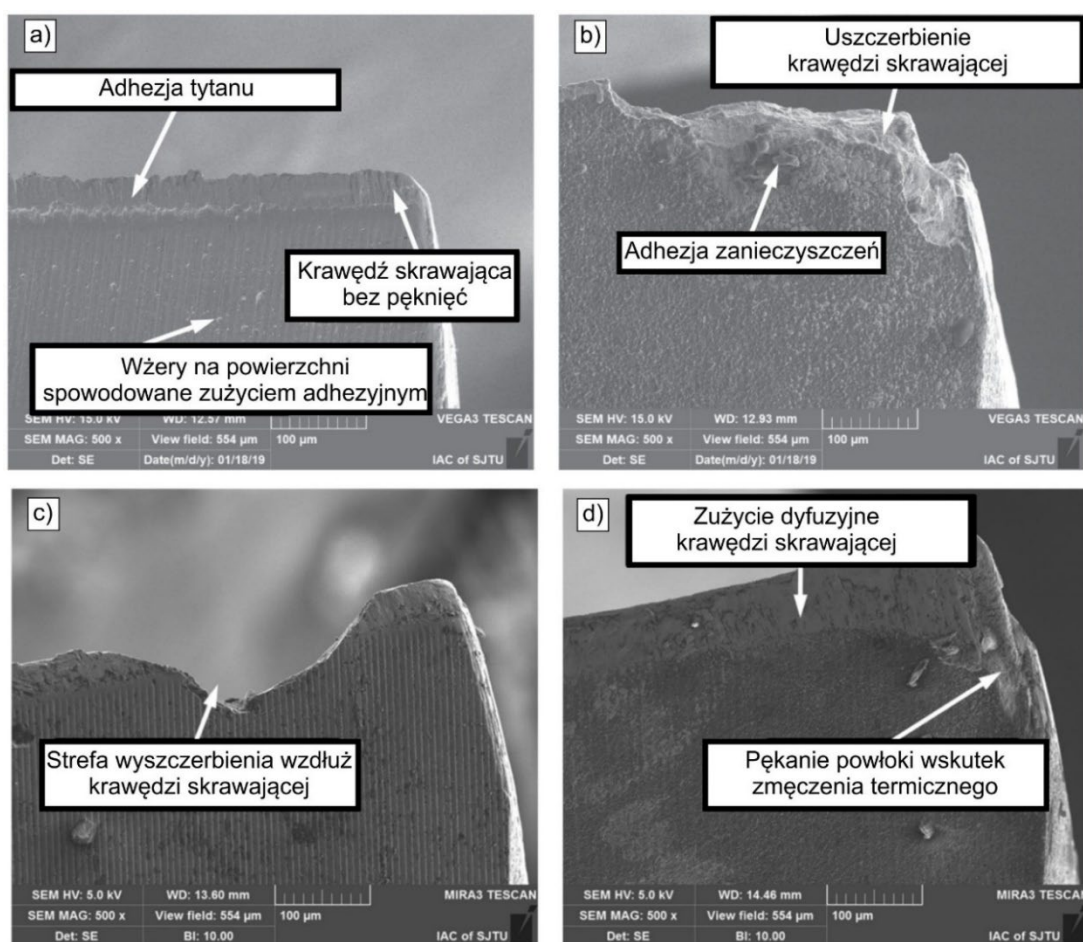
Destylowaną wodę w postaci aerozolu postanowili zastosować Bhowmick i Alpas [111] podczas wiercenia siluminu 319 Al. Metoda H<sub>2</sub>O-MQL została następnie porównana z metodą zalewową i obróbką na sucho. Przeprowadzony przez naukowców eksperyment wykazał, iż wykorzystanie destylowanej wody w roli płynu obróbkowego

transportowanego na zewnątrz narzędzia pozwoliło na zmniejszenie momentu i siły skrawania w porównaniu do obróbki na sucho. Naukowcy zaobserwowali również zmniejszoną adhezję aluminium na powierzchni narzędzia w przypadku zastosowania metody H2O-MQL. O stabilnych warunkach obróbki wg. Autorów świadczą zmniejszone liczby pików na przebiegach czasowych sił i momentu skrawania, które zwykle spowodowane są poprzez wspomniane zjawisko adhezji.

Brandao i in. [112] skupili się na badaniu temperatury skrawania podczas wiercenia stali AISI H13 z uwzględnieniem jednowymiarowego przepływu ciepła. Zastosowano trzy rodzaje chłodzenia strefy skrawania: obróbkę na mokro, MQL (medium czynne dostarczane zostało przez dwie dysze) oraz obróbkę na sucho. Otrzymane wyniki eksperymentu wskazały jednoznacznie, iż zmniejszenie wartości temperatury oraz przepływu ciepła są zależne od ilości cieczy chłodząco-smarującej, która jest dostarczana do strefy skrawania. Z tego względu oba parametry uzyskały najmniejsze wartości przy zastosowaniu obróbki na mokro. Girinon i in. [113] przeprowadzili badania dotyczące naprężeń szczątkowych podczas wiercenia trzech różnych materiałów: stali austenitycznej 316L, stali martenzytycznej 15-5PH oraz stopu niklu Inconel 718. Dodatkowo uwzględniono trzy metody chłodzenia: wewnętrzne pod wysokim ciśnieniem, zewnętrzne pod niskim ciśnieniem i obróbkę na sucho. Naukowcy zaobserwowali, iż efektywne stosowanie płynów obróbkowych wpływa znacząco na warstwę wierzchnią. Wiercenie w warunkach wewnętrznego doprowadzenia chłodziwa umożliwiło wystąpienie ściskających naprężeń szczątkowych, natomiast w sytuacji, gdy ciecz chłodząco-smarująca dostarczana była na zewnątrz, pojawiły się rozciągające naprężenia szczątkowe, co wynikało z niedostatecznego smarowania strefy skrawania. Największe wartości naprężeń rozciągających szczątkowych zauważono przy obróbce na sucho. Autorzy stwierdzili, iż w celu efektywnego odprowadzania zarówno ciepła, jak i wiórów, a tym samym uzyskania najkorzystniejszej integralności powierzchni, najlepszą metodą doprowadzania płynów obróbkowych jest transport wewnętrzny poprzez wykorzystanie kanałów wewnątrz narzędzia.

Wielu naukowców z powodzeniem znajduje zastosowanie dla zewnętrznego dostarczania cieczy chłodząco-smarujących w procesie wiercenia. Nie ograniczają się jednak do stosowania wyłącznie takiej techniki, a przeprowadzane badania wykazują, iż temat doprowadzania płynów obróbkowych przez kanały znajdujące się wewnątrz wiertła jest równie często podejmowany. Potwierdza to eksperyment wykonany przez Xu i in. [114], w którym aerozol olejowy transportowano poprzez system wewnętrznego

podawania płynu obróbkowego przez narzędzie. W roli materiału obrabianego wykorzystano kompozyt CFRP oraz stop tytanu Ti6Al4V. Oprócz chłodzenia metodą MQL zastosowano również obróbkę na sucho, zestawiając wyniki otrzymane dla obu warunków chłodzenia. Naukowcy wskazali, że wspomniany kompozyt wykazywał zdolność do wchłaniania kropeł oleju, przez co utworzenie w strefie kontaktu wióra i wiertła warstewki tribofilmu stało się niemożliwe. W efekcie doprowadziło to do wzrostu siły osiowej i rozwarstwienia kompozytu. W zestawieniu z obróbką na sucho, metoda MQL nie wykazała pozytywnego wpływu na zużycie narzędzia. Zaobserwowano bowiem zwiększone zużycie adhezyjne oraz dyfuzyjne, a także łuszczenie się powłok przeciwzużyciowych wiertel oraz pęknięcia na krawędziach skrawających, które w tym przypadku zostały uznane za główną przyczynę zużycia wiertła (rys. 1.29).



Rys. 1.29. Morfologia SEM krawędzi skrawającej wiertła pracującej w warunkach:

a) wiertło z powłoką TiAlN – obróbka na sucho; b) wiertło z powłoką diamentową

– obróbka na sucho; c) wiertło z powłoką TiAlN – metoda MQL;

d) wiertło z powłoką diamentową – metoda MQL

opracowanie własne na podstawie [114]

Zhu i in. [115] również zastosowali metodę MQL doprowadzaną kanałami narzędzia. W swoich badaniach przeprowadzili proces wiercenia na stopie aluminium 2024-T351, a jako alternatywne sposoby chłodzenia wykorzystali sprężone powietrze oraz obróbkę na sucho. Autorzy udowodnili, iż zaletą stosowania aerozolu olejowego jest zdolność do skuteczniejszego zmniejszania różnicy temperatur pomiędzy narożem a środkową częścią wiertła (przy ścinie) w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia. Tworzenie narostu oraz adhezja zachodziły intensywnie podczas obróbki na sucho, ingerując w niemal całą krawędź skrawającą, za co odpowiedzialny był brak chłodziwa podczas wiercenia. W przypadku zastosowania metody MQL zaobserwowano jedynie na narzędziu powstanie niewielkich wyszczerbień. Nagaraj i in. [116] uwzględnili w swoich badaniach nie tylko wewnętrzne chłodzenie aerozolem olejowym, ale również obróbkę na sucho i metodę kriogeniczną. Za materiał obrabiany posłużył kompozyt CFRP. Eksperyment przeprowadzony przez naukowców wykazał, iż w przypadku chłodzenia kriogenicznego otrzymano największą (o 36% większą w porównaniu do obróbki na sucho) wartość siły osiowej, za co odpowiadała wytrzymałość materiału na rozciąganie oraz moduł Younga. W efekcie doprowadziło to do wzrostu siły osiowej. W przypadku metody MQL różnica w porównaniu do metody kriogenicznej wynosiła 17,6%, a przyczyną otrzymania takich wartości był fakt, iż dostarczanie płynu obróbkowego przez wiertło odbywało się w górnym kierunku. Miało to negatywny wpływ na swobodny przepływ wiórów, co z kolei spowodowało generowanie większego nacisku, ostatecznie przyczyniając się do otrzymania większych wartości siły osiowej. Podobne wyniki Autorzy otrzymali w przypadku momentu skrawania. Największą wartość zaobserwowano dla chłodzenia kriogenicznego –wzrost wyniósł 15% w porównaniu do obróbki na sucho, natomiast w wyniku zastosowania mgły olejowej wartość tego parametru została zmniejszona o 17%. Autorzy tłumaczą otrzymane wyniki w przypadku MQL smarowaniem strefy skrawania, które przyczyniło się do zmniejszenia tarcia zachodzącego pomiędzy przedmiotem obrabianym a narzędziem. Badania Kuzu i in. [117] polegały na wierceniu żeliwa z grafitem dla trzech różnych sposobów chłodzenia. Wykorzystano aerozol olejowy, obróbkę na sucho oraz chłodzenie sprężonym powietrzem przez kanałki narzędzia. W wyniku dokonanego eksperymentu zaobserwowano, że trwałość narzędzia określana przez ilość wywierconych otworów, była w porównaniu do tradycyjnej obróbki na sucho prawie o połowę większa podczas zastosowania sprężonego powietrza. Podczas dwóch prób uzyskano kolejno 3150 i 2969 otworów (wyniki dla sprężonego powietrza) oraz 1742 i 639 otworów (wyniki dla obróbki na sucho). Zwiększoną liczbę wykonanych otworów

Autorzy tłumaczą skutecznym chłodzeniem i efektywnym odprowadzaniem wiórów podczas chłodzenia sprężonym powietrzem. W przypadku użycia aerozolu olejowego, trwałość wiertła zmniejszyła się, albowiem wynosiła odpowiednio 2570 i 2948. W trakcie obróbki uzyskano wióry o trzech kształtach, określanych przez badaczy jako: trójkątne, prostokątne i spiralne. Wióry trójkątne cechowały się najmniejszym rozmiarem, stąd też ich odprowadzanie ze strefy skrawania było najłatwiejsze. Był to więc najbardziej pożądany kształt wiórów i spośród trzech omawianych warunków chłodzenia, występował najczęściej przy zastosowaniu sprężonego powietrza (66% wszystkich wiórów). Nieco rzadziej (60%) pojawiał się podczas chłodzenia metodą MQL. Dla klasycznej obróbki na sucho, takie wióry stanowiły 52% wszystkich wiórów. Oezkaya i in. [94] podjęli się badań dotyczących zmiany zarówno średnicy kanałów w narzędziu, jak i ciśnienia płynu obróbkowego, który jest nimi doprowadzany, na jakość wywierconych otworów oraz trwałość wiertła. Materiałem obrabianym w tym eksperymencie był stop niklu Inconel 718. Autorzy w trakcie badań wspierali się modelowaniem numerycznym symulacji obliczeniowej dynamiki płynów (CFD - Computational Fluid Dynamics) Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że strumień natężenia przepływu masowego płynu obróbkowego nie wpłynął w żaden sposób na polepszenie ww. monitorowanych parametrów. Zmiana średnicy kanałów wewnątrz narzędzia również nie wiązała się z pozytywnym wpływem, albowiem nie zaobserwowano redukcji obciążeń termicznych. Naukowcy podkreślają, iż jakość wywierconych otworów oraz trwałość narzędzia mogły zatem ulec poprawie jedynie w wyniku zwiększenia ciśnienia chłodziwa. Tasdelen i in. [118] dokonali zestawienia chłodzenia sprężonym powietrzem, aerozolem olejowym oraz emulsją, dostarczanych w każdym przypadku przez wewnętrzne kanały narzędzia. Obróbka obejmowała wiercenie krótkich otworów w stali utwardzanej wydzieleniowo, a jej efekty wykazały, że zarówno aerozol olejowy jak i sprężone powietrze, są w stanie zmniejszyć zużycie narzędzia w porównaniu do zastosowanej emulsji. Z kolei na podstawie pomiarów parametrów  $Ra$  oraz  $Rz$  zaobserwowano, że pomimo niewielkich różnic w ich wartościach, najlepszą jakość powierzchni zapewniła zarówno metoda MQL jak i chłodzenie emulsją. Sprężone powietrze w tym wypadku skutkowało występowaniem nalepień materiału obrabianego wewnątrz wywierconych otworów, a ponadto zaobserwowano również płynięcie boczne. Najkorzystniejszym kształtem wiórów charakteryzowała się obróbka w obecności aerozolu olejowego i sprężonego powietrza. W przypadku emulsji otrzymane wióry cechowały się bowiem zwiększoną długością.

Yi i in. [119] w przeprowadzonym badaniu wykorzystali chłodziwo wzbogacone tlenkiem grafenu. Eksperyment oparto na wierceniu stopu tytanu Ti6Al4V, a jego efekty zestawiono z rezultatami wynikającymi z zastosowania tradycyjnego płynu obróbkowego. Sposób dostarczania cieczy chłodząco-smarującej w obu przypadkach opierał się na zewnętrznym transporcie do strefy skrawania. Naukowcom udało się wykazać, iż w porównaniu do konwencjonalnego chłodziwa, płyn obróbkowy zawierający tlenek grafenu zapewnił obniżenie wartości siły osiowej podczas wiercenia o 17,21%. Z kolei parametr chropowatości *Ra* został zredukowany o 15,1%. Oprócz tego tlenek grafenu zawarty w cieczy chłodząco-smarującej odpowiedzialny był również za ograniczenie występowania termicznych pęknięć, którymi charakteryzowały się otwory po skrawaniu w warunkach chłodzenia konwencjonalnym płynem obróbkowym.

### **1.3.8. Wiercenie na sucho**

W związku z rosnącą świadomością ekologiczną i badaniami dotyczącymi metod chłodzenia przyjaznych dla środowiska, najbardziej ekologiczną metodą w dalszym ciągu pozostaje obróbka na sucho. Proces bez konieczności stosowania cieczy chłodząco-smarujących wiąże się ze zmniejszeniem kosztów związanych z ich zakupem, przechowywaniem i utylizacją. Dodatkowo operatorzy maszyn mogą uniknąć kontaktu ze szkodliwymi substancjami chemicznymi, które są często zawarte w płynach obróbkowych. Wiercenie na sucho może być czasami szybsze, ponieważ brak chłodziwa nie wymaga czasu na aplikację i oczekiwanie na jego oddziaływanie, a także ułatwia utrzymanie czystości w strefie roboczej.

Aby umożliwić wiercenie na sucho bez konieczności używania cieczy chłodząco-smarującej, można zastosować różnego rodzaju powłoki narzędzi skrawających oraz ukształtowanie narzędzia. Powłoki mają na celu zmniejszenie tarcia, generacji ciepła i zużycia narzędzia, co pozwala na bardziej wydajne wiercenie na sucho. Ważne jest wówczas, aby zwrócić uwagę na konkretne wymagania obróbki, rodzaj materiału, prędkości skrawania i inne czynniki, podczas wyboru odpowiedniej powłoki dla narzędzi. Do najczęściej stosowanych powłok należy zaliczyć [87]:

a) TiN (azotek tytanu z charakterystycznym złotawym kolorem) – chroni narzędzie przed tarcie i korozją oraz redukuje generację ciepła;

b) TiCN (węglikoazotek tytanu) – łączy właściwości tytanu z dodatkiem węgliku azotku, co zwiększa twardość powłoki, co poprawia trwałość narzędzia podczas wiercenia na sucho;

c) TiAlN (glinkoazotek tytanu) – jest bardziej zaawansowaną wersją powłoki TiN. Ma znacznie wyższą twardość i odporność na wysokie temperatury, co jest korzystne podczas wiercenia na sucho.

d) powłoki z węglików: TiC (węglik tytanu) lub WC (węglik wolframu), są wyjątkowo twarde i odporne na ścieranie. Mogą być stosowane w przypadkach, gdy wiercenie na sucho wymaga dużego oporu na zużycie;

e) powłoki z nanokrystalicznych diamentów (DLC): Powłoki DLC charakteryzują się wyjątkową twardością i niskim współczynnikiem tarcia. Mogą być stosowane do wiercenia na sucho w trudnych warunkach, gdzie inne powłoki mogą ulegać uszkodzeniom;

f) powłoki ceramiczne, takie jak z materiałów tlenkowych, mogą być stosowane do zmniejszenia tarcia i ciepła podczas wiercenia na sucho;

g) powłoki wielowarstwowe, które łączą różne materiały, aby uzyskać optymalne właściwości, takie jak twardość, odporność na ciepło i tarcie.

Pomimo licznych badań w wielu przypadkach obróbka na sucho podczas wiercenia nie jest możliwa do zastosowania, w szczególności dla materiałów trudnoskrawalnych, a w szczególności dotyczy to stali nierdzewnych, stopów tytanu i niklu, stopów aluminium oraz tworzyw sztucznych. Wiercenie w tych materiałach bez chłodzenia może prowadzić do przegrzania narzędzia i złej jakości otworów a w przypadku aluminium i jego stopów, materiał ten ma tendencję do tworzenia długich opiłków, które mogą łatwo ulegać sklejeniu. Chłodzenie pomaga w łamaniu tych opiłków i utrzymaniu ich oddzielonych.

### **1.3.9. Wnioski dotyczące stanu wiedzy o właściwościach użytkowych**

W wyniku przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono jak ważnym zagadnieniem jest wybór odpowiedniej metody chłodzenia podczas wiercenia. Szeroki zakres badań, które zostały przedstawione powyżej dotyczące w głównej mierze ekologicznych metod chłodzenia w obróbce skrawaniem uzasadniają dalsze prace naukowe, które mają na celu zwiększenie wiedzy na temat zjawisk fizyczno-chemicznych zachodzących w strefie skrawania wykorzystujących metodę zminimalizowanego smarowania.

Naukowcy udowodnili, że w wielu przypadkach metoda MQL powoduje zmniejszenie siły skrawania, chropowatości powierzchni obrobionej, zużycia narzędzia oraz wpływa na

uzyskanie korzystniejszego kształtu wióra ze względu na odprowadzanie go ze strefy skrawania. Dodatkowo wykazano pozytywne oddziaływanie na środowisko i zdrowie operatorów obrabiarek.

Jednak w celu prawidłowego wykorzystania metody minimalizowanego smarowania podczas wiercenia bardzo ważny jest dobór odpowiednich parametrów tworzenia aerozolu: natężenie przepływu powietrza i cieczy chłodząco-smarujących, średnica i kształt kanałów wewnątrz narzędzia. W większości przypadków stwierdzono, że większe wartości natężenia przepływu powietrza powodują mniejsze krople, które lepiej penetrują strefę skrawania. Wydatek natężenia przepływu cieczy chłodząco-smarującej oraz powietrza też ma duże znaczenie ze względu na turbulencję zachodzącą w strudze aerozolu i różne zjawiska powstające w kanałach wewnętrznych narzędzia, którymi dostarczane są do strefy skrawania. Naukowcy w wielu pracach wykonywali również badania symulacyjne, które ułatwiały im wytłumaczenie wielu zjawisk zachodzących podczas stosowania metody zminimalizowanego smarowania.

W trakcie analizy literatury stwierdzono bardzo mało publikacji dotyczących obróbki nowego stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$ , który dzięki swoim właściwościom znalazł szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym. W niniejszej rozprawie doktorskiej połączono badania symulacyjne z badaniami doświadczalnymi podczas obróbki wybranego stopu aluminium z dużymi prędkościami obrotowymi, które są ważne w przemyśle ze względu na wydajność i efektywność obróbki oraz podczas obróbki materiałów miękkich.

Ponadto prace naukowe podkreśliły również znaczenie drgań narzędzia, które odgrywają dużą rolę zwłaszcza podczas obróbki lekkich materiałów. Stanowi to więc kolejny aspekt naukowy, który należy dokładnie rozpatrzyć.



## **2. , CEL, ZAKRES I HIPOTEZA PRACY**

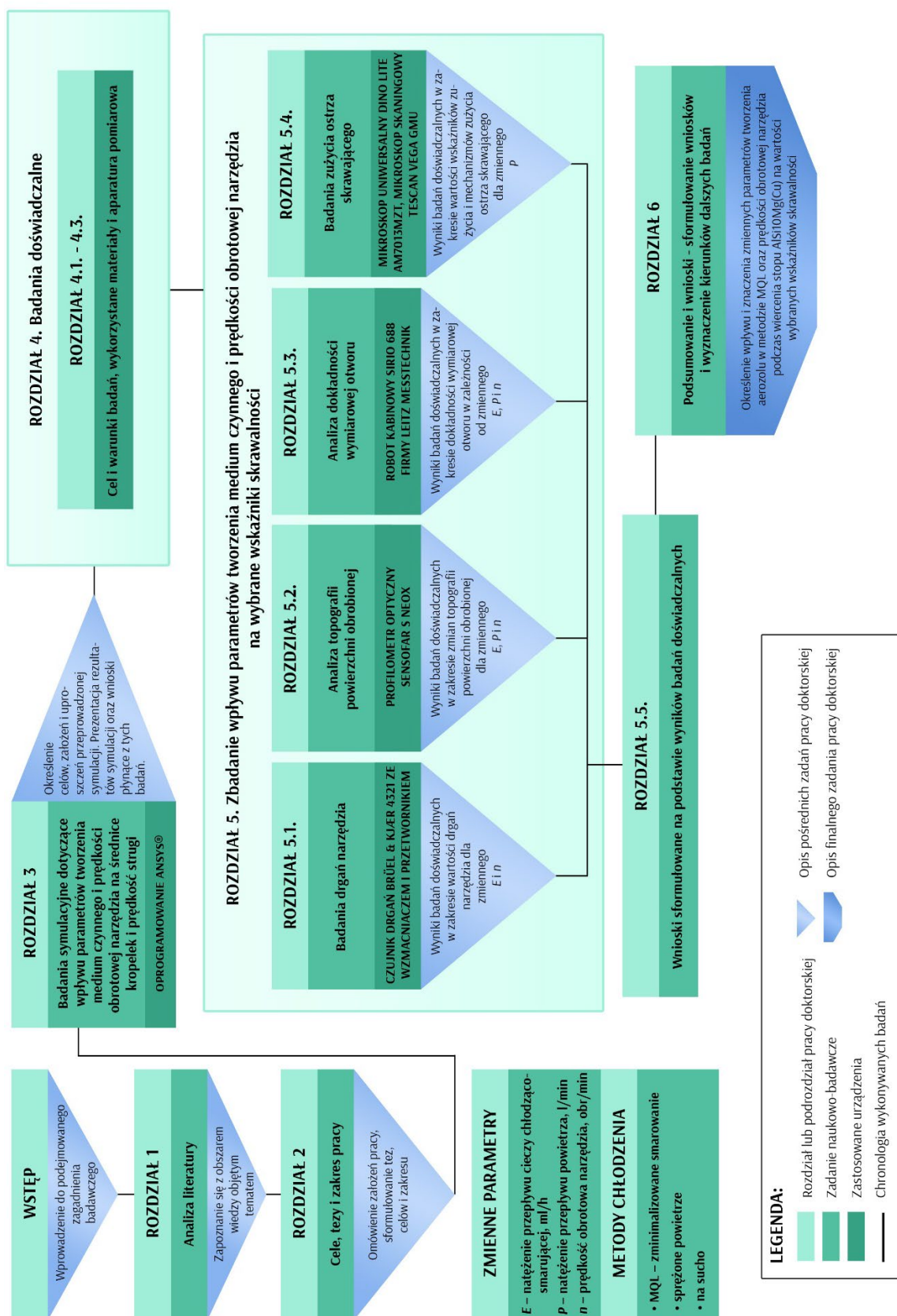
### **2.1. Elementy nowości w pracy**

W niniejszej pracy elementem nowości jest zastosowanie badań symulacyjnych w celu określenia zachowania się strugi wewnątrz kanałów doprowadzających medium czynne do strefy skrawania w zależności od warunków tworzenia aerozolu olejowego w metodzie zminimalizowanego smarowania. Badania przeprowadzono zarówno w zależności od zmiany konstrukcji pochylenia kanałów jak również prędkości obrotowej wiertła oraz natężenia przepływu objętościowego cieczy chłodząco-smarującej i natężenia przepływu objętościowego powietrza. Przedstawione wyniki badań doświadczalnych wybrano ze względu na najważniejsze informacje dotyczące wykonania otworów w głowicy samochodowej ze stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  w zakresie wiercenia z dużymi prędkościami obrotowymi 6000 – 8000 obr/min: drgania narzędzia, topografia powierzchni obrobionej, dokładność wymiarowa otworu i zużycie narzędzia.

### **2.2. Cel i zakres pracy**

Na podstawie analizy literaturowej przeprowadzonej w rozdziale pierwszym stwierdzono, że zastosowanie metody zminimalizowanego smarowania ze względu na korzystne oddziaływanie ekologiczne oraz właściwości użytkowe znajduje coraz szersze zastosowanie w obróbce skrawaniem. Mimo wielu prac naukowych dotyczących zastosowania metody MQL podczas wiercenia, nie rozwiązano problemów dotyczących zjawisk zachodzących w strefie ostrze skrawające–materiał obrabiany ze względu na zachowanie się aerozolu w kanałach narzędzia.

Podawanie cieczy chłodząco-smarującej w metodzie zminimalizowanego smarowania jest niewystarczająco zbadane zarówno pod względem kinematyki strugi medium czynnego jak również i ich analizy pod względem podawania ilości cieczy chłodząco-smarującej ze względu na dokładność wymiarową otworu, topografii powierzchni oraz czynników związanych z pracą wiertła jak zużycie i drgania narzędzia. Schemat zakresu pracy przedstawiono rys. 2.1.



Rys. 2.1. Zakres rozprawy doktorskiej w postaci schematu

W związku z powyższym sformułowano dwa główne cele pracy doktorskiej:

#### **Cel poznawczy**

Celem poznawczym pracy jest analiza wielkości kropeł w strudze aerozolu, ich torów przemieszczania oraz turbulencji wewnątrz kanałów wiertła, jak również w strefie skrawania i w rowkach wiórowych dla zmiennych pochyłeń otworów wylotowych kanałów, prędkości obrotowej narzędzia, natężenia zmiennego objętościowego powietrza oraz natężenia masowego cieczy chłodząco-smarującej.

#### **Cel użytkowy**

Głównym praktycznym celem tej pracy jest określenie praktycznych wskazówek dotyczących wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu). Analizowane będą głównie wartości prędkości obrotowej narzędzia oraz wartości parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania w aspekcie generowań drgań i zużycia narzędzia a także kształtowania topografii powierzchni obrobionej oraz dokładności wymiarowej wykonanego otworu.

### **2.3. Hipoteza naukowa**

Ustalenie problemu naukowego, wynikającego z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy zarówno w literaturze krajowej jak i światowej, oraz badań własnych przeprowadzanych w firmie Stammsitz Gühring KG i Volkswagen Motor Polska uzasadniają celowość podjęcia badań o charakterze poznawczym i użytkowym. Obszarem o szczególnie istotnym znaczeniu jest dobór warunków tworzenia aerozolu medium czynnego w metodzie zminimalizowania smarowania. Hipoteza naukowa została sformułowana następująco:

I. Dobór odpowiednich parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania wpłynie korzystnie na zachowanie strugi i zmniejszenie turbulencji podczas wiercenia z dużymi prędkościami obrotowymi podczas obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu), umożliwiając poprawę wskaźników skrawalności wyrażonych topografią powierzchni obrobionej, dokładnością wymiarową otworu oraz zużyciem i drganiami narzędzia.



### **3. BADANIA SYMULACYJNE PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH I WYJŚCIOWYCH TWORZENIA AEROZOLU W METODZIE ZMINIMALIZOWANEGO SMAROWANIA PODCZAS WIERCENIA**

Obliczeniowa dynamika płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) jest narzędziem do rozwiązywania złożonych problemów naukowych i przemysłowych związanych z mechaniką płynów i wymianą ciepła. Wiedza w tym zakresie staje się z pewnością bardzo przydatna zarówno dla praktykujących inżynierów jak i naukowców, którzy nieustannie stają w obliczu ekstremalnych wyzwań związanych z opracowywaniem rozwiązań problemów przepływu płynów i wymiany ciepła bez uprzedniej znajomości podstawowych pojęć i fundamentalnego zrozumienia mechaniki płynów i wymiany ciepła.

#### **3.1. Cel i zakres badań symulacyjnych**

Analiza przepływu medium czynnego polega na modelowaniu drobin cieczy chłodząco-smarującej wewnątrz kanałów wiertła oraz w wierconym otworze niesionych poprzez przepływające powietrze. Celem przeprowadzenia badań symulacyjnych było uzyskanie informacji, które umożliwiłyby dobór najkorzystniejszych wariantów, pod względem przepływu powietrza oraz cieczy chłodząco-smarującej w rozpatrywanym układzie. Symulacja została przeprowadzona dla różnych wariantów:

- trzech prędkości obrotowych wiertła,
- czterech strumieni masowych oleju niesionego fazą ciągłą,
- trzech wariantów geometrycznych kanałów we wnętrzu wiertła,
- trzech strumieni objętościowych powietrza wypływającego z wnętrza wiertła.

Analiza wyników różnych symulacji może uprościć proces wyboru optymalnej konfiguracji badanego układu, eliminując potrzebę przeprowadzania identycznych eksperymentów w warunkach rzeczywistych. Kolejnym celem badań symulacyjnych było dostarczenie wizualnej reprezentacji dwufazowego przepływu cieczy chłodząco-smarującej i powietrza w złożonym układzie dostarczania aerozolu medium czynnego, przy założeniu użycia systemu dwukanałowego w metodzie MQL.

### 3.2. Opis cech oprogramowania i stanowiska komputerowego użytego do badań symulacyjnych

Badania symulacyjne były realizowane na stacji roboczej HP Z820 Workstation, wyposażonej w system operacyjny Windows 10 Professional 64 bit oraz specjalistyczny pakiet oprogramowania ANSYS® w wersji 2022 R1. Szczegóły techniczne stacji roboczej zostały podane w tab. 3.1.

Tab. 3.1. Charakterystyka techniczna stanowiska roboczego

| Cecha                          | Specyfikacja                                                         |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Procesor                       | 2x Intel Xeon CPU E5-2690 v2 (6 rdzeni, 12 wątków na każdy procesor) |
| Pamięć operacyjna RAM          | DDR3 128 GB                                                          |
| Układ graficzny                | NVIDIA Quadro NVS 295                                                |
| System operacyjny              | Windows 10 Professional 64-Bit                                       |
| Oprogramowanie do obliczeń CFD | Pakiet oprogramowania ANSYS® w wersji 2022 R1                        |

### 3.3. Założenia i uproszczenia w modelu matematycznym CFD

Uproszczenia i założenia przyjęte w trakcie przeprowadzania symulacji przepływu medium czynnego zostały zestawione w tab. 3.2

Tab. 3.2. Przyjęte założenia i uproszczenia podczas prowadzenia symulacji

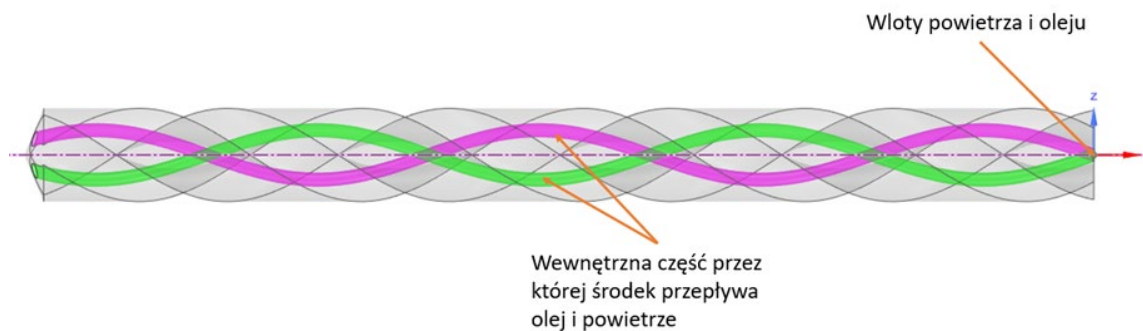
| Założenia                                                                                         | Uproszczenia                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Powietrze to gaz ściśliwy i gaz doskonały                                                         | Modelowanie powietrza jako gazu o zmiennej gęstości          |
| Dynamiczne zjawisko, w którym ciężar powietrza oraz aerozolu występuje w ograniczonych ilościach. | W analizowanej symulacji pominięto wpływ siły grawitacyjnej. |

|                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zjawisko dynamiczne, w którym wymiana ciepła jest nieznacznie istotna.                                     | Zaniechano uwzględnienia wymiany ciepła związanej z promieniowaniem oraz innych źródeł ciepła, takich jak tarcie.                                                                                                       |
| Należy uwzględnić różne prędkości obrotowe wiertła                                                         | Obliczenia prowadzone dla różnych prędkości obrotowych wiertła: 6000, 7000 oraz 8000 obr./min                                                                                                                           |
| Należy uwzględnić stosowane warianty geometryczne wiertła                                                  | Obliczenia prowadzone dla różnych wariantów geometrycznych wiertła: standardowych kanałach we wnętrzu oraz wariantach, gdzie końcówka kanałów jest rozchylona odpowiednio 5 stopni do wnętrza oraz 5 stopni na zewnątrz |
| Wszystkie zjawiska zachodzą głównie w cieczy chłodząco-smarującej                                          | Pominięto objętości ciał stałych;                                                                                                                                                                                       |
| Ciecz chłodząco-smarująca nie ulega parowaniu, zostaje rozproszona na małe cząstki o niewielkiej średnicy. | Ciecz chłodząco-smarująca modelowana jako cząstki fazy dyskretnej DPM;                                                                                                                                                  |
| Otoczenie nie ma wpływu na ruch powietrza oraz rozpraszanie aerozolu medium czynnego.                      | W analizie uwzględniono jedynie objętość otoczenia w postaci powietrza bez przeszkód.                                                                                                                                   |
| Pod wpływem przepływu, cząsteczki cieczy chłodząco-smarującej mogą ulegać rozbiciu oraz łączeniu się.      | Wykorzystanie modelu interakcji cząstek, sklejanie i rozpadu.                                                                                                                                                           |
| Cząstki cieczy chłodząco-smarującej mogą oddziaływać na występowanie turbulencji w trakcie symulacji.      | Zastosowanie modelu dwukierunkowego sprzężenia przepływu z fazą dyskretną                                                                                                                                               |

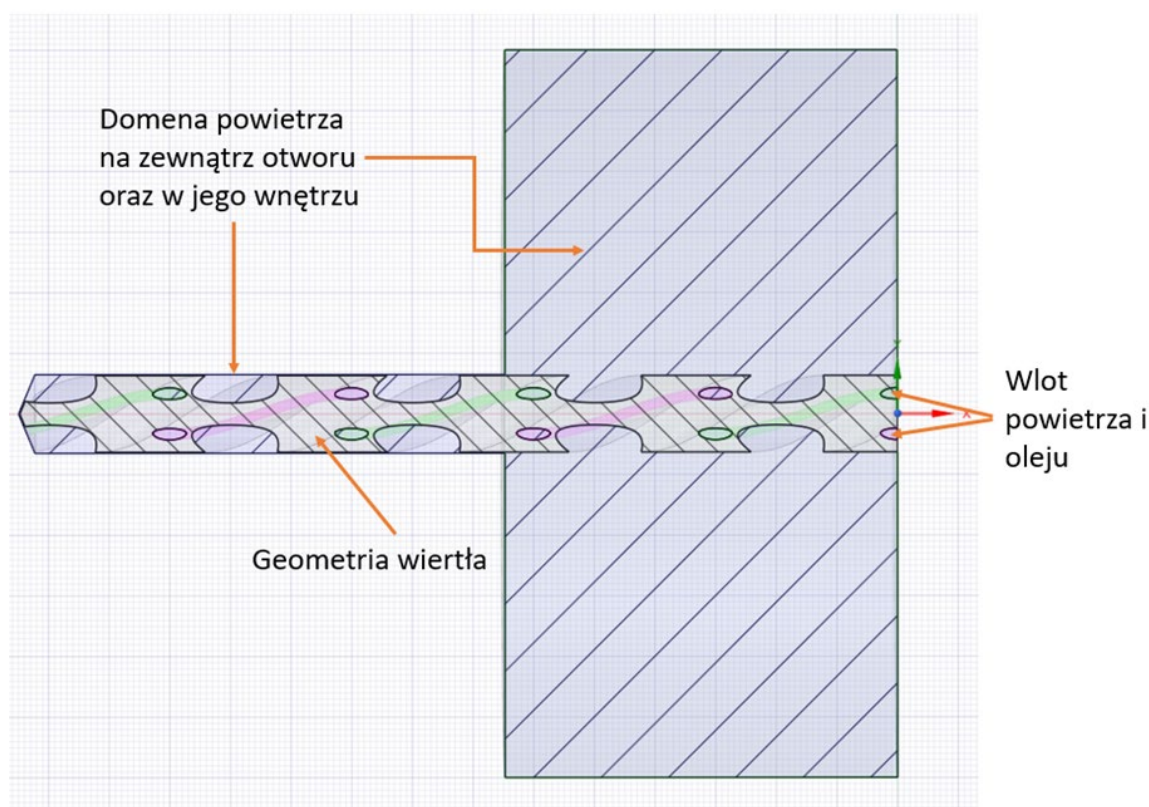
### 3.4. Opis geometrycznego układu objętego modelem symulacyjnym

Schemat układu użytego w symulacji został wcześniej przygotowany w oprogramowaniu zewnętrznym AutoCAD, a następnie zapisany w formacie STP, co umożliwiło otwarcie go w programie ANSYS SpaceClaim, będącym modulem w ramach środowiska ANSYS Workbench.

Na rys. 3.1 oraz 3.2 przedstawiono dwa widoki modelowanego układu. Rys. 3.1 przedstawia widok z przodu na model, natomiast rys. 3.2 widok z boku na przekrój przez środek układu.



Rys. 3.1. Trójwymiarowa geometria wiertła zaimportowana w środowisku ANSYS Spaceclaim



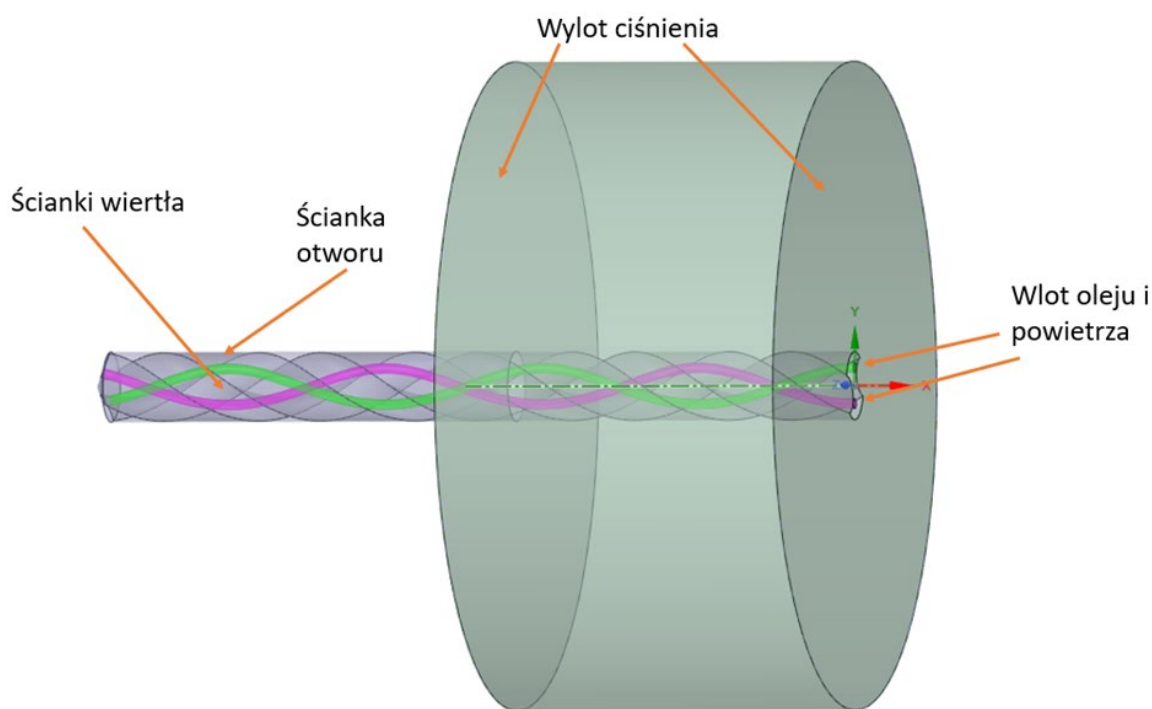
Rys. 3.2. Przekrój przez środek modelu przygotowanego w środowisku ANSYS Spaceclaim

Oprogramowanie ANSYS Spaceclaim Direct Modeller jest narzędziem służącym do prawidłowego przygotowania geometrii do obliczeń numerycznych. Geometria przygotowana na potrzeby symulacji w kolejnym kroku musi przejść proces dyskretyzacji. Ma to na celu poprawne przeprowadzenie badań symulacyjnych, ponieważ wykonać je można tylko na geometrii pozbawionej błędów, które są częstym zjawiskiem przy importowaniu plików utworzonych w innych środowiskach.

Założono brak wpływu ciał stałych oraz otoczenia podczas symulacji, dlatego wnętrze wiertła zostało wypełnione domeną płynu, a samo wiertło pominięto. Przyjęto kształt

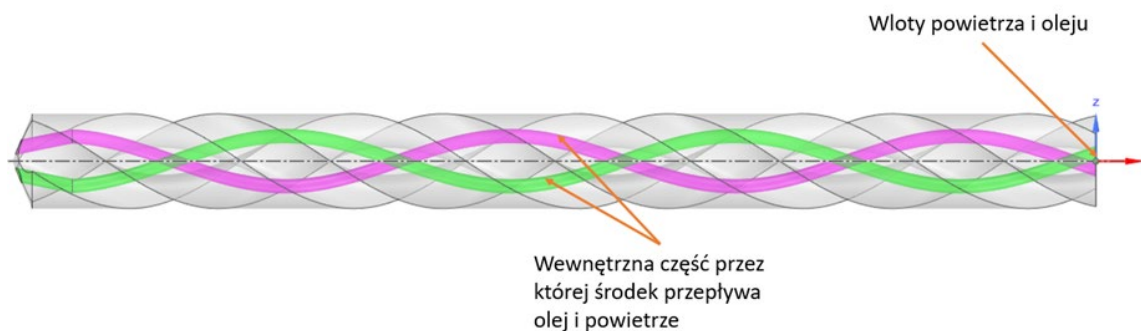


domeny otoczenia między dyszą, a ścianką omywaną jako walec o osi takiej samej jak dysza i średnicy wynoszącej 0,12 metra. Wysokość walca, którą można równocześnie określić jako odległość wylotu z domeny od otworu, w którym znajduje się wiertło, została określona jako pierwszy wariant geometryczny symulacji. Wariant geometryczny wraz z opisanymi warunkami brzegowymi został przedstawiony na rys. 3.3 i wynosi 0,0647 m.

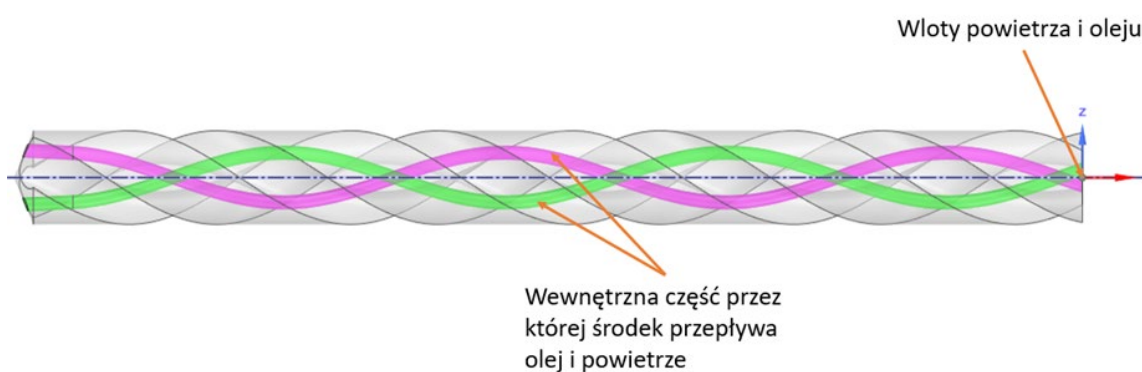


*Rys. 3.3. Trójwymiarowa geometria domeny medium czynnego przygotowana do symulacji modelowania jego przepływu przy wierceniu*

Na rys. 3.4 oraz 3.5 przedstawiono dwa warianty geometryczne modelowanego układu. Rys. 3.4 przedstawia widok z przodu na model, w którym końcówki dyszy zostały skierowane o  $5^\circ$  do osi narzędzia do wewnątrz, natomiast rys. 3.5 przedstawia widok z przodu na model, w którym końcówki dyszy są skierowane o  $5^\circ$  do osi narzędzia na zewnątrz.



*Rys. 3.4. Trójwymiarowa geometria wiertła zaimportowana w środowisku ANSYS Spaceclaim z pochyleniem kanałów o  $5^\circ$  do wewnątrz osi wiertła*



*Rys. 3.5. Trójwymiarowa geometria wiertła zaimportowana w środowisku ANSYS Spaceclaim z pochyleniem kanałów o  $5^\circ$  na zewnątrz do osi wiertła*

### 3.5. Dyskretyzacja modelu geometrycznego

Następnym etapem w procesie przygotowania modelu była jego dyskretyzacja, czyli podział na elementy skończone. Do tego celu wykorzystano program ANSYS Fluent Mesher. Geometria układu została rozbita na elementy o tym samym typie (ang. Polyhedra), lecz o różnej wielkości. Wybór takiego rodzaju siatki pozwolił na utworzenie elementów o wysokiej jakości ortogonalnej przy stosunkowo niewielkiej liczbie elementów, co z kolei przyczyniło się do ograniczenia czasu obliczeń symulacyjnych.

Dla wybranych wariantów geometrycznych utworzono modele o opisanych właściwościach siatki, lokalnych i globalnych zagęszczeniach oraz warstwach przyściennych (tab. 3.3).

Tab. 3.3. Właściwości siatki oraz zagęszczeń modelu geometrycznego

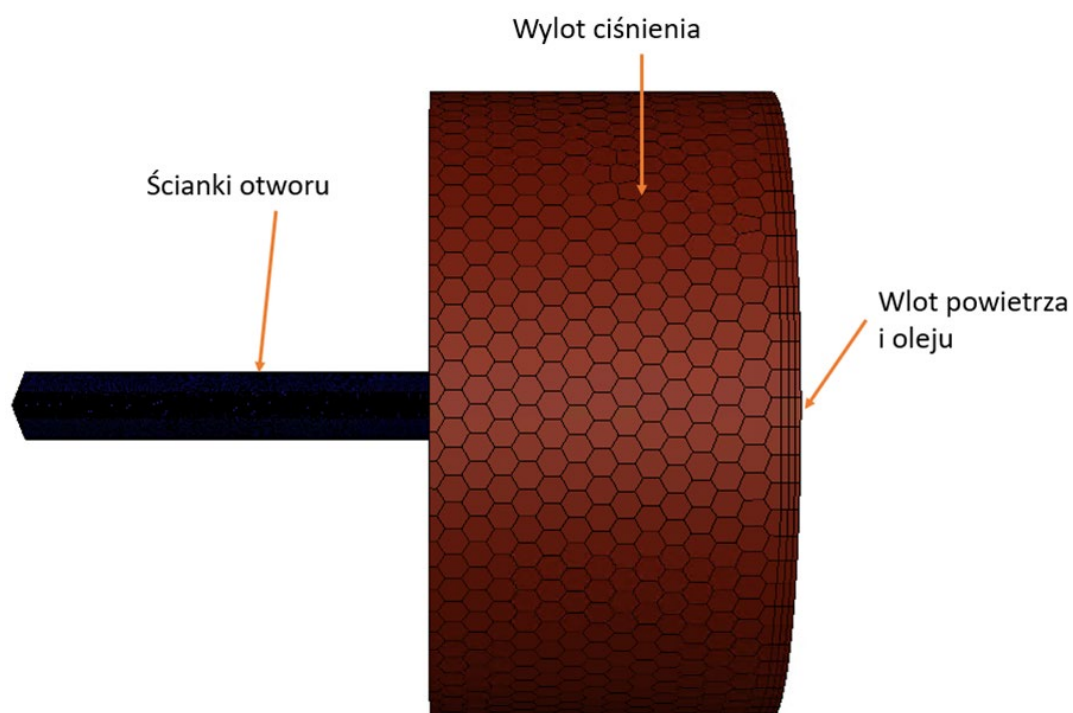
| Nazwa cechy opisującej siatkę                                                                                                           | Wartość                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Wielkość elementów na powierzchni wiertła w otworze oraz jego wnętrzu, oraz na powierzchni ścianek otworu (zagęszczenie na powierzchni) | 0,15 mm                 |
| Wielkość elementów w miejscach, gdzie ścianki modelu są blisko siebie (zagęszczenie typu 'Proximity')                                   | od 0,0141 mm do 0,25 mm |
| Najniższa ogólna skala elementów siatki                                                                                                 | 0,1 mm                  |
| Najwyższa ogólna skala elementów siatki                                                                                                 | 0,5 mm                  |
| Zmiana rozmiaru elementów siatki                                                                                                        | 1,2                     |
| Funkcja wielkości                                                                                                                       | Krzywizna elementu      |
| Kąt normalny dla funkcji krzywizn                                                                                                       | 18°                     |
| Liczba elementów w warstwie granicznej, tzw. przyściennej                                                                               | 3                       |
| Zwiększenie rozmiaru elementów w warstwie przyściennej                                                                                  | 1,2                     |
| Typ siatki objętościowej                                                                                                                | Polyhedra               |

Siatki minimalnie różnią się wyłącznie liczbą elementów skończonych, co jest skutkiem różnej objętości wariantów geometrycznych (tab. 3.4).

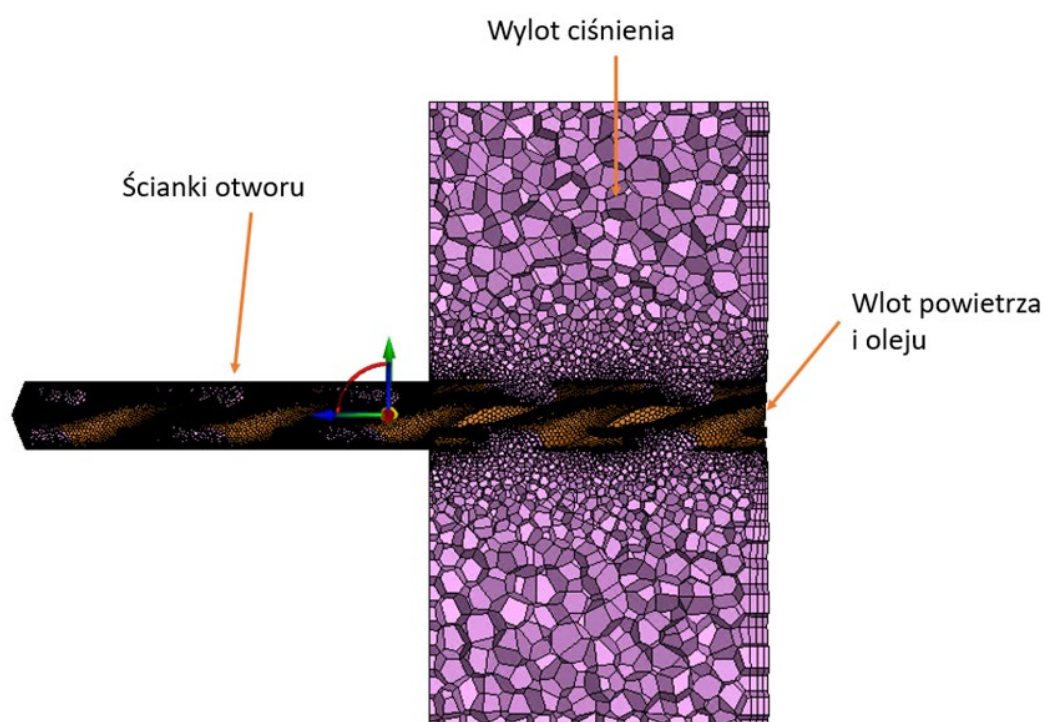
Tab. 3.4. Liczba elementów skończonych w różnych odmianach geometrycznych

| Wariant geometryczny siatki              | Liczba elementów siatki | Minimalna jakość ortogonalna |
|------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Standardowa geometria                    | 1121982                 | 0,1                          |
| Końcówki dyszy odchylone do środka o 5°  | 1048051                 | 0,1                          |
| Końcówki dyszy odchylone do wnętrza o 5° | 1027775                 | 0,1                          |

Widok na siatkę powierzchniową w zależności od wariantu geometrycznego położenia kanałów względem osi wiertła przedstawiono na rys. 3.6–3.12.

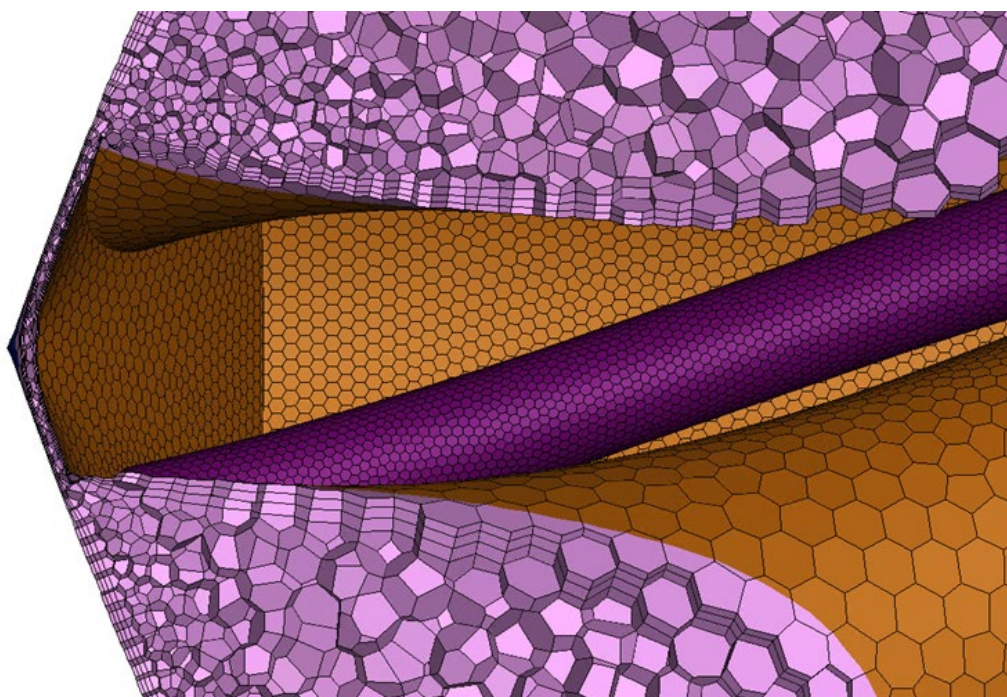


Rys. 3.6. Widok na siatkę powierzchniową na zewnątrz dla wszystkich wariantów geometrycznych

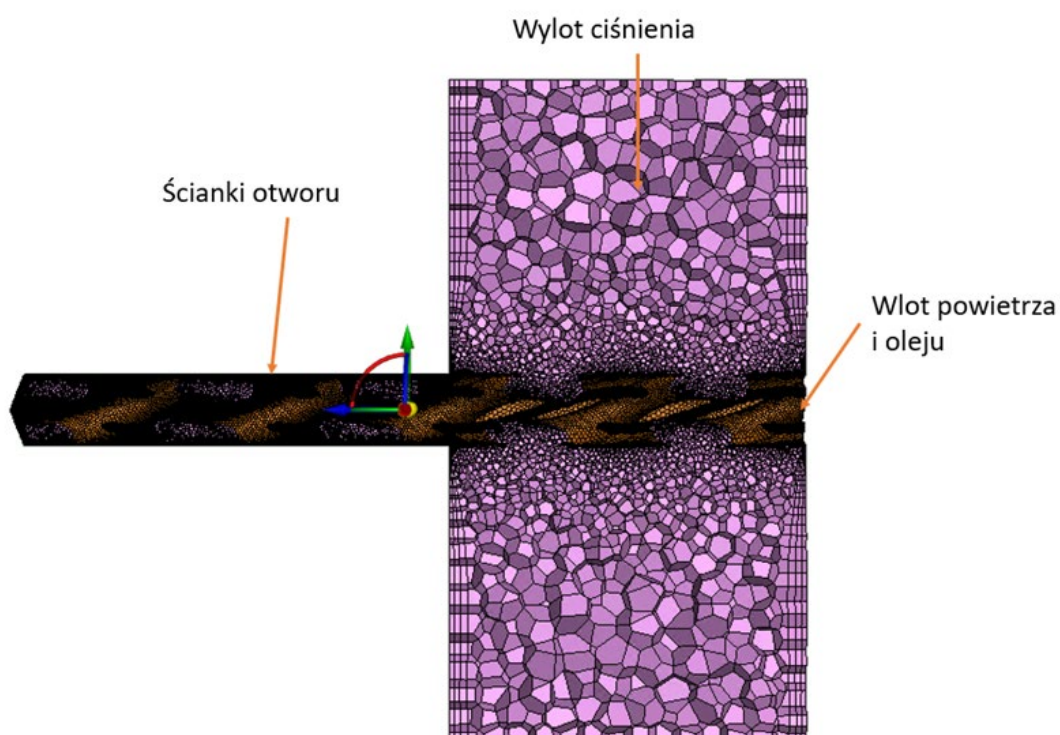


Rys. 3.7. Obraz przedstawiający przekrój poprzez trójwymiarową siatkę wewnątrz typowego wariantu geometrycznego

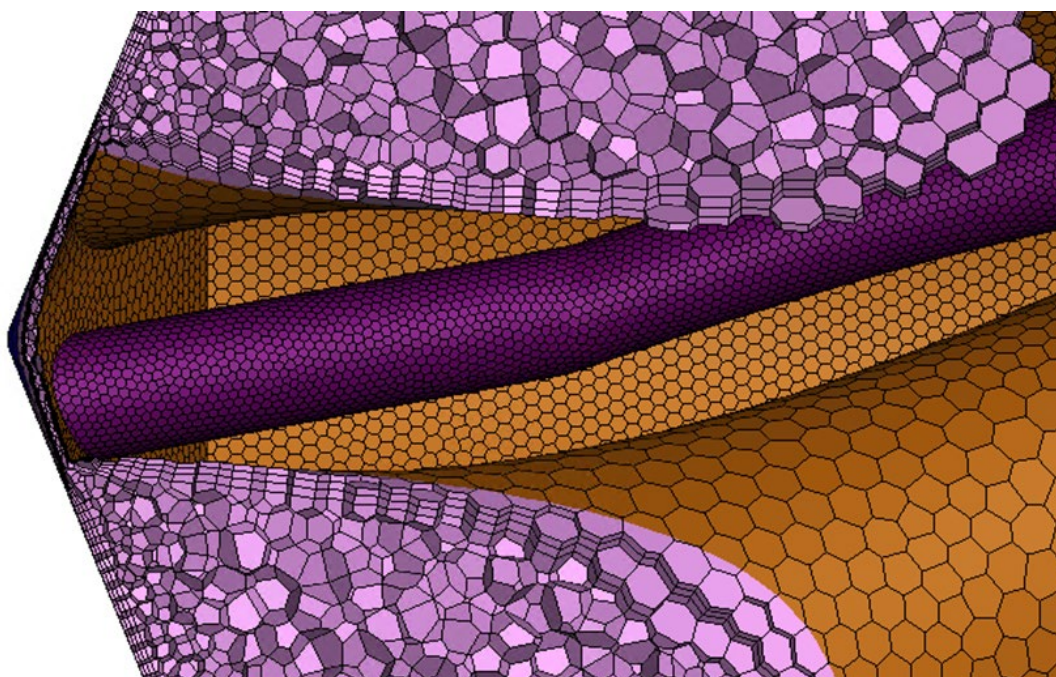




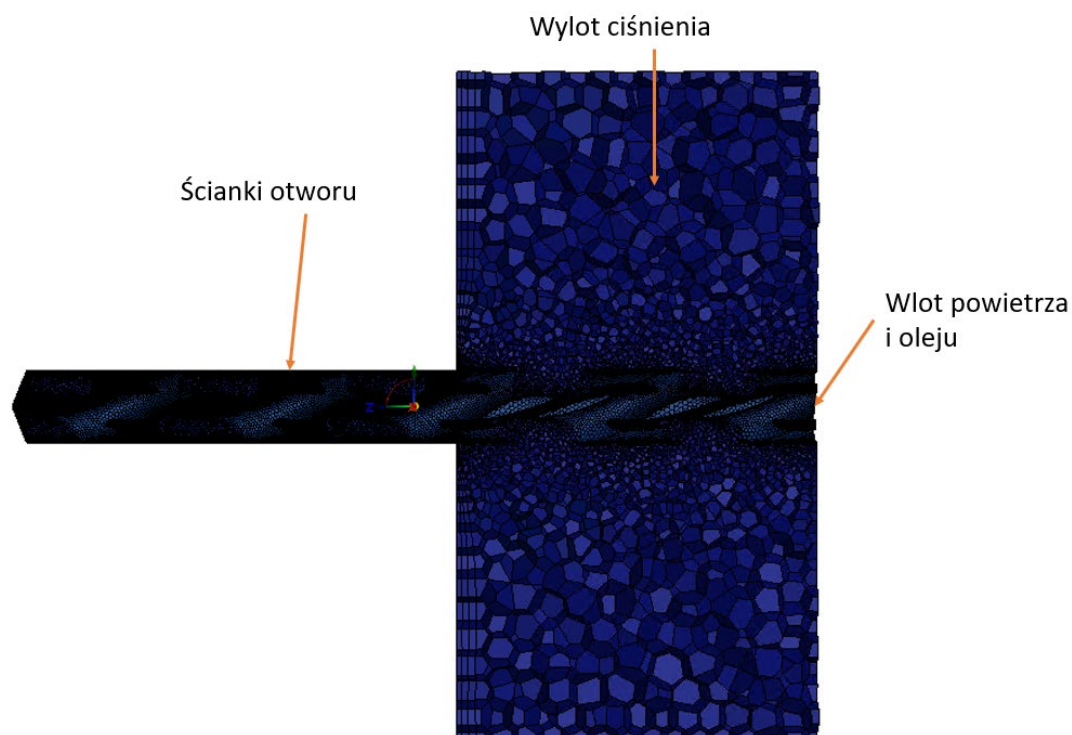
Rys. 3.8. Przedstawienie wirtualnego zagęszczenia na przekroju poprzez trójwymiarową siatkę w standardowym wariancie geometrycznym



Rys. 3.9. Widok na przekrój przez siatkę objętościową wewnątrz wariantu geometrycznego, gdzie końcówki kanałów wiertła zostały odchylone o  $5^\circ$  od osi narzędzia w kierunku wewnętrznym

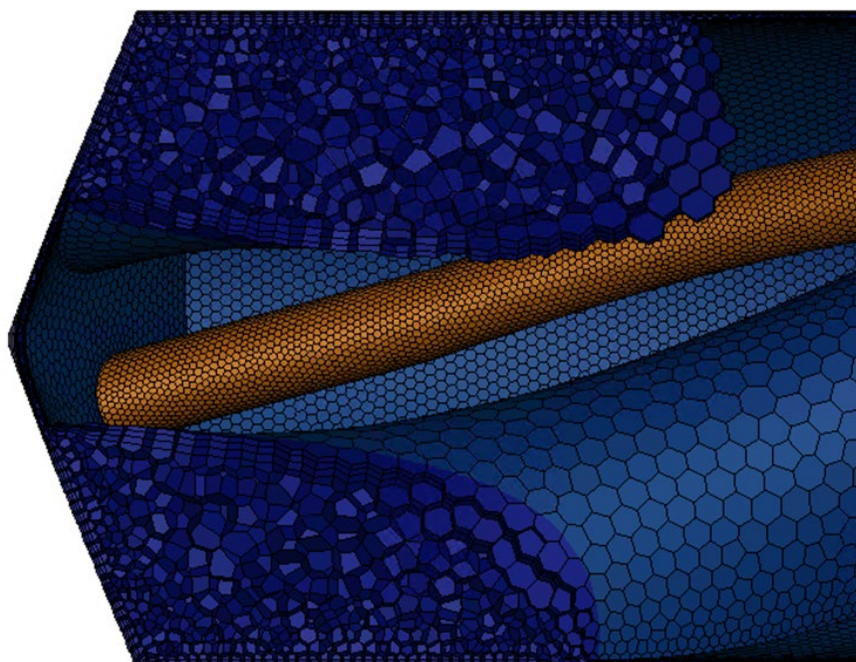


Rys. 3.10. Widok na wirtualne zagęszczenie na przekroju przez siatkę objętościową wewnątrz wariantu geometrycznego, gdzie końcówki kanałów wiertła zostały odchylone o  $5^\circ$  od osi narzędzia w kierunku wewnętrznym



Rys. 3.11. Widok na przekrój przez siatkę objętościową wewnątrz wariantu geometrycznego, gdzie końcówki kanałów wiertła zostały odchylone o  $5^\circ$  od osi narzędzia w kierunku zewnętrznym





*Rys. 3.12. Widok na wirtualne zagęszczenie na przekroju przez siatkę objętościową wewnątrz wariantu geometrycznego, gdzie końcówki kanałów wiertła zostały odchylone o 5° od osi narzędzia w kierunku zewnętrznym*

### 3.6. Charakterystyka środowiska przebiegu symulacji

Utworzony w programie ANSYS Fluent Meshing model dyskretny w kolejnym kroku został zaimportowany do programu ANSYS Fluent w wersji 2022 R1. W programie ANSYS Fluent wprowadzone zostały warunki symulacji, jak również zainicjowane zostały warunki początkowe w domenach. Właściwości materiałów zastosowanych w symulacji zostały przedstawione w tab. 3.5.

*Tab. 3.5. Charakterystyka materiałów użytych w analizie symulacyjnej*

| Material                  | Model                                                          | Morfologia           |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Powietrze                 | Gaz idealny z biblioteki oprogramowania ANSYS                  | Płyn w fazie ciągłej |
| Ciecz chłodząco-smarująca | Zdefiniowany model o właściwościach przedstawionych w tab. 3.6 | Rozproszony płyn     |

Wielkości fizyczne cieczy chłodząco-smarującej zastosowanej w symulacji jak również w późniejszych badaniach doświadczalnych zostały przedstawione w tab. 3.6.

Tab. 3.6. Właściwości cieczy chłodząco-smarującej

| Wielkość fizyczna       | Wartość | Jednostka              |
|-------------------------|---------|------------------------|
| Gęstość                 | 0,84    | $\frac{g}{cm^3}$       |
| Lepkość dynamiczna      | 0,044   | $\frac{kg}{m \cdot s}$ |
| Napięcie powierzchniowe | 0,035   | $\frac{N}{m}$          |

Ogólne ustawienia charakterystyki i właściwości symulacji zostały przedstawione w tab. 3.7.

Tab. 3.7. Konfiguracja parametrów i właściwości symulacji

| Właściwość                                       | Ustawienie                                                                                                          |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sposób analizy                                   | Badanie w warunkach stałego stanu równowagi                                                                         |
| Interwał czasowy dla cieczy chłodząco-smarującej | Fizyczny krok czasowy: 5e-5 s                                                                                       |
| Model wielofazowy                                | Model fazy dyskretnej DPM dla oleju (ang. <i>Discrete Phase Model</i> ) o właściwościach przedstawionych w tab. 3.8 |
| Warunek przepływu                                | Poddźwiękowy (miejscowo na wylocie z kanału 0,15<Ma<0,9)                                                            |
| Referencyjna wartość ciśnienia                   | 101325 Pa                                                                                                           |
| Model wpływu grawitacji                          | Ominięto wpływ siły grawitacyjnej                                                                                   |
| Stopień intensywności turbulencji                | Średni (intensywność 5%)                                                                                            |
| Model turbulencji                                | k-omega SST                                                                                                         |



Ustawienia i właściwości modelu wielofazowego DPM symulacji zostały przedstawione w tab. 3.8.

*Tab. 3.8. Parametry i charakterystyka modelu DPM.*

| Ustawienie                                                                       | Wartość                       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Oddziaływanie z fazą stałą                                                       | Włączone                      |
| Odstęp pomiędzy iteracjami modelu DPM w trakcie rozwiązywania równań fazy stałej | 1                             |
| Nieustalone śledzenie cząstek                                                    | Włączone                      |
| Dwukierunkowe sprzężanie turbulencji                                             | Włączone                      |
| Kolizje stochastyczne                                                            | Włączone                      |
| Model rozpadu cząstek                                                            | Włączone                      |
| Model łączenia cząstek                                                           | Włączone                      |
| Kierunek wtrysku z wlotu cieczy chłodząco-smarującej                             | Normalny do powierzchni wlotu |

### 3.7. Wyniki badań symulacyjnych

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły uzyskać szereg wyników opisujących charakter modelowanego procesu przepływu medium czynnego na powierzchniach obrobionego otworu oraz wiertła. Efektem tego przepływu będzie również chłodzenie i smarowanie części roboczej wiertła. Ciecz chłodząco-smarująca była podawana w postaci płynu syntetycznego, którego wielkość cząstek ulega zmianie i rozpadowi na wyjściu z kanałów wewnętrznych wiertła. Ustalono, że cząstki w trakcie symulacji mogą się dzielić poprzez rozpadanie lub rozklejanie albo łączyć w trakcie transportu przez kanały wewnętrzne wiertła.

W badaniach symulacyjnych skupiono się na analizie wyników dotyczących rozkładu prędkości na wyjściu z dyszy w funkcji prędkości obrotowej wiertła oraz strumienia strugi na wylocie oraz analizie wyników związanych z wielkością cząstek aerozolu płynu syntetycznego w powietrzu (średnice kropelek), bez analizy akumulacji i sklejanania na omywanych ściankach kanałów.

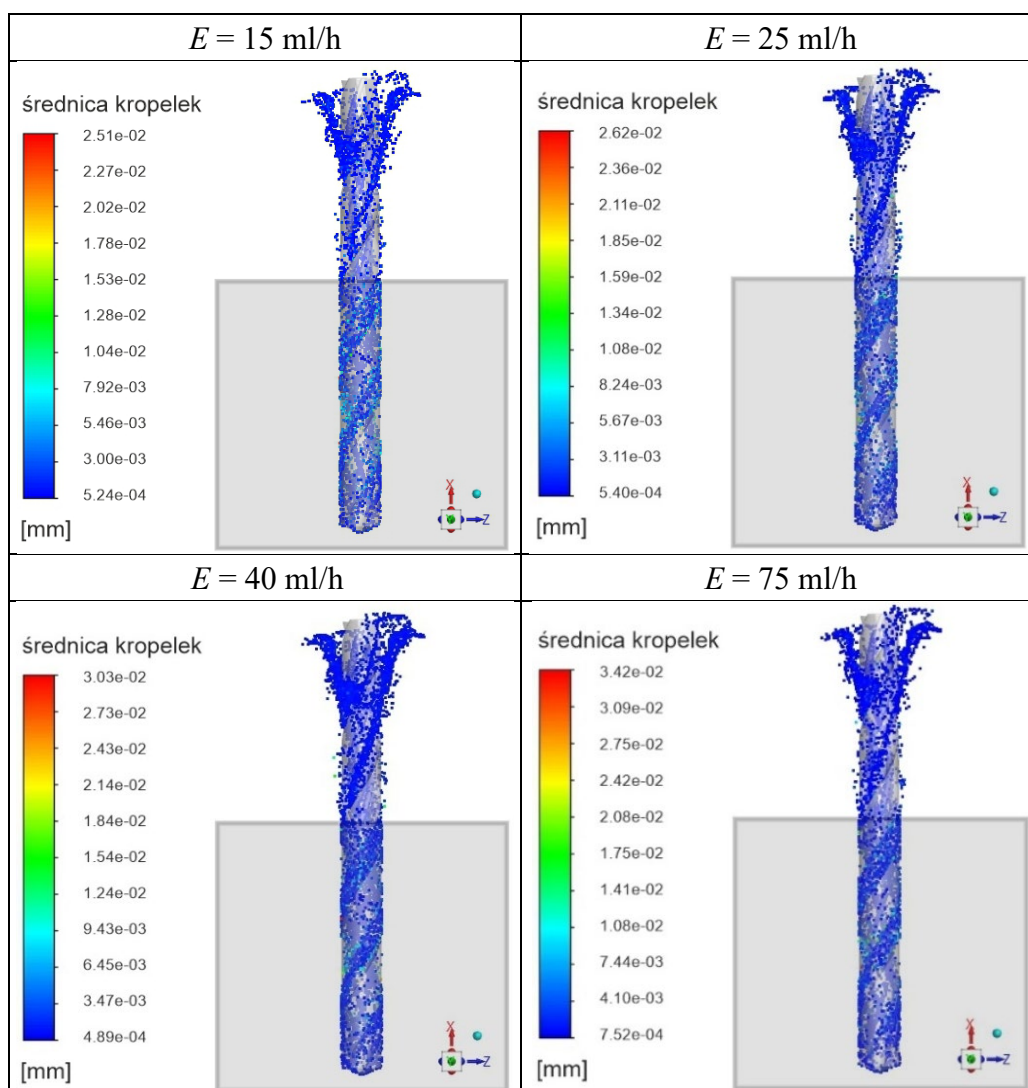
Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w pierwszym przypadku dla rozpatrywanego układu w trzech różnych wariantach geometrycznych dla różnych strumieni objętościowych płynu syntetycznego. Rozpatrywane zmiany geometryczne pochylenia kanałów wewnątrz wiertła umożliwiły uzyskanie wyników dotyczących warunków przepływu na powierzchni przyłożenia oraz we wnętrzu wierconego otworu. Podjęto próbę oceny zmiany konstrukcji kanałów wiertła, ponieważ ma to duży wpływ na średnicę kropeł jak również tworzenia się tribofilmu w strefie styku narzędzie–materiał obrabiany [120]. Rozpatrując zmianę ustawienia kanałów wewnątrz wiertła wykorzystano najczęściej stosowane parametry przez producenta wiertła pełnowęglkowego podczas obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu): prędkość skrawania  $v_c = 264$  m/min (prędkość obrotowa  $n = 7000$  obr./min), natężenie przepływu objętościowego powietrza  $P = 60$  l/min. Badania symulacyjne przeprowadzono dla czterech zmiennych wartości natężenia przepływu objętościowego cieczy chłodząco-smarującej: 15 ml/h, 25 ml/h; 40 ml/h oraz 75 ml/h.

W tab. 3.9–3.11 przedstawiono rozkład strumienia i wartości średnic kropeł w zależności od pochylenia kanałów wewnątrz wiertła doprowadzających medium czynne do strefy skrawania podczas wiercenia.

Analizując średnicę kropeł dla wiertła z kanałami pochylonymi o kąt  $5^\circ$  w kierunku do osi wiertła (tab. 3.9) zaobserwowano, że wraz ze wzrostem natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego zwiększają się średnice kropeł (wyjątek stanowi przepływ oleju o wartości 40 ml/h). Dla minimalnego przepływu  $E = 15$  ml/h najmniejsze średnice kropeł wynoszą  $524\ \mu\text{m}$  a większość kropeł dostarczanych do strefy kontaktu ostrza skrawającego z materiałem obrabianym posiada średnicę o wartościach zawartych w przedziale  $524\text{--}5460\ \mu\text{m}$ . Największa wartość średnicy kropeł dla rozpatrywanego natężenia przepływu wynosiła  $d = 25100\ \mu\text{m}$  ale są to wartości, które zaobserwowano w rowku odprowadzającym wióry ze strefy skrawania. Największy rozmiar kropeł zauważono dla natężenia przepływu płynu syntetycznego  $E = 75$  ml/h i równy jest  $34200\ \mu\text{m}$ . Zwiększenie wydajności natężenia  $E$  o 10 ml/h spowodowała zwiększenie rozmiaru kropeł w powietrzu o około 3,84% w strefie skrawania, natomiast zwiększenie już o 25 ml/h wzrost największych średnic kropeł o około 18,1% w porównaniu do  $E = 15$  ml/h. Najmniejsze krople zauważano dla  $E = 40$  ml/h a ich średnica  $d_{\min} = 489\ \mu\text{m}$ . Natomiast dla maksymalnego natężenia przepływu cieczy chłodząco-smarującej ( $E = 75$  ml/h) stwierdzono największe średnice kropeł a ich rozmiar w strefie skrawania zwiększył

się średnio od 36,2% (dla największych rozmiarów  $d_{max}$ ) do 53,7% (dla najmniejszych rozmiarów  $d_{min}$ ).

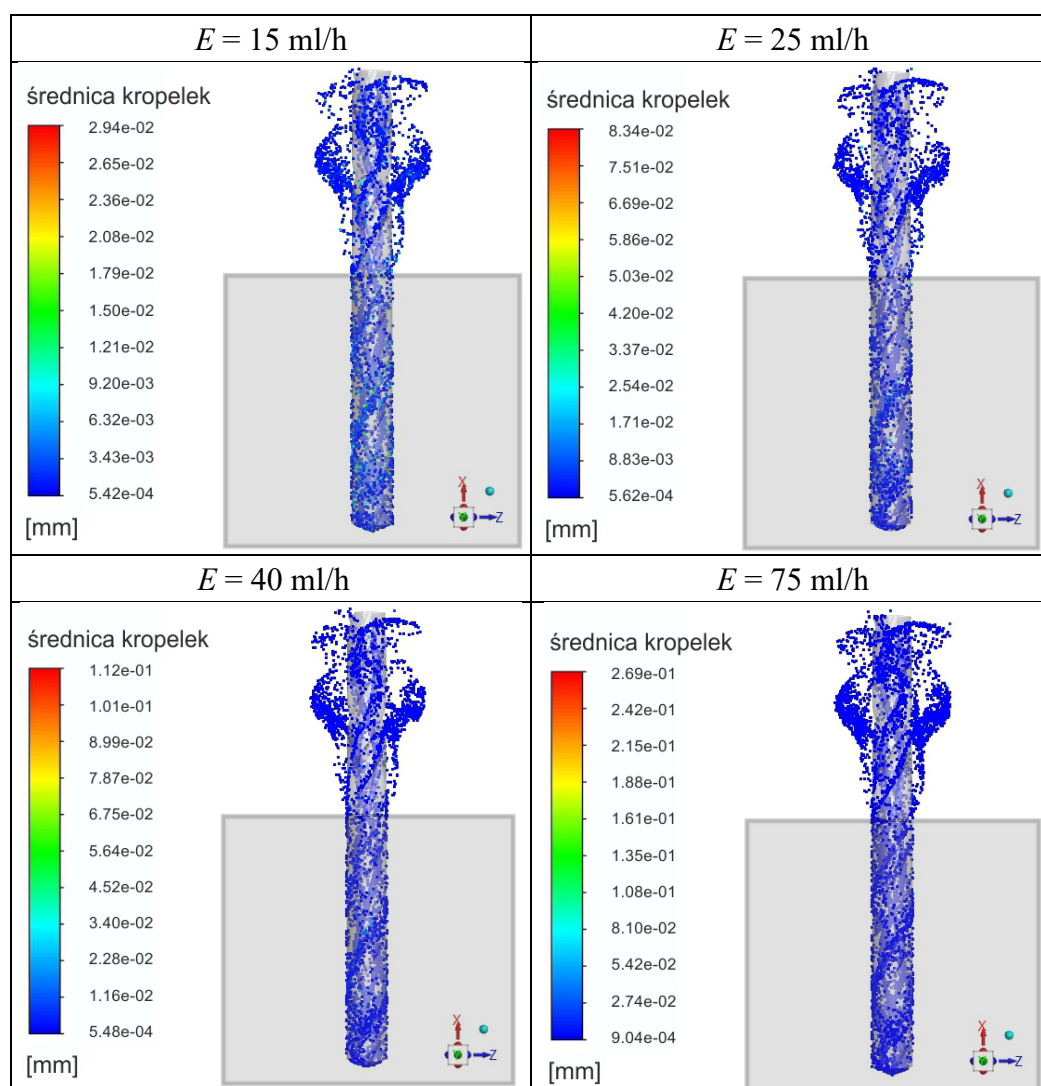
Tab. 3.9. Rozkład średnic i strumieni kropeł dla kanałów wiertła pochylonych pod kątem  $5^\circ$  w kierunku do osi wiertła w zależności od zmiennego natężenia przepływu płynu syntetycznego



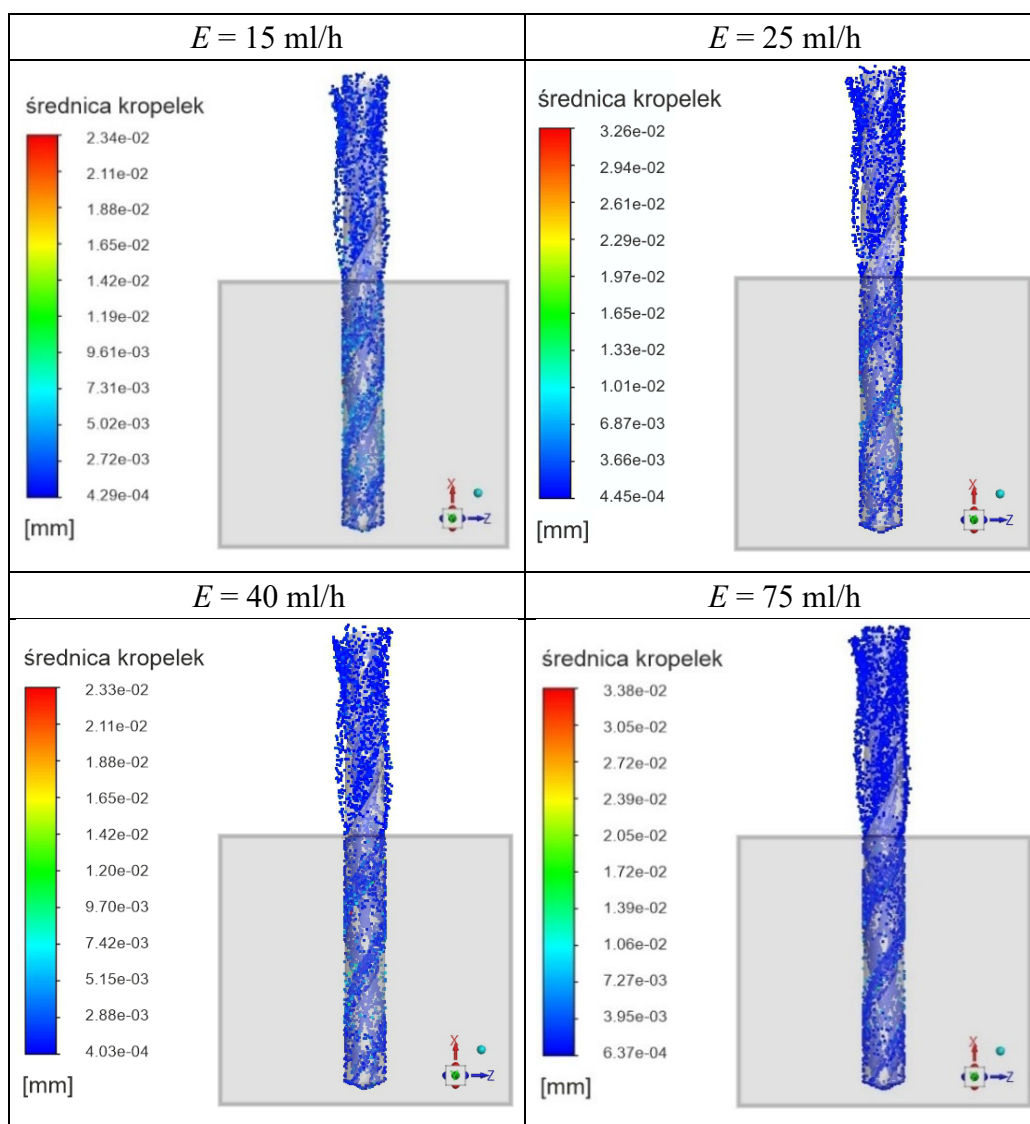
Dla konstrukcji kanałów pochylonych o  $5^\circ$  w kierunku od osi wiertła (tab. 3.10) zaobserwowano podobną zależność zmiany średnicy kropeł jak opisano powyżej dla tab. 3.9. Zmiana konstrukcji pochylenia kanałów spowodowała zwiększenie średnic kropeł w samej strefie skrawania w porównaniu do wiertła z kanałami pochylonymi do osi wiertła. Im większa jest wartość natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego tym różnica ta jest coraz większa, rozpatrując krople znajdujące się bezpośrednio w strefie skrawania. Dla mniejszych wartości  $E$  średnica kropeł zwiększa się od około 3,44%

(dla  $d_{min}$ ) do 15,75% (dla  $d_{max}$ ), natomiast już dla  $E = 75$  ml/h różnica procentowa wynosi od około 20,2% (dla  $d_{min}$ ) do 628% (dla  $d_{max}$ ). Największe wartości  $d$  w strefie styku ostrze skrawające-materiał obrabiany zaobserwowano dla natężenia przepływu cieczy chłodząco-smarującej 75 ml/h w przedziale od 904  $\mu\text{m}$  do aż 54200  $\mu\text{m}$ .

Tab. 3.10. Rozkład średnic i strumieni kropek dla kanałów wiertła pochylonych pod kątem  $5^\circ$  w kierunku od osi wiertła w zależności od zmiennego natężenia przepływu płynu syntetycznego

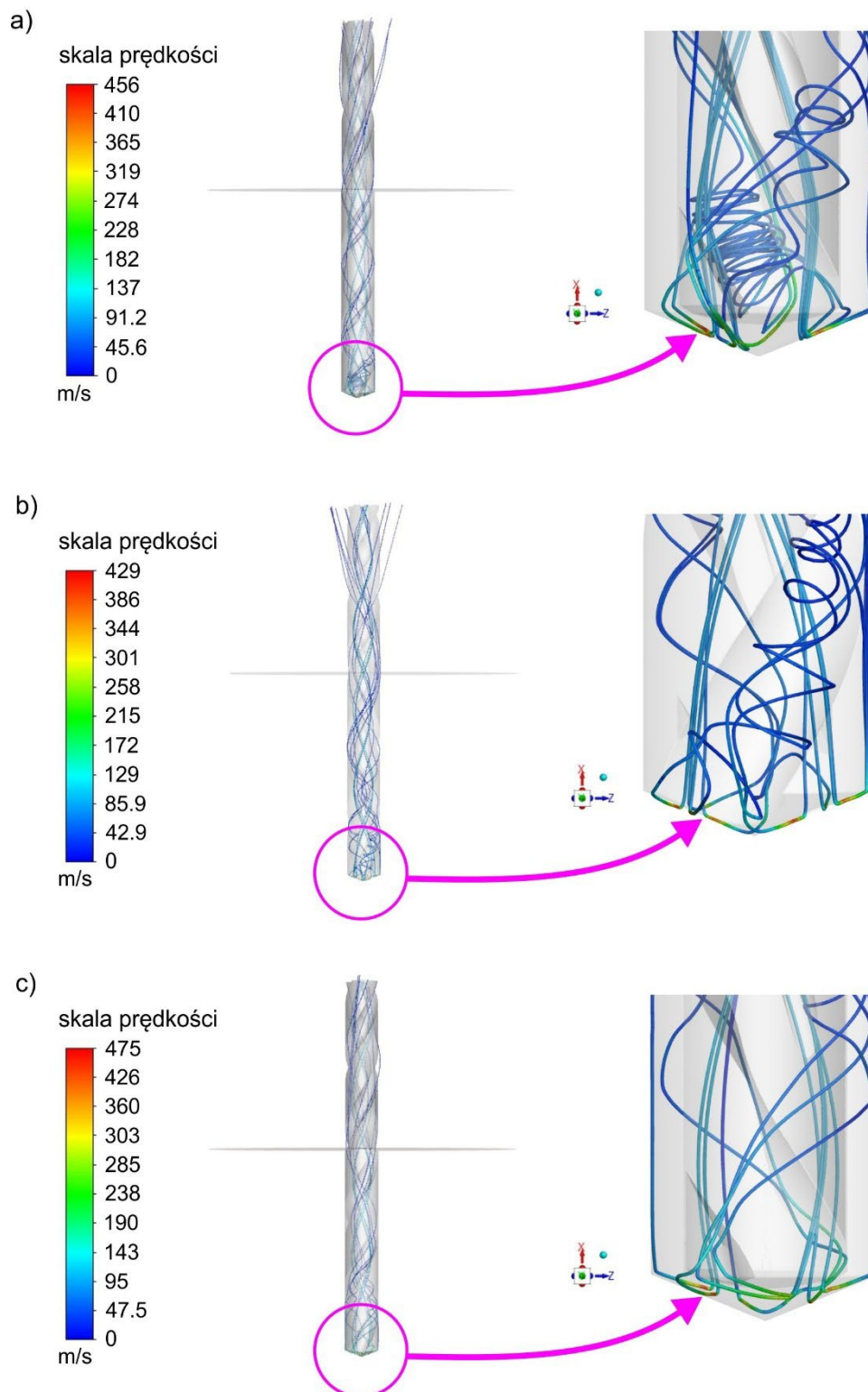


Tab. 3.11. Rozkład średnic i strumieni kropek dla kanałów wiertła niepochylnych w zależności od zmiennego natężenia przepływu płynu syntetycznego



Badania symulacyjne dla wiertła z wylotem kanałów równoległych do osi wiertła (tab. 3.11) wykazały najmniejsze wartości średnic kropek w całym strumieniu medium czynnego w porównaniu do wiertła z pochyłymi kanałami. Najmniejsze średnice kropek zaobserwowano dla  $E = 40 \text{ ml/h}$  i mieszczą się w przedziale  $403\text{--}5150 \text{ }\mu\text{m}$  oraz dla  $E = 15 \text{ ml/h}$  w przedziale  $429\text{--}5020 \text{ }\mu\text{m}$ . W porównaniu do wiertła z kanałami pochyłymi pod kątem  $5^\circ$  w kierunku do osi narzędzia dla najmniejszych średnic kropek ( $E = 40 \text{ ml/h}$ ) różnice wyniosły od około 2% (dla  $d_{min}$  w strefie skrawania) do 30% (dla  $d_{max}$  w strefie skrawania). Mniejsze krople lepiej penetrują strefę skrawania, zapewniając lepszą smarowność oraz tworzenie tribofilmu na ostrzu skrawającym (poprzez dodatki EP/AW zawarte w cieczach chłodząco-smarujących) [86, 112, 113].

Badania symulacyjne dotyczące rozkładu linii strugi wraz z prędkościami medium czynnego w zależności od pochylenia kanałów wewnątrz narzędzia przedstawiono na rys. 3.13. Konstrukcja wiertła z kanałami równoległymi do osi wiertła powoduje uzyskanie najmniejszych prędkości medium czynnego (rys. 3.13b) o maksymalnej wartości 429 m/s. Zmiany konstrukcyjne pochylenia kanałów spowodowały zwiększenie prędkości strugi medium czynnego o 6,29% dla pochylenia w kierunku do osi narzędzia oraz o 10,72% dla pochylenia w kierunku od osi narzędzia w porównaniu do wiertła bez zastosowania pochylenia kanałów. Najmniejsze zawirowania linii strugi medium czynnego w rowkach odprowadzających wiór stwierdzono dla wiertła z pochyleniem w kierunku od osi (rys. 3.13c). Analizując natomiast tory strugi przy krawędziach skrawających zauważono, że największy efekt opływania uzyskano dla wiertel z kanałami równoległymi do osi narzędzia, gdzie medium czynne dociera do prawie 85% czynnych długości krawędzi skrawających. Najmniej korzystny efekt smarowania i chłodzenia strefy skrawania stwierdzono dla wiertła z kanałami pochylonymi w kierunku do osi narzędzia, gdzie zaobserwowano najmniejszy obszar krawędzi skrawających zwilżanych przez cząstki aerozolu (płynu syntetycznego z powietrzem) oraz największe zawirowania. Zmniejszenie zjawiska penetracji ostrzy skrawających przez aerozol w rozpatrywanej konstrukcji wiertła może być wywołane większymi prędkościami linii strugi medium czynnego przez pochylenie kanałów powodując, że ich tory nie są w stanie równomiernie rozkładać się w strefie skrawania powodując większe obszary chłodzenia krawędzi skrawających. Dodatkowo pochylenie kanałów wewnątrz narzędzia może prowadzić do zawirowań, wpływając negatywnie na trajektorię ruchu poszczególnych kropel [122].



Rys. 3.13. Rozkład linii prądowych strugi wraz z prędkościami medium czynnego w trakcie wiercenia z prędkością obrotową  $n = 7000$  obr./min i natężenia przepływu powietrza

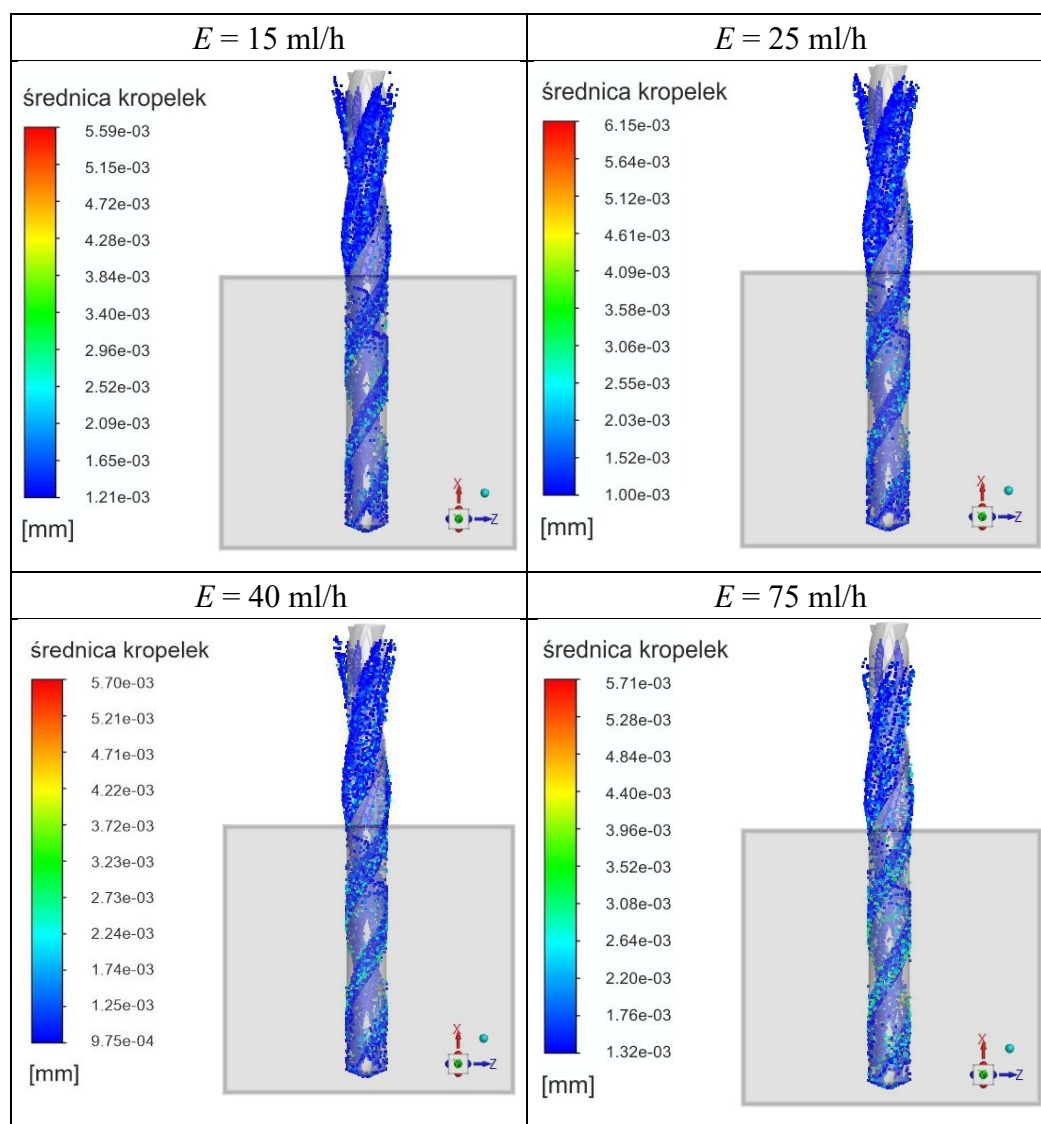
$P = 60$  l/min w zależności od konstrukcji kanałów wewnątrz narzędzia:

a) pochylone o  $5^\circ$  w kierunku do osi; b) równoległe do osi; b) pochylone o  $5^\circ$  w kierunku od osi



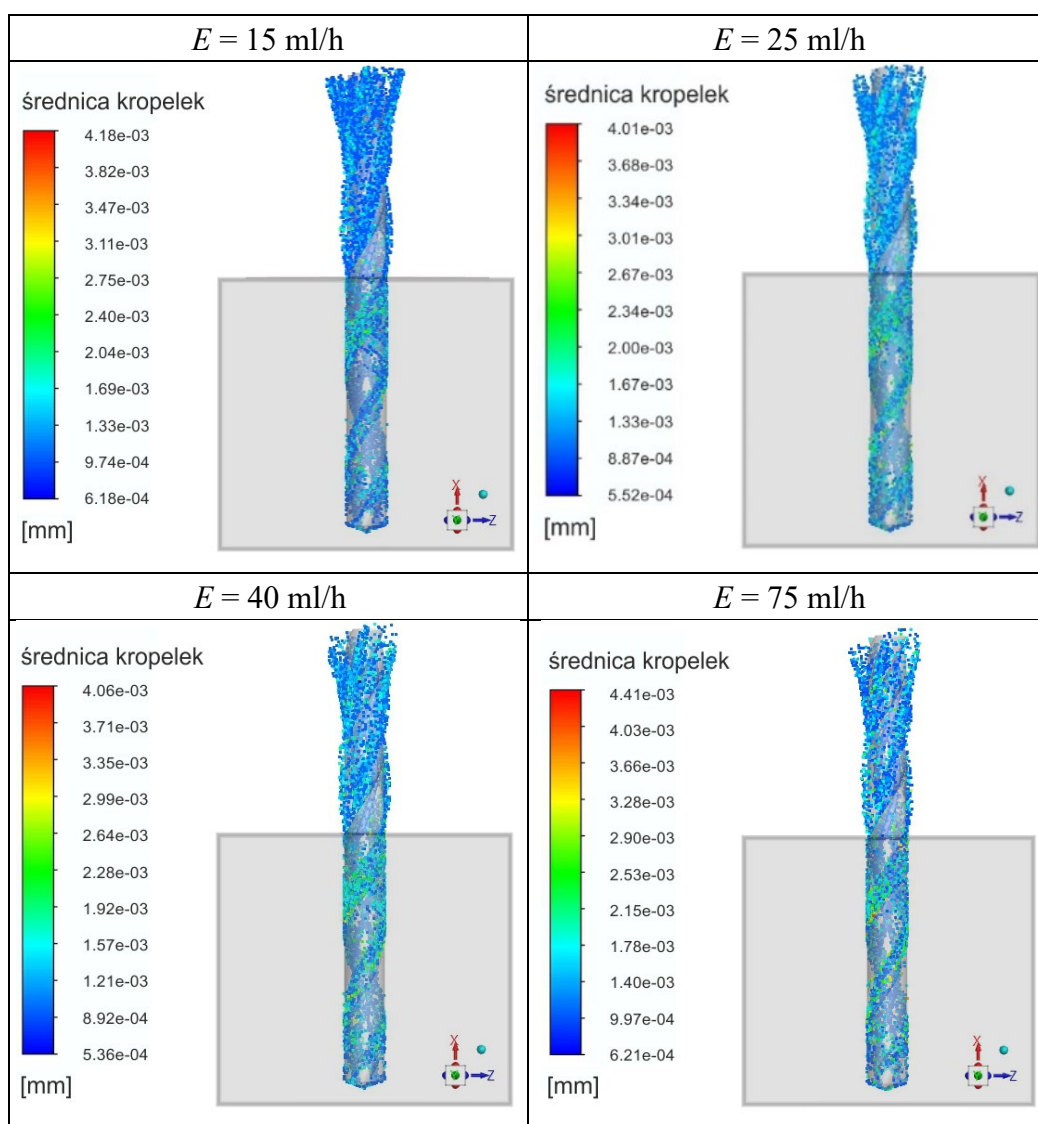
W dalszych badaniach symulacyjnych wykorzystano konstrukcję wiertła bez pochyleń kanałów wewnętrznych doprowadzających medium czynne w metodzie zminimalizowanego smarowania. Wyniki przedstawiające rozkład wielkości cząstek cieczy chłodząco-smarującej (średnica kropelek) w symulacji oraz rozkład rozprzestrzeniania się aerozolu w rozpatrywanym przykładzie geometrycznym dla różnych wartości natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$  oraz natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego  $E$  i zmiennych prędkości obrotowych wiertła  $n$  zostały przedstawione w tab. 3.12–3.20.

Tab. 3.12. Rozkład średnic i strumieni kropek w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 6000$  obr./min i  $P = 40$  l/min



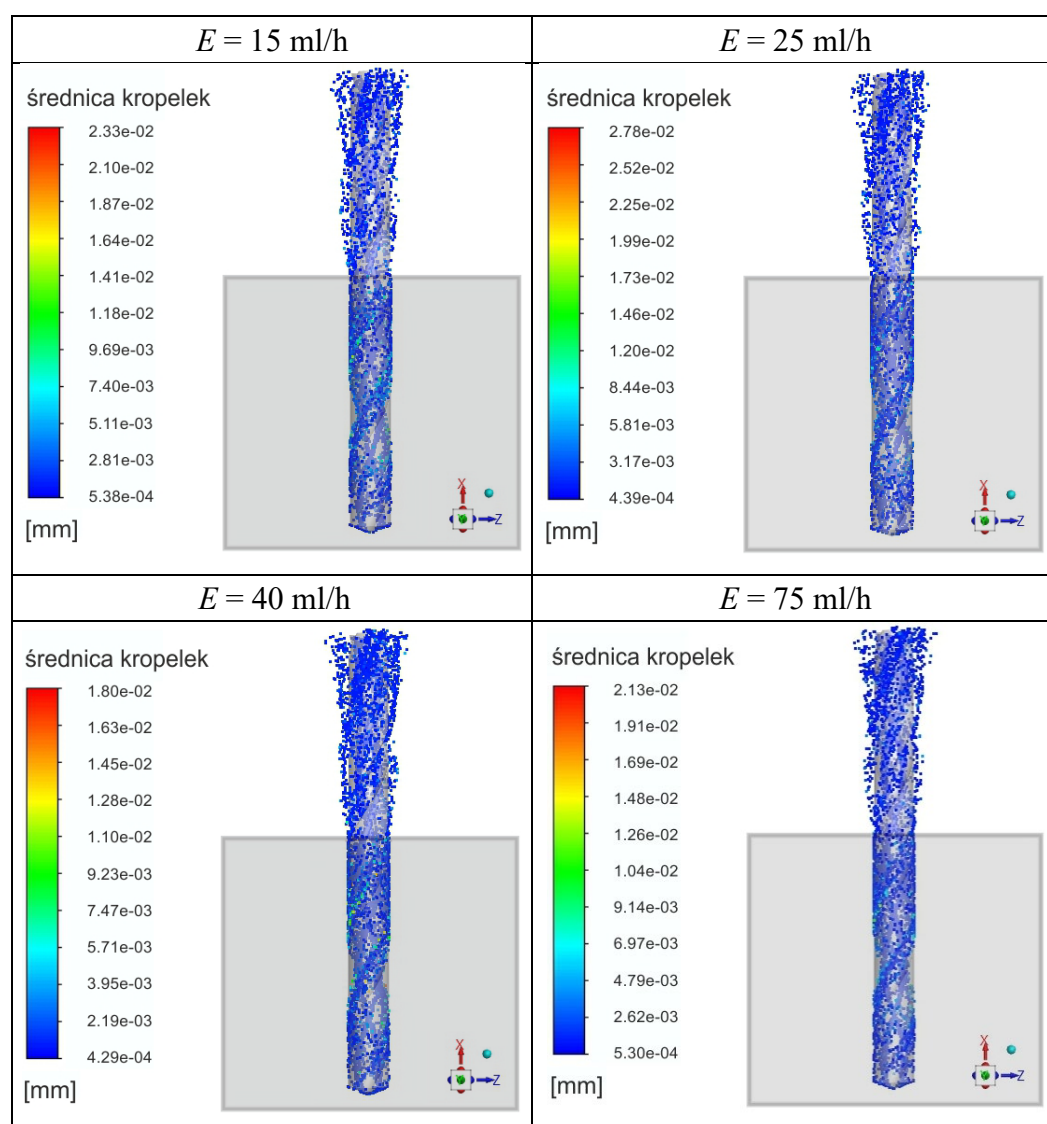
Analizując średnicę kropeł w strefie skrawania dla wiertła z prędkością obrotową 6000 obr./min oraz natężeniem przepływu objętościowego powietrza 40 l/min (tab. 3.12) zaobserwowano, że najmniejsze wartości  $d$  uzyskano przy przepływie płynu obróbkowego z wydajnością 40 ml/h a ich wartości mieszczą się w przedziale od 975  $\mu\text{m}$  do 1740  $\mu\text{m}$ . Natomiast największe średnice kropeł zauważono dla  $E = 75 \text{ ml/h}$  ( $d = 1320\text{--}2200 \mu\text{m}$ ). Zwiększenie przepływu oleju o 25 ml/h zwiększa więc zjawisko łączenia się kropeł dostarczanych kanałami, powodując tym samym ich większe średnice. Różnice pomiędzy średnicami kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu objętościowego oleju nie przekraczała 26% dla rozpatrywanej prędkości obrotowej narzędzia.

Tab. 3.13. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 6000 \text{ obr./min}$  i  $P = 60 \text{ l/min}$



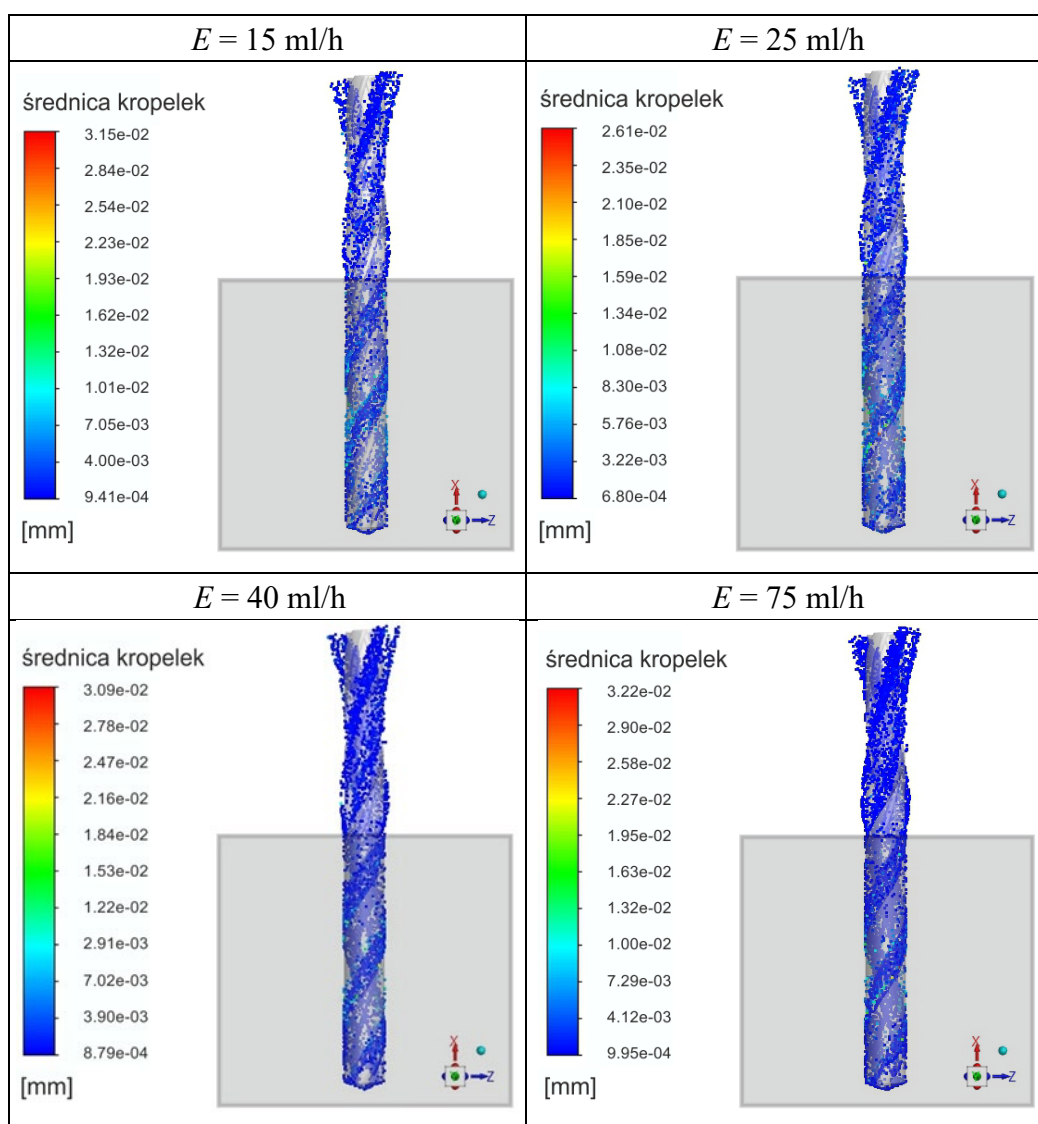
Zwiększenie przepływu powietrza o 20 l/min spowodowało dla wszystkich zmiennych wartości natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego w każdym przypadku zmniejszenie średnic kropeł (tab. 3.13). Najmniejsze krople, które pojawiają się w strefie skrawania wzdłuż czynnej głównej krawędzi skrawającej mają wartość 536  $\mu\text{m}$  (dla  $E = 40$  ml/h), czyli mniejsze o około 45% w porównaniu do wartości najmniejszych średnic kropeł zaobserwowanych dla przepływu powietrza 40 ml/h ( $d_{\min} = 975$   $\mu\text{m}$ ). Zwiększenie parametru  $P$  tworzenia medium czynnego powoduje zwiększenie prędkości strumienia strugi wewnątrz kanału a tym samym wywołuje większą turbulencję kropeł, co powoduje, że krople ulegają mniejszemu łączeniu w ośrodku transportującym jakim jest w tym przypadku sprężone powietrze [95].

Tab. 3.14. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 6000$  obr./min i  $P = 80$  l/min



Kolejne zwiększenie przepływu powietrza o 20 l/min do wartości 80 l/min (tab. 3.14) prowadzi do kolejnego zmniejszenia średnic kropeł (najmniejsze o wartości 429  $\mu\text{m}$  stwierdzono dla  $E = 40$  ml/h). Różnica pomiędzy wartościami  $d$  dla zmiennego natężenia przepływu cieczy chłodząco-smarującej nie przekraczała wartości 28%. Największe średnice kropeł (do 5810  $\mu\text{m}$ ) w strefie skrawania zaobserwowano dla  $E = 25$  ml/h, a wśród minimalnych średnic kropeł ( $d_{\min} = 538$   $\mu\text{m}$ ) dla  $E = 15$  ml/h.

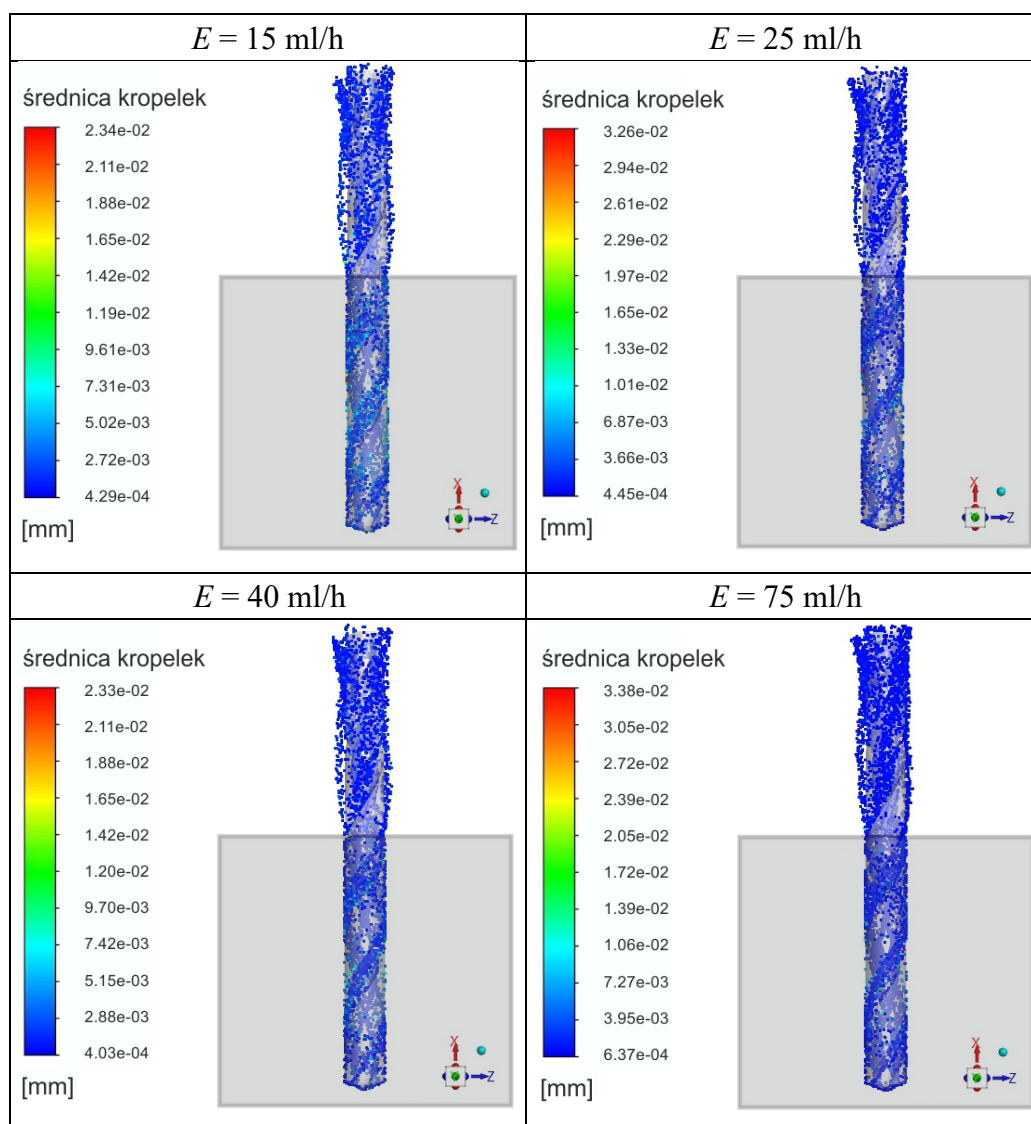
Tab. 3.15. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 7000$  obr./min i  $P = 40$  l/min



Analizując średnice kropeł przy zwiększeniu prędkości obrotowej o 1000 obr./min (tab. 3.15) dla  $P = 40$  l/min spowodowało nieznaczne zmniejszenie ( $< 3\%$ ) wartości  $d$  dla wszystkich zmiennych  $E$ . Wyjątek stanowi natężenie przepływu płynu syntetycznego

25 ml/h, gdzie zauważono zmniejszenie aż o 32%, podczas gdy dla pozostałych przypadków nie przekraczało wartości 8%. Największe średnice kropeł stwierdzono na wylocie z kanałów narzędzia ( $d = 7290 \mu\text{m}$ ) dla największych wartości natężenia przepływu objętościowego cieczy chłodząco-smarującej.

Tab. 3.16. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 7000 \text{ obr./min}$  i  $P = 60 \text{ l/min}$

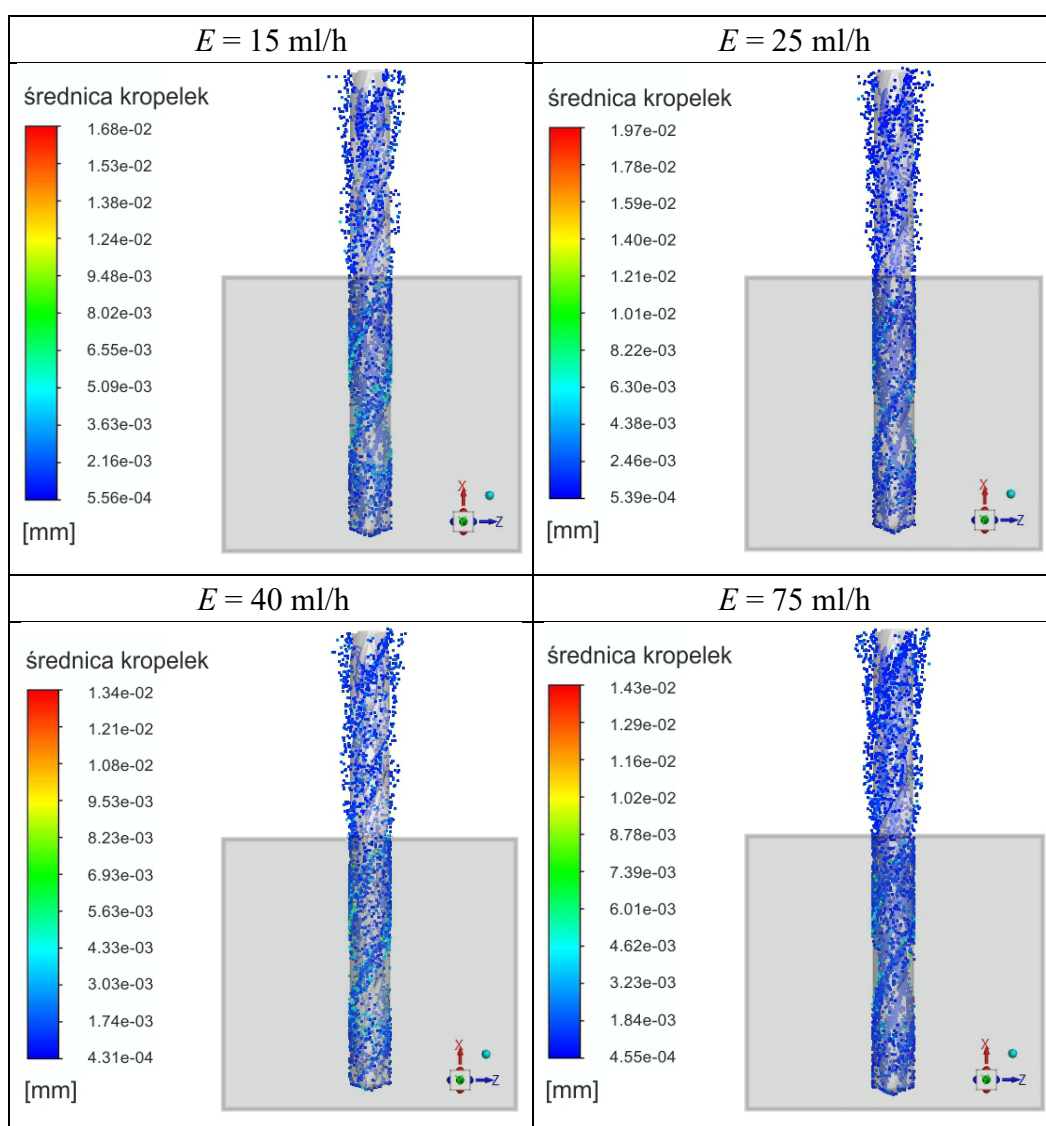


Zwiększenie prędkości obrotowej wiertła do 7000 obr./min przy natężeniu przepływu objętościowego powietrza  $P = 60 \text{ l/min}$  spowodowało zmniejszenie średnic kropeł dla wszystkich wartości  $E \leq 40 \text{ ml/h}$  w porównaniu do wiertła z obrotami 6000 obr./min. Tylko dla maksymalnego możliwego przepływu  $E = 75 \text{ ml/h}$  (tab. 3.16) zastosowanego w systemie dwukanałowym zasilania narzędzia zauważano większe wartości minimalnych



średnic kropeł ( $d = 637 \mu\text{m}$ ). W trakcie symulacji największe krople przy wylocie z kanałów stwierdzono również dla maksymalnego natężenia przepływu płynu syntetycznego. Zwiększenie natężenia przepływu powietrza podczas zastosowania zwiększonej prędkości obrotowej ( $n = 7000 \text{ obr./min}$ ) nie spowodowało znaczących zmian w wymiarach  $d$  dla tych samych warunków podawania medium czynnego w porównaniu do narzędzia pracującego z prędkością obrotową  $6000 \text{ obr./min}$ .

Tab. 3.17. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 7000 \text{ obr./min}$  i  $P = 80 \text{ l/min}$

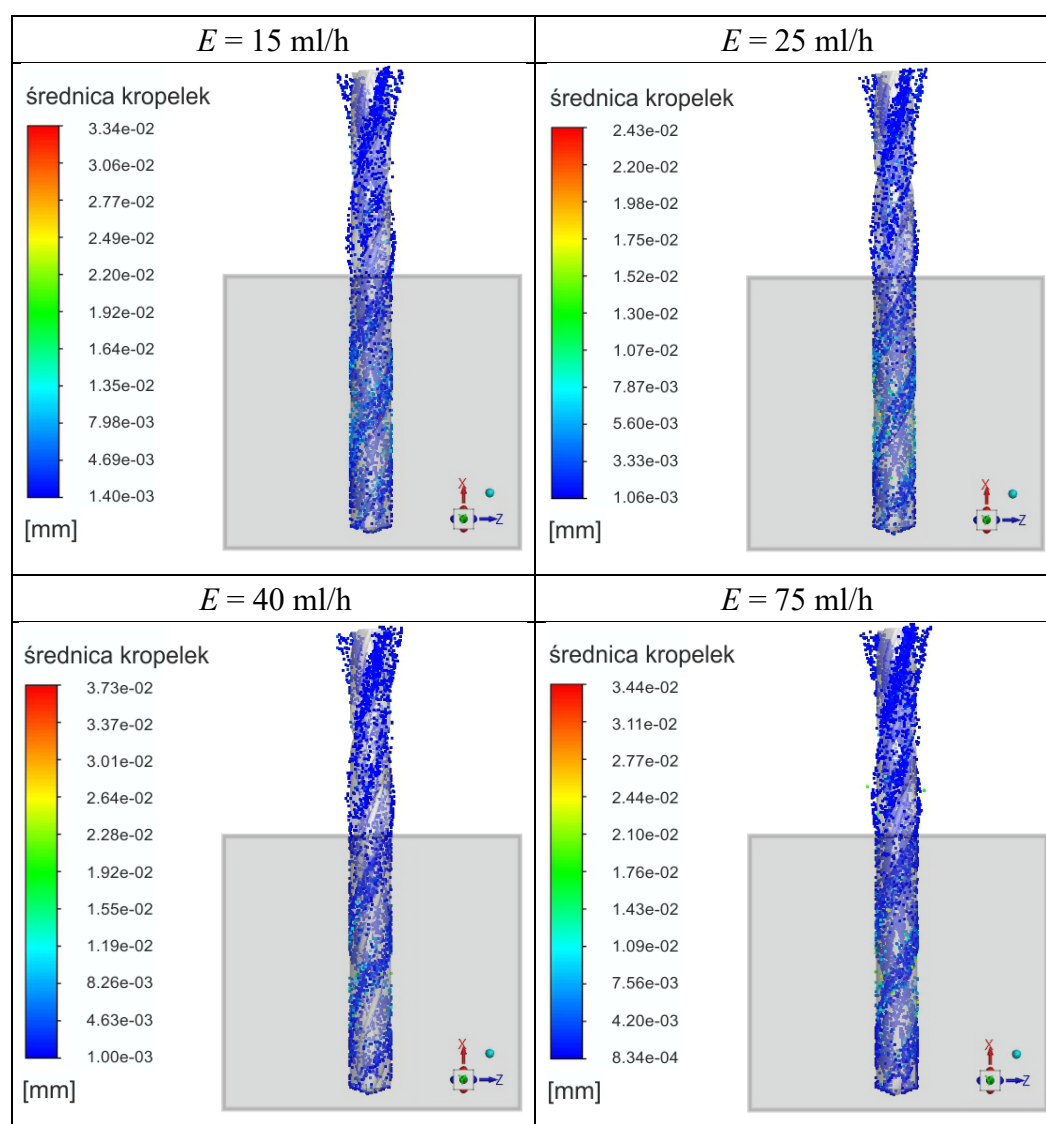


Największe rozpatrywane natężenie przepływu powietrza  $P = 80 \text{ l/min}$  spowodowało zwiększenie zawirowań strug aerozolu, a tym samym zwiększenie średnic kropeł dla wartości  $E \leq 40 \text{ ml/h}$  w porównaniu do natężenia przepływu powietrza  $P = 60 \text{ l/min}$  dla

prędkości obrotowej wiertła 7000 obr./min. W tych warunkach pracy narzędzia (tab. 3.17) największe średnice kropeł zaobserwowano dla mniejszych wartości  $E \leq 25$  ml/h a najmniejsze dla przepływu  $E = 40$  ml/h. Dla największego przepływu natężenia cieczy chłodząco-smarującej zaobserwowano największe zagęszczenie kropeł w strudze aerozolu.

Zwiększenie prędkości obrotowej do 8000 obr./min (tab. 3.18) dla najmniejszej wartości  $P = 40$  l/min oraz  $E \leq 40$  ml/h spowodowało zwiększenie średnic kropeł tylko o około 5% w porównaniu do wiertła pracującego z prędkością obrotową 7000 obr/min (tylko dla wartości  $E = 25$  ml/h wartość  $d$  wzrosła o 47%). Natomiast dla  $E = 75$  ml/h zauważono zmniejszenie średnicy kropeł w strefie skrawania ( $d = 834\text{--}7560$   $\mu\text{m}$ ) od 16,6 do 45% w rozpatrywanych warunkach pracy narzędzia w porównaniu do wartości  $E \leq 40$  ml/h.

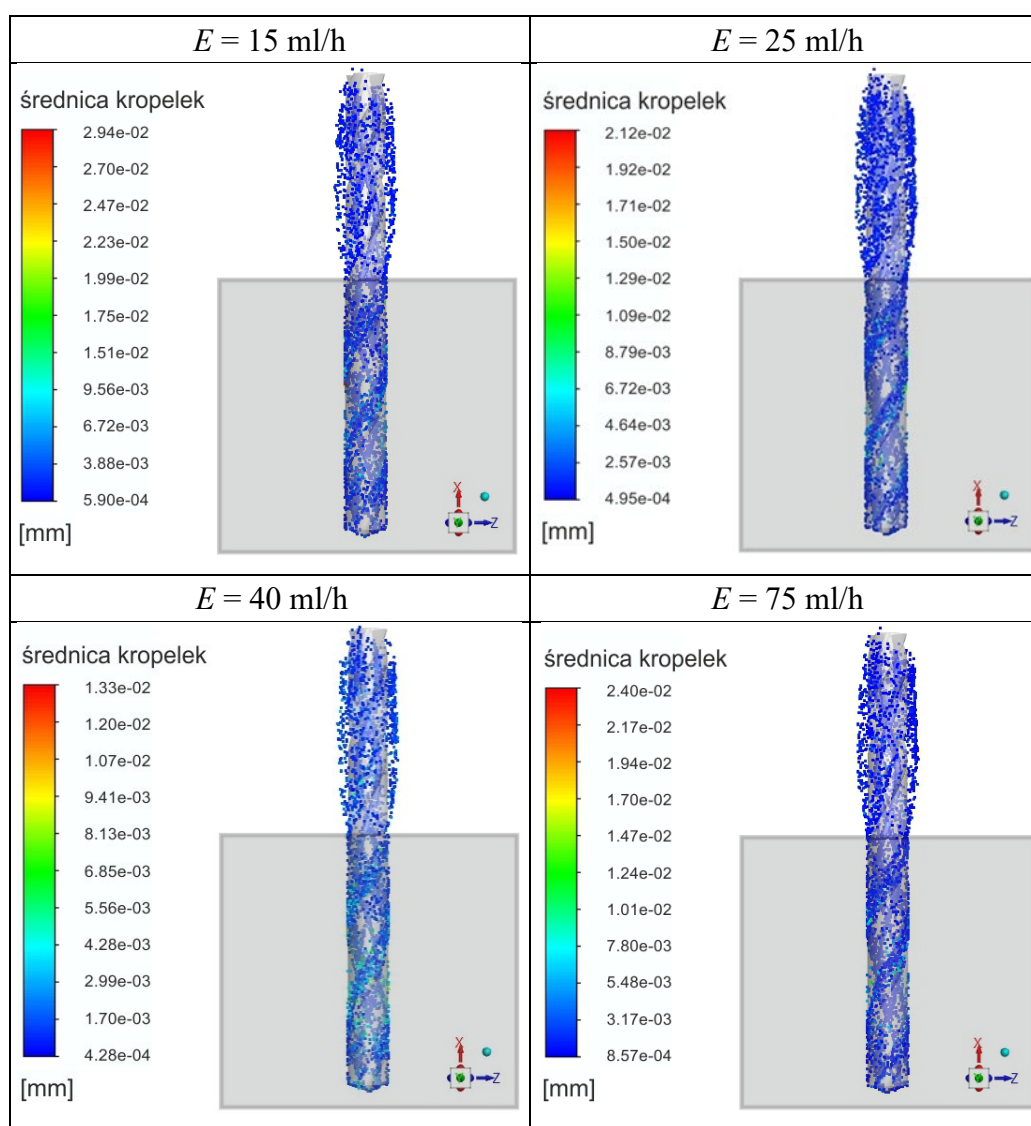
Tab. 3.18. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 8000$  obr./min i  $P = 40$  l/min





Zwiększając obroty wiertła do 8000 obr./min dla  $P = 60$  l/min zaobserwowano dla większości wartości przepływów natężenia objętościowego płynu syntetycznego zwiększenie średnic kropeł na wylocie z kanałów wewnątrz wiertła (wyjątek stanowi  $E = 25$  ml/h, aczkolwiek różnica pomiędzy wartościami  $d$  nie przekracza 4%). Również w tym przypadku największą średnicę  $d_{min}$  zauważono dla największych wartości  $E = 75$  ml/h. Zwiększenie wartości  $P$  spowodowało tak samo jak w przypadku wiertel pracujących z mniejszymi prędkościami obrotowymi ( $n \leq 7000$  obr./min) zmniejszenie średnic kropeł.

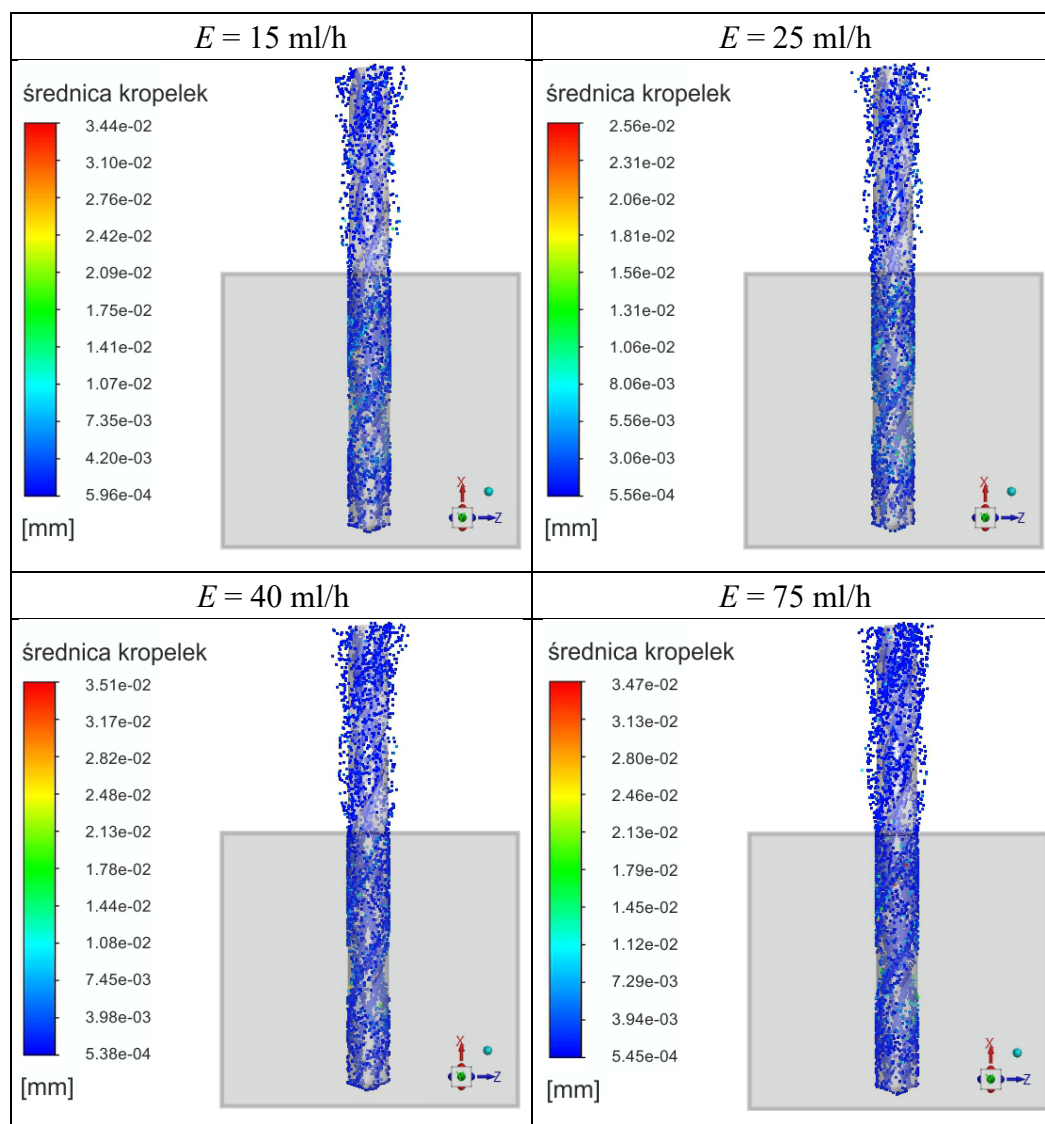
Tab. 3.19. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 8000$  obr./min i  $P = 60$  l/min



Dla maksymalnego natężenia przepływu objętościowego powietrza dla prędkości obrotowej wiertła 8000 obr./min (tab. 3.20) stwierdzono, że średnica kropeł jest większa

dla wszystkich wartości zmiennego  $E$ . Zwiększenie obrotów wiertła o 1000 obr./min spowodowało zwiększenie  $d_{min}$  w strefie skrawania od 3% dla mniejszych wartości  $E$  do 24% dla większych wartości  $E$ .

Tab. 3.20. Rozkład średnic i strumieni kropeł w zależności od zmiany natężenia przepływu płynu syntetycznego dla  $n = 8000$  obr./min i  $P = 80$  l/min

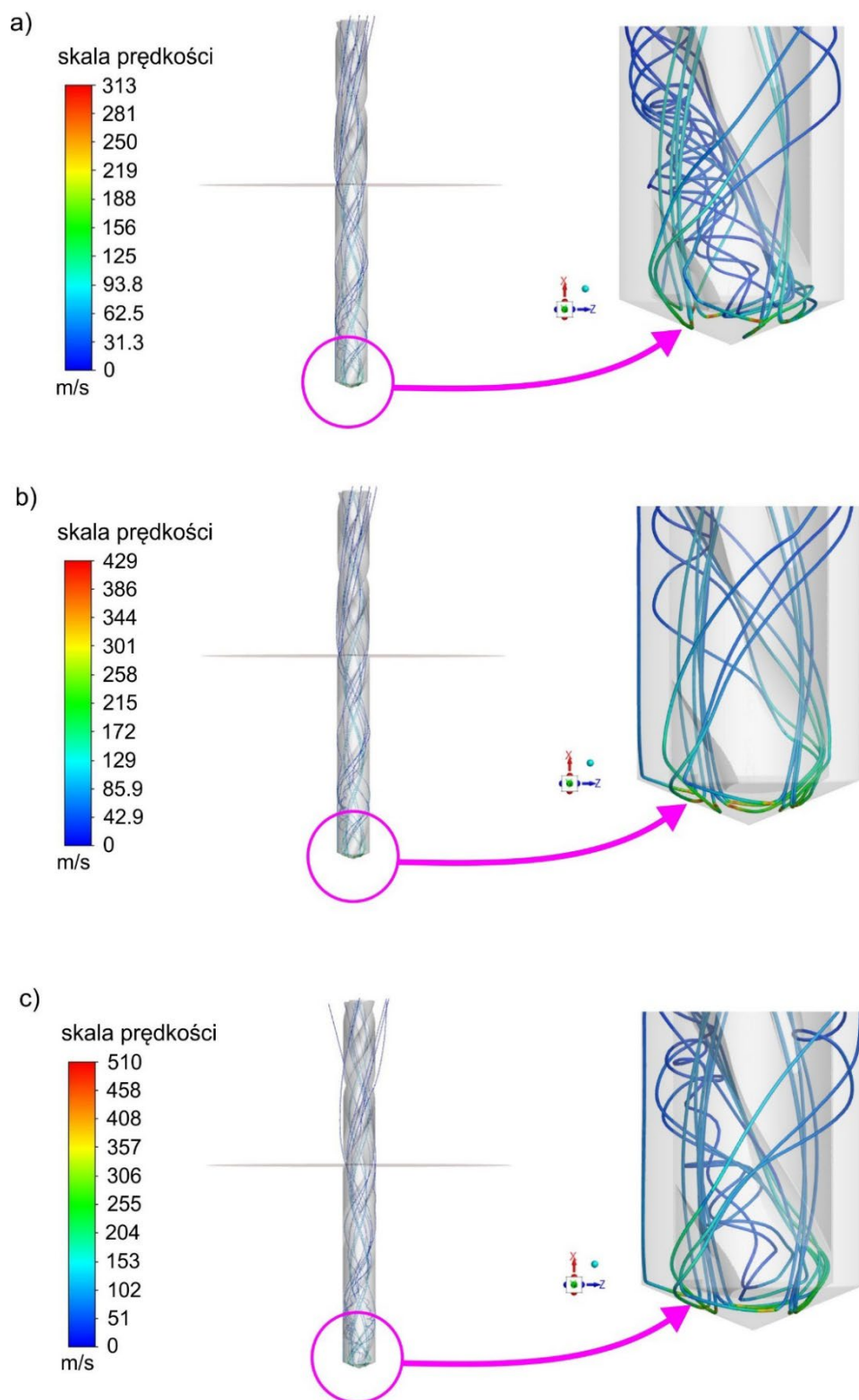


Zwiększenie średnic kropeł dla większych prędkości obrotowych wiertła jest przyczyną zwiększenia ryzyka zderzeń międzycząsteczkowych oraz zderzeń ze ściankami wewnątrz kanałów, co może powodować gromadzenie się cząstek wzdłuż ścianek kanału, a tym samym ponowne nagromadzenie cieczy chłodząco-smarującej. Powoduje to powstawanie większych cząstek i prowadzi do tzw. „zjawiska płucia” [123].

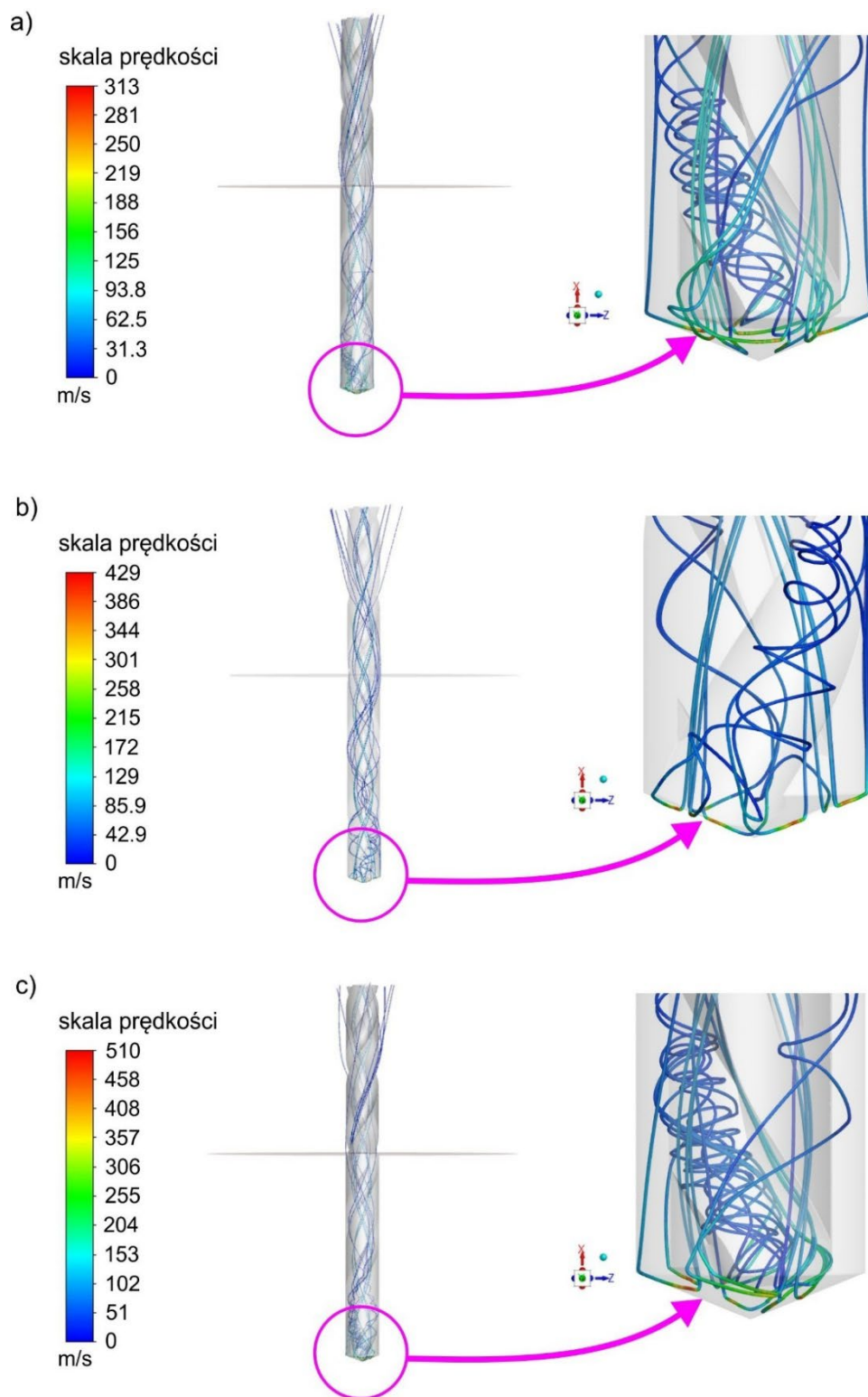
Analizując wszystkie rozpatrywane przypadki stwierdzono, że najmniejsze średnice kropel w strefie styku ostrze skrawające–materiał obrabiany oraz na wylocie z kanałów uzyskano dla prędkości obrotowej 7000 obr./min z natężeniem przepływu objętościowego powietrza 60 l/min i natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego 40 ml/h.

Kolejnym krokiem badań symulacyjnych jest sprawdzenie rozkładu linii strug aerozolu wraz z ich prędkościami (w szczególności w strefie styku ostrze skrawające–materiał obrabiany) w zależności od zmiennej prędkości obrotowej wiertła oraz zmiennego natężenia przepływu objętościowego powietrza, które wyniki przedstawiono na rys. 3.14–3.16. Zmiana natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego nie powodowała zmiany większej niż 2%, dlatego wyniki zostały przedstawione tylko dla przepływu  $E = 40$  ml/h, gdzie stwierdzono najmniejsze średnice kropel.

Analizując linie strugi powietrza wraz z ośrodkiem ciągłym w postaci medium czynnego (rys. 3.14-3.16) zaobserwowano, że najmniejsze zawirowania w strefie rowka wiórowego występują dla przepływu powietrza 60 l/min dla wszystkich zmiennych prędkości obrotowych wiertła. Każde zwiększenie wartości  $P$  spowodowało powstawanie większych wirów, które niekorzystnie wpływają na odprowadzanie medium czynnego a tym samym odprowadzania ciepła ze strefy skrawania. Największe zawirowania zauważono dla prędkości obrotowej wiertła 8000 obr./min i natężenia przepływu objętościowego powietrza 80 l/min (rys. 3.16c). W trakcie badań symulacyjnych obserwowano również rozkład rozchodzenia się strumienia oraz jego prędkość aerozolu bezpośrednio w strefie skrawania. Dla najmniejszej prędkości obrotowej narzędzia ( $n = 6000$  obr./min) stwierdzono najkorzystniejsze warunki chłodzenia dla natężenia przepływu objętościowego powietrza 60 ml/h (rys. 3.14b), natomiast najmniejszą zwilżalność strug aerozolu zaobserwowano przy krawędziach skrawających wiertła dla wartości  $P = 40$  ml/h (rys. 3.14a). Najwięcej linii ośrodka ciągłego wzdłuż krawędzi skrawających zaobserwowano dla dostarczania medium czynnego z natężeniem przepływu objętościowego powietrza 60 l/min i prędkości obrotowej wiertła 7000 obr./min (rys. 3.15b).

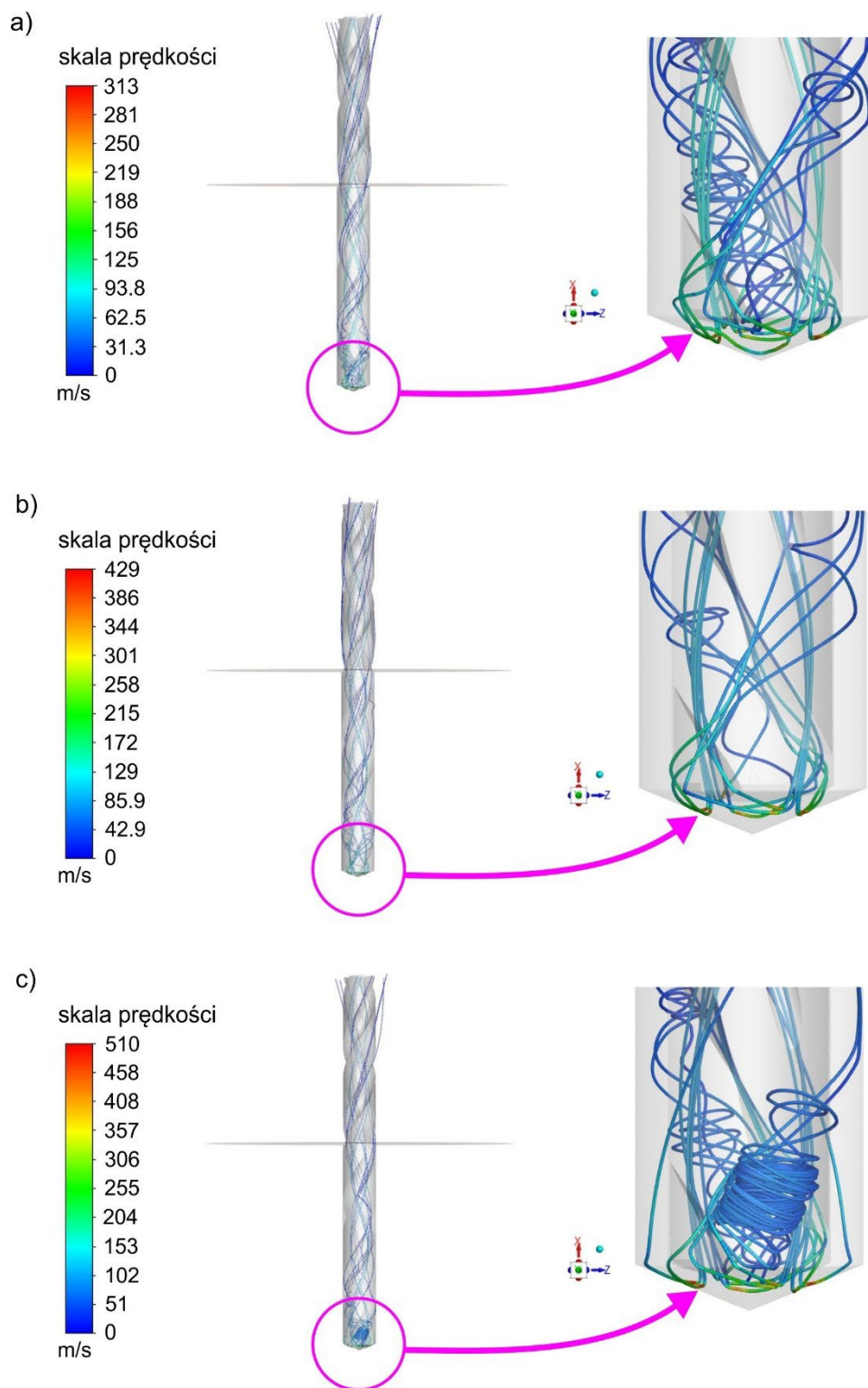


Rys. 3.14. Rozkład linii prądowych strugi wraz z prędkościami medium czynnego w trakcie wiercenia z prędkością obrotową  $n = 6000 \text{ obr./min}$  dla zmiennego natężenia przepływu powietrza: a)  $P = 40 \text{ l/min}$ ; b)  $P = 60 \text{ l/min}$ ; c)  $P = 80 \text{ l/min}$



Rys. 3.15. Rozkład linii prądowych strugi wraz z prędkościami medium czynnego w trakcie wiercenia z prędkością obrotową  $n = 7000$  obr./min dla zmiennego natężenia przepływu powietrza: a)  $P = 40$  l/min; b)  $P = 60$  l/min; c)  $P = 80$  l/min





Rys. 3.16. Rozkład linii prądowych strugi wraz z prędkościami medium czynnego w trakcie wiercenia z prędkością obrotową  $n = 8000$  obr./min dla zmiennego natężenia przepływu powietrza: a)  $P = 40$  l/min; b)  $P = 60$  l/min; c)  $P = 80$  l/min

Wzrost przepływu powietrza spowodował również zwiększenie prędkości ośrodka ciągłego (powietrze z kroplami płynu syntetycznego) dla wszystkich zmiennych wartości prędkości obrotowej narzędzia. Natomiast na prędkość poszczególnych torów strugi aerozolu nie ma wpływu zmiana prędkości obrotowej wiertła. Największe prędkości (do 510 m/s) stwierdzono w pobliżu wylotu medium czynnego z kanałów w strefie skrawania dla wartości  $P = 80$  l/min.

### 3.8. Wnioski

Przeprowadzenie badań symulacyjnych metodą elementów skończonych w środowisku ANSYS pozwoliło na uzyskanie informacji, które umożliwiły wybór najkorzystniejszych, pod względem średnicy kropeł, linii prądowych strugi, jej zawirowań oraz rozkładu w strefie skrawania parametrów rozpatrywanej geometrii wiertła, bez konieczności przeprowadzania analogicznych, doświadczalnych badań porównawczych. Wyniki badań symulacyjnych pozwoliły na wybranie odpowiedniego kąta nachylenia kanałów doprowadzających ciecz chłodząco-smarującą wewnątrz narzędzia, natężenia przepływu objętościowego powietrza oraz prędkości obrotowej wiertła ze względu na parametry wyjściowe przeprowadzanych symulacji. Uzyskanie wizualizacji łączenia się i rozpadania kropelek w wyniku ich transportu, zarówno poprzez kanały wewnątrz narzędzia do strefy skrawania jak również ich zachowanie w rowku wiórowym uzyskano przy wykorzystaniu oprogramowania dotyczącego dynamiki płynów CFD. Wykorzystanie modelu ze zmienną prędkością obrotową wiertła pozwoliły na obserwację skomplikowanego układu odśrodkowego podawania aerozolu jako mieszaniny płynu syntetycznego ze sprężonym powietrzem. Po wybraniu odpowiedniego modelu konstrukcji pochylenia kanałów przeprowadzono symulację dla trzech różnych prędkości obrotowych narzędzia oraz natężenia przepływu objętościowego powietrza i czterech wartości natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego. Badania symulacyjne miały również na celu ograniczenie dalszych badań doświadczalnych. W trakcie badań symulacyjnych zostały sformułowane wnioski szczegółowe:

1. Badania symulacyjne wykazały, że zarówno zmiana konstrukcji kanałów wewnątrz narzędzia, jak również zmiana prędkości obrotowej narzędzia oraz parametry tworzenia medium czynnego: natężenie objętościowe powietrza i natężenie przepływu płynu syntetycznego, mają istotny wpływ na średnicę kropeł i linie prądowe rozkładu strugi aerozolu zarówno w strefie skrawania jak również rowka wiórowego wiertła.



2. Warianty układu z trzema kątami pochylenia kanałów wewnątrz wiertła doprowadzających medium czynne do strefy skrawania wykazały zmiany zarówno w wielkości średnic kropeł jak również zawirowań linii prądowych strugii. Zastosowanie konstrukcji kanałów bez pochylenia pozwoliło na uzyskanie najmniejszych średnic kropeł oraz rozkładu linii prądowych aerozolu, które w największym obszarze układały się wzdłuż krawędzi skrawających, czego powodem był mniejsza prędkość strugi na wyjściu z kanałów. Takie rozłożenie linii prądowych medium czynnego zapewnia najkorzystniejsze warunki chłodzenia i smarowania strefy skrawania.

3. Rozpatrując warianty układu z trzema zmiennymi prędkościami obrotowymi wiertła pozwoliły na wyznaczenie prędkości obrotowej równej 7000 obr./min, gdzie zaobserwowano zmniejszenie średnic kropeł w szczególności tych dostarczanych do strefy skrawania co wynikało z mniejszych zawirowań w strudze medium czynnego. Zwiększenie prędkości obrotowej do 8000 obr./min spowodowało, w niektórych przypadkach zwiększenie średnic kropeł. Większa prędkość obrotowa narzędzia powoduje większe zawirowania a tym samym mniejsze chłodzenie i smarowanie krawędzi skrawających.

4. Zmiana prędkości obrotowej wiertła nie spowodowała zmian w prędkości strugi aerozolu na wyjściu z kanałów narzędzia.

5. W większości rozpatrywanych przypadków zwiększenie natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego powodowało zmniejszanie średnic kropeł (zasada ta w szczególności sprawdzała się do wartości 40 ml/h). Dla maksymalnej wartości podawania płynu syntetycznego stwierdzono już większe średnice kropeł, co mogło być przyczyną powstawania łączenia się kropeł na ściankach kanałów w związku z ich większym przepływem.

6. Wyniki badań symulacyjnych dotyczące trzech wariantów układów dotyczących zmiany natężenia przepływu powietrza nie były już tak jednoznaczne. Największe średnice kropeł stwierdzono dla najmniejszego natężenia przepływu powietrza, natomiast uzyskanie najmniejszych średnic kropeł były uzależnione zarówno od natężenia przepływu powietrza jak i natężenia przepływu płynu syntetycznego. Natomiast rozpatrując linie strugi medium czynnego najmniejsze zawirowania stwierdzono dla przepływu 40 ml/h, co powodowało bardziej równomierne rozprowadzanie cząstek aerozolu wzdłuż krawędzi skrawających.

7. Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na precyzyjny dobór warunków doprowadzania płynu obróbkowego wraz ze sprężonym powietrzem do strefy skrawania na potrzeby dalszych badań doświadczalnych wykonywanych podczas wiercenia otworów.

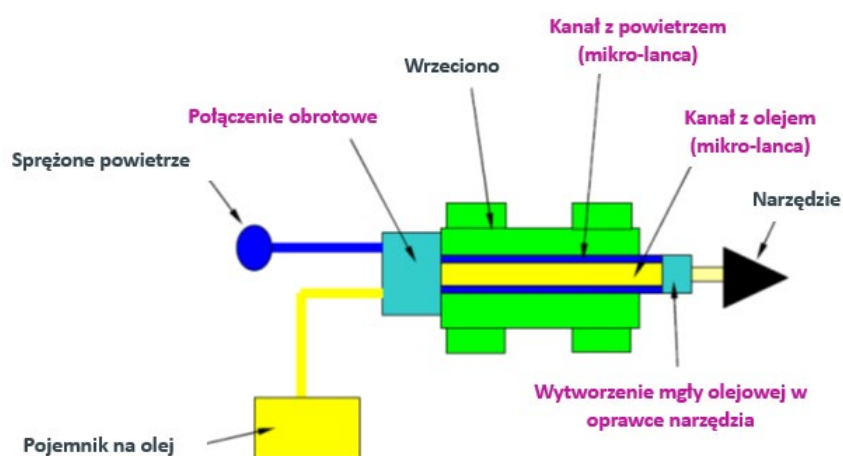
## 4. METODYKA I WARUNKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

### 4.1. Cel badań doświadczalnych

Podstawowym celem badań doświadczalnych jest ustalenie wpływu zmian parametrów tworzenia parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania z dużymi prędkościami obrotowymi podczas wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) na wybrane wskaźniki skrawalności, jak również porównanie metody MQL z obróbką na sucho i chłodzenia sprężonym powietrzem.

### 4.2. Metoda badań

W trakcie badań wykorzystano doświadczenie i problemy wynikające w trakcie obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) podczas wiercenia otworów w głowicy silnikowej w firmie Volkswagen Motor Polska Sp. z o.o. z siedzibą w Polkowicach. Pierwsze próby dotyczyły ustalenia posuwu roboczego, którego wartość w głównej mierze wynikała z prac laboratoryjnych przeprowadzonych w siedzibie producenta narzędzia w firmie Stammsitz Gühring KG w Albstadt w Niemczech a wartość prędkości posuwowej ustalono na  $v_f = 4800$  mm/min. W trakcie badań wstępnych na podstawie dokładności wymiarowej otworu oraz zużycia narzędzia ustalono zakres prędkości obrotowej od 6000 obr./min do 8000 obr./min. Wartości zmiennych parametrów tworzenia aerozolu medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania dobrano zgodnie z zakresem urządzenia o nazwie bielomatik wykorzystywanego w metodzie zminimalizowanego smarowania (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Schemat 2-kanalowego urządzenia bielomatik

Szczegółowe warunki tworzenia aerozolu zostaną opisane w sekcji 4.4.2.

Badania doświadczalne przeprowadzono zarówno dla zmiennego natężenia przepływu objętościowego cieczy chłodząco-smarującej  $E$  jak również natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$ :

- przepływ objętościowy płynu syntetycznego: 15 ml/h, 25 ml/h, 40 ml/h oraz 75 ml/h;
- przepływ objętościowy powietrza: 40 l/min, 60 l/min oraz 80 l/min.

Ciśnienie robocze podawania powietrza ustawiono zgodnie z zaleceniami producenta urządzenia bielomatik na 0,6 MPa.

### **4.3.Charakterystyka badanych materiałów**

#### **4.3.1. Materiał obrabiany**

W ciągu ostatnich lat stopy odlewnicze Al-Si-Mg są coraz częściej stosowane w przemyśle motoryzacyjnym jako odpowiednia alternatywa dla żeliwa w produkcji elementów silnika, ze względu na ich wysoki stosunek wytrzymałości do masy i doskonałe przewodnictwo cieplne [124]. Branża motoryzacyjna stoi przed wielkim wyzwaniem związanym z poprawą ogólnej wydajności silników. Zwiększenie maksymalnej temperatury pracy i ciśnienia silnika może skutecznie poprawić wydajność, co wymaga również poprawy wytrzymałości zmęczeniowej stopów Al-Si-Mg [10].

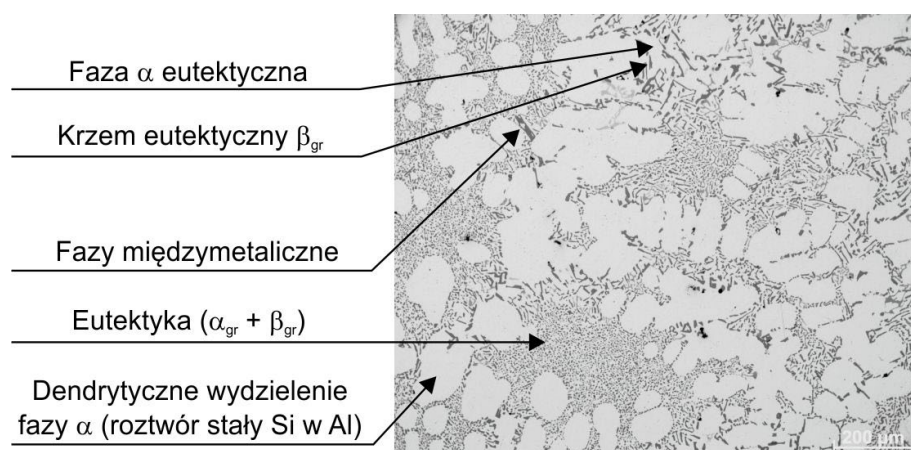
Jednak głowica cylindra silnika musi stale pracować w wysokiej temperaturze i warunkach cyklicznych naprężeń termicznych w cyklu start-stop. Dlatego wpływ temperatury na właściwości zmęczeniowe stopu aluminium jest ważnym czynnikiem, który musi być brany pod uwagę w elementach konstrukcyjnych silnika. W celu zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej oraz zmniejszenia naprężeń w szczególności temperatury pracy dodano do stopu aluminium miedzi [8].

Głównym zadaniem podczas wiercenia w wybranym stopie aluminium AlSi10Mg(Cu) jest nie przekroczenie błędu wymiarowego otworu (w głowicy silnika służących do zasilania hydrauliki zaworowej w olej nie przekracza  $\pm 0,12$  mm oraz otworów do mocowania głowicy  $\pm 0,1$  mm).

Struktura, skład chemiczny oraz własności mechaniczne stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) przedstawiono w tab. 4.1.

Tab. 4.1. Struktura, skład chemiczny oraz własności mechaniczne AlSi10Mg(Cu)

| WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE |             |         |    | SKŁAD CHEMICZNY [%] |                   |                   |                   |                   |
|-------------------------|-------------|---------|----|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $R_{p0,2}$ (MPa)        | $R_m$ (MPa) | $A$ (%) | HB | Fe <sub>max</sub>   | Si                | Mn <sub>max</sub> | Pb <sub>max</sub> | Cu <sub>max</sub> |
| 80                      | 150         | 2       | 50 | 0,55                | 9–11              | 0,45              | 0,05              | 0,05              |
|                         |             |         |    | Mg                  | Zn <sub>max</sub> | Sn <sub>max</sub> | Ni <sub>max</sub> | Ti <sub>max</sub> |
|                         |             |         |    | 0,2–0,45            | 0,1               | 0,05              | 0,05              | 0,15              |
| STRUKTURA               |             |         |    |                     |                   |                   |                   |                   |



#### 4.3.2. Ciecz chłodząco-smarująca

W trakcie badań wykorzystano płyn syntetyczny przeznaczony głównie do obróbki skrawaniem o nazwie handlowej BERUCUT MQL-A 20. Wybrana ciecz chłodząco-smarująca jest substancją nie zawierającą chloru, metali ciężkich oraz oleju mineralnego, środkiem smarowym do wiórowej i bezwiórowej obróbki stopów tytanu, stali nierdzewnej i stali niskostopowych. BERUCUT MQL-A 20 może być dozowany w bardzo małych ilościach, dlatego znalazł szerokie zastosowanie w metodzie zminimalizowanego smarowania. Ponadto charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami wypłukującymi oraz ochroną przed korozją. W celu poprawy właściwości smarujących do płynu syntetycznego dodano ester fosforanowy.

Własności płynu syntetycznego przedstawiono w tab. 4.2.

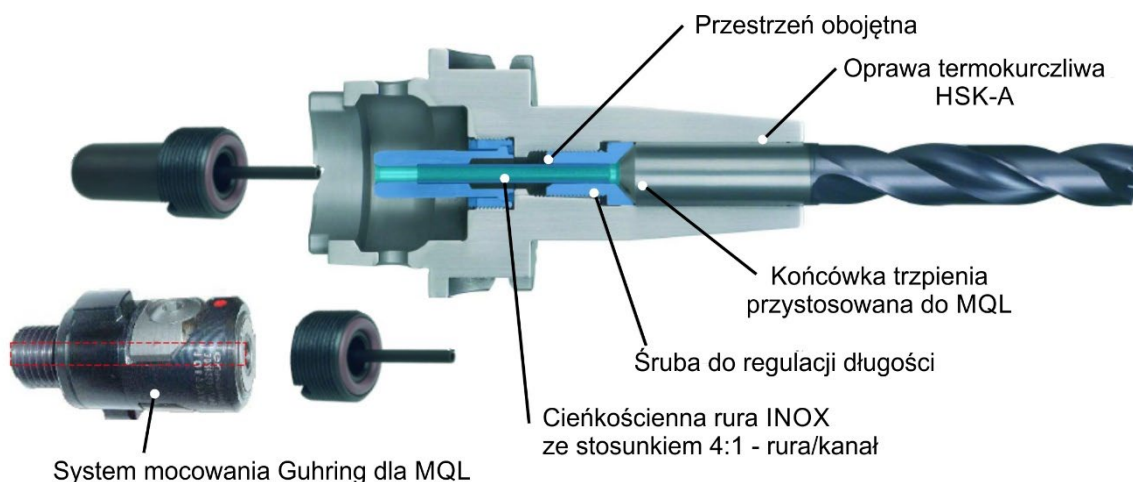
Tab. 4.2. Właściwości BERUCUT MQL-A 20

| Parametr                   | Jednostka          | Wartość     | Metoda badań                                 |
|----------------------------|--------------------|-------------|----------------------------------------------|
| Gęstość w 20 °C            | g/cm <sup>3</sup>  | 0,835–0,845 | AA_003-9<br>w oparciu<br>o DIN 51757/5       |
| Lepkość kinetyczna w 40 °C | mm <sup>2</sup> /s | 24,3,4–29,7 | AA_003-133<br>w oparciu<br>o DIN 51562/1     |
| Temperatura zapłonu        | °C                 | ≥ 180       | AA_003-125<br>w oparciu o DIN<br>EN ISO 2592 |
| Punkt krzepnięcia          | °C                 | ≤ – 40      | CB-O-010<br>w oparciu o DIN<br>ISO 3016      |
| Barwa                      | ----               | bezbardwy   | ----                                         |

#### 4.4. Warunki i zakres badań

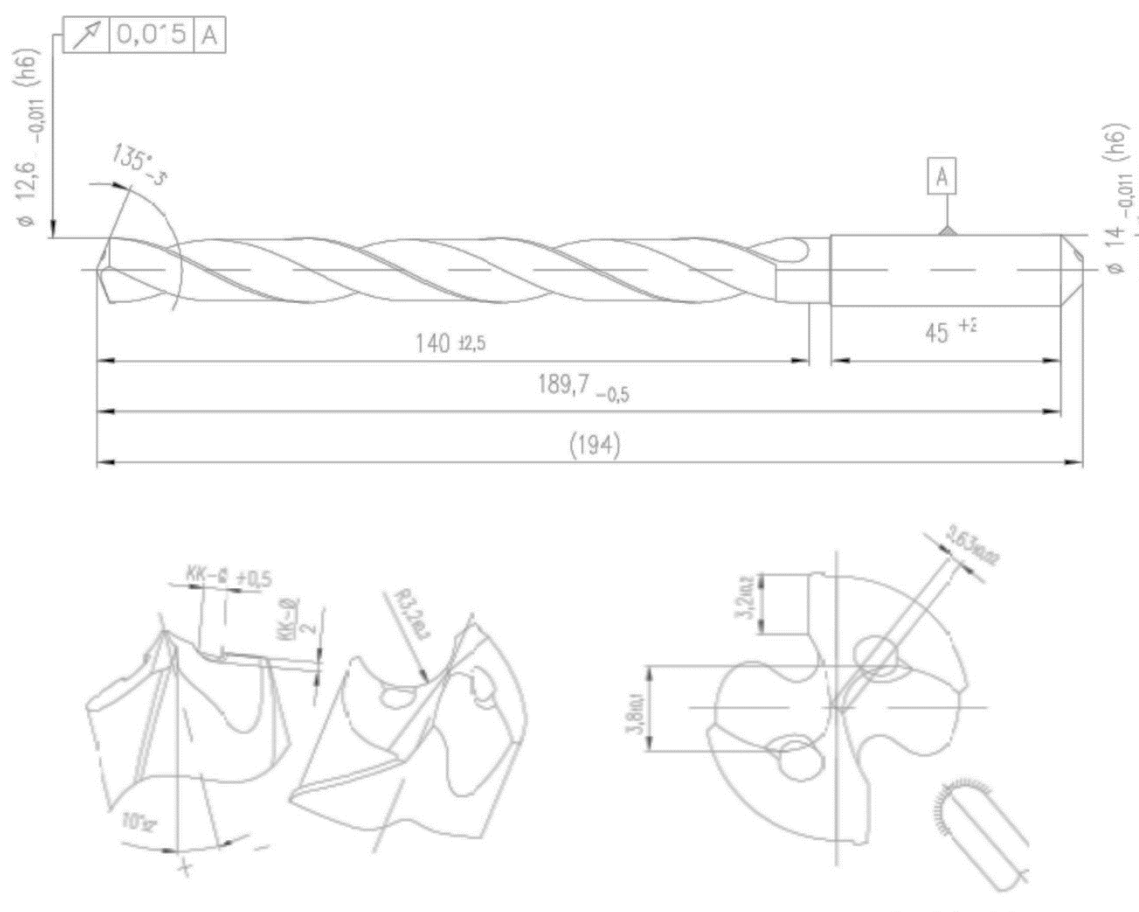
##### 4.4.1. Narzędzie skrawające

W trakcie badań doświadczalnych wykorzystano pełnowęglkowe wiertło z kanałami wewnętrznymi firmy Gühring, które zostało zamocowane w oprawce termokurczliwej 2-kanałowej MQL ThermoChuck z automatyczną wymianą narzędzi, z chwytem HSK-A zgodnie z DIN 69893-1 oraz z możliwością regulacją długości osiowej (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Zestaw narzędzia z oprawką do dostarczania cieczy chłodząco-smarującej w metodzie MQL z systemem 2-kanałowej komory mieszania

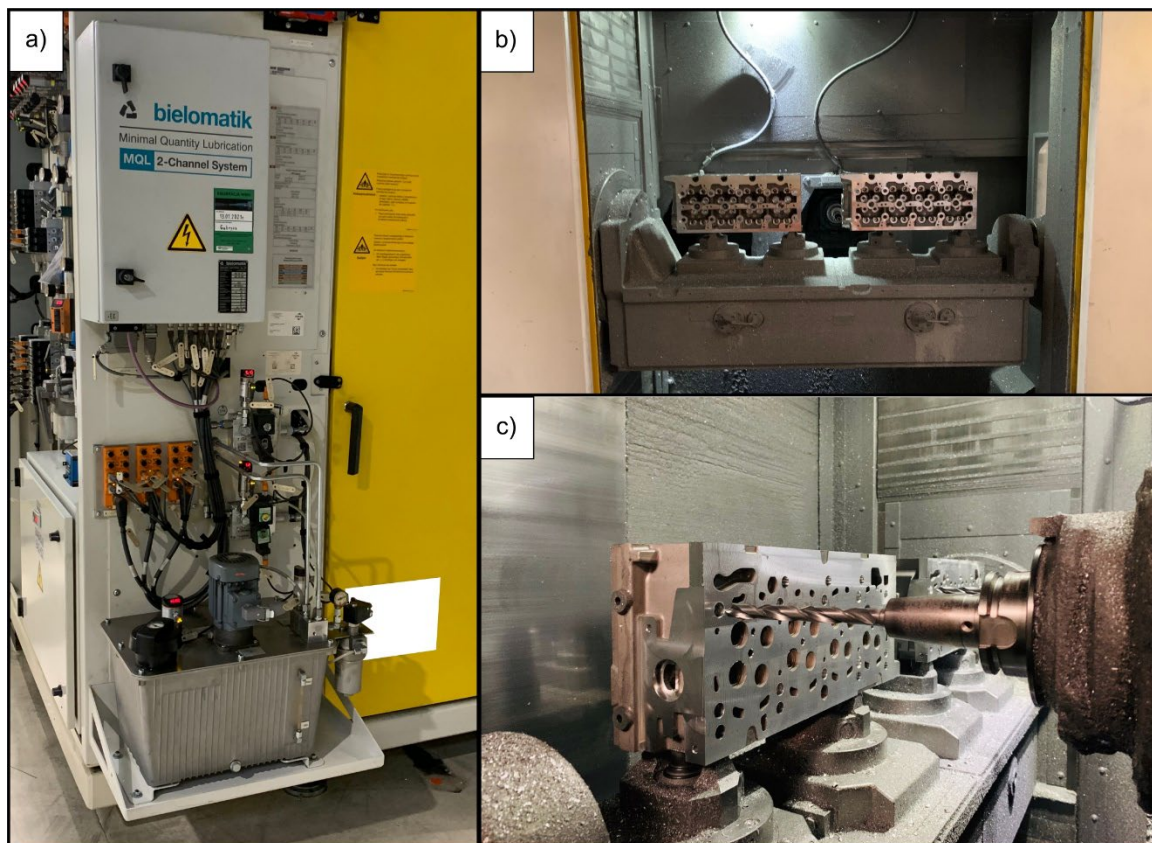
Wiertło pełnowęglkowe zostało wybrane do obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu), ponieważ mają mniejszą tendencję do zatarcia się, dzięki czemu obróbka aluminium jest bardziej wydajna. Ponadto stop aluminium ma dobrą przewodność cieplną, co oznacza, że ciepło wytworzone podczas obróbki może szybko się rozprzestrzeniać. Wiertła pełnowęglkowe, ze względu na swoją konstrukcję i właściwości materiałowe, mogą efektywnie odprowadzać ciepło, co przyczynia się do utrzymania odpowiedniej temperatury narzędzia i obrabianego materiału. Wybrano węgiel spiekany o oznaczeniu DK460UF według katalogu firmy Gühring z powłoką signum stosowany głównie do obróbki stopów aluminium, stali, żeliwa oraz „superstopów” np. Inconel 718. Rodzaj tego węgla charakteryzuje się głównie: zawartością kobaltu – 10%, wielkością ziaren węgla wolframu – 0,6  $\mu\text{m}$  oraz twardością – 1620 HV. Geometrię wiertła pełnowęglkowego użytego podczas badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.3. Geometria wiertła użytego podczas badań doświadczalnych

Wszystkie badania doświadczalne zostały wykonywane na poziomym 5-osiowym centrum obróbczym G320 firmy GROB (rys. 4.4). Centrum obróbcze wyposażone jest

w sterowanie obrabiarki Siemens 840D Solution Line, dwa wrzeciona z maksymalną prędkością obrotową 18 000 obr./min, dwa magazyny 40-narzędziowe oraz z możliwością przesunięcia narzędzia dla poszczególnych osi: X – 600 mm, Y – 655 mm i Z – 675 mm.

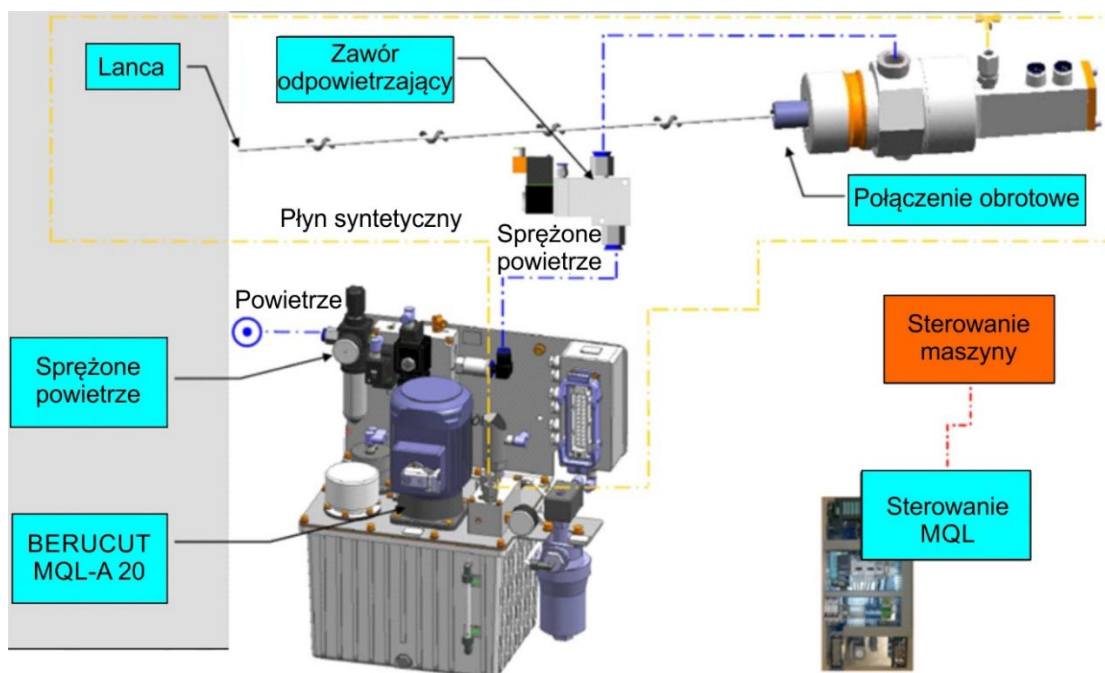


*Rys. 4.4. Centrum obróbcze 5-osiowe GROB G320: a) system 2-kanalowy MQL firmy bielomatik, b) dwa wrzeciona umożliwiają obróbkę dwóch przedmiotów obrabianych w tym samym czasie; c) strefa skrawania*

#### **4.4.2. Warunki dostarczania medium czynnego do strefy skrawania**

W celu podawania cieczy chłodząco-smarującej w postaci aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania wykorzystano urządzenie 2-kanalowe firmy bielomatik. Urządzenie to wyposażone jest w regulator przepływu natężenia płynu syntetycznego oraz natężenia przepływu powietrza. System 2-kanalowy w porównaniu do systemu 1-kanalowego charakteryzuje się możliwością stosowania mniejszych kanałów doprowadzających aerozol oraz unikaniem skraplania się na ścianach kanałów w wyniku ich „krętego” kształtu i wymieszaniem powietrza z cieczą chłodząco-smarującą po wyjściu z wrzeciona jeszcze przed narzędziem (rys. 4.1). Schemat poszczególnych komponentów przedstawiono na rys. 4.5.





Rys. 4.5. Komponenty systemu 2-kanalowego urządzenia bielomatik

Największym problemem w dostarczaniu medium czynnego przez kanały narzędzi przy stosowaniu metody zminimalizowanego smarowania są wahania prędkości strugi oraz ciśnienia w wyniku zmiany średnic zanim dotrze do kanału narzędzia. Jeśli doda się do tego siłę odśrodkową, rezultatem może być rozdzielenie medium czynnego na warstwy i osadzenie cienkiej, wolno płynącej warstewki płynu syntetycznego na zewnętrznych ściankach kanału. Zastosowanie systemu 2-kanalowego poprzez tworzenie aerozolu bezpośrednio przed kanałem narzędzia, który ma stałą średnicę zmniejsza intensywność ww. zjawisk, nawet jeżeli aerozol ma bardzo dobrą jednorodność. Jednym ze sposobów ograniczenia tego niekorzystnego zjawiska jest zastosowanie specjalnych rurek cienkościennych (rys. 4.2), których zadaniem jest zapewnienie możliwie jednorodnego aerozolu bez zaburzeń.

#### 4.4.3. Badania drgań narzędzia

W zakresie prowadzonych badań (zmienna prędkość obrotowa i zmienne natężenie przepływu cieczy chłodząco smarującej) dokonano pomiaru przyspieszenia drgań. W trakcie badań wstępnych ustalono, że najmniejsze drgania narzędzia uzyskano dla natężenia przepływu powietrza  $P = 40$  l/min, dlatego ten parametr tworzenia aerozolu został ustawiony jako stały. Wykonano także badania przy obróbce na sucho i chłodzeniu sprężonym powietrzem (również dla  $P = 40$  l/min). Pomiary przeprowadzono przy użyciu

miernika drgań wyposażonego w piezoelektryczny akcelerometr (Brüel & Kjær typu 4321), zamocowanego na materiale obrabianym. Sygnał zarejestrowany przez miernik był przekazywany do komputera poprzez wzmacniacz ładunków Nexus 2692/OS4 i tam podlegał rejestracji przy użyciu specjalistycznego oprogramowania do analizy sygnałów.

Podczas wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) sygnały przyspieszeń drgań mierzono w następujących kierunkach:

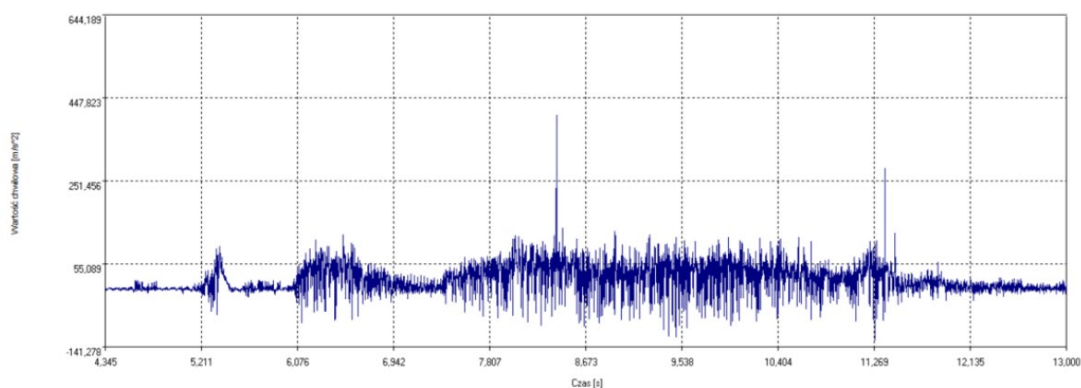
- ✓ kierunek X – przyspieszenie drgań w osi X (kierunek poprzeczny do osi wiertła) –  $A_x$  [m/s<sup>2</sup>],
- ✓ kierunek Y – przyspieszenie drgań w osi Y (kierunek poprzeczny do osi wiertła) –  $A_y$  [m/s<sup>2</sup>],
- ✓ kierunek Z – przyspieszenie drgań w osi Z (kierunek posuwowy) –  $A_z$  [m/s<sup>2</sup>].

Pomiary powtarzano 3-krotnie dla każdej badanej kombinacji parametrów wejściowych procesu w celu ich dalszej analizy.

W przeprowadzonych badaniach częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła  $f_{pr} \approx 16\,384$  Hz. Sygnały przyspieszeń drgań zarejestrowano w dziedzinie czasu. Wyznaczono również miary statystyczne oraz charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe (w oparciu o szybką transformatę Fouriera - FFT) zarejestrowanych sygnałów przyspieszeń drgań. Poddano analizie następujące miary sygnałów:

- ✓ szczytowa wartość składowych przyspieszeń drgań ( $A_{x\_peak}$ ,  $A_{y\_peak}$ ,  $A_{z\_peak}$ );
- ✓ średniokwadratowa (root mean square) składowych przyspieszeń drgań ( $A_{x\_RMS}$ ,  $A_{y\_RMS}$ ,  $A_{z\_RMS}$ ).

Podczas prób wiercenia, w celu wyznaczenia miar statystycznych sygnałów przyspieszeń drgań wzięto pod uwagę przedział czasowy odpowiadający całkowitemu czasowi maszynowemu (z uwzględnieniem czasu dobiegu i wybiegu ostrza skrawającego z materiału obrabianego – rys. 4.6).

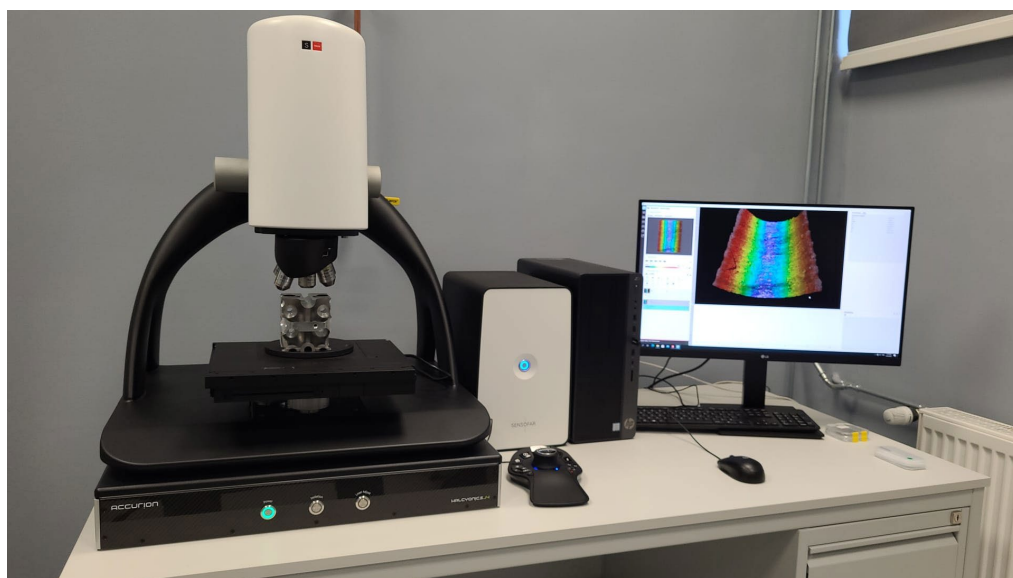


Rys. 4.6. Przykładowy przebieg czasowy zmierzonego sygnału drgań podczas wiercenia

#### 4.4.4. Badania topografii powierzchni

Do pomiarów topografii powierzchni otworów wykorzystano profilometr optyczny Sensofar S neox (rys. 4.7), który posiada zaawansowany technologicznie system opierający się na opatentowanej technologii „mikro wyświetlacza” wbudowanego wewnątrz głowicy. Urządzenie oferuje 4 różne źródła oświetlenia monochromatycznego LED, zielone, niebieskie, czerwone i białe. Taka konstrukcja powoduje, że wewnątrz głowicy systemu nie ma żadnych ruchomych elementów, co pozwala z kolei uzyskać niezwykle szybki czas skanowania powierzchni przy zachowaniu wysokich dokładności oraz powtarzalności pomiarowych.

W trakcie pomiarów wykorzystano metodę konfokalną, najbardziej uniwersalną, wykorzystywaną w celu podniesienia dokładności pomiarów, a więc do powierzchni o mniejszej chropowatości i zróżnicowaniu kształtów, pozwalającej uzyskać rozdzielczości na poziomie 1 nm w osi Z dla obiektywów o wysokiej aperturze numerycznej. Pomiary wykonano zgodnie z normą ISO 25178 przy wykorzystaniu obiektywu marki Nikon o 10-krotnym powiększeniu. Obróbkę skanowanych powierzchni wykonano przy wykorzystaniu oprogramowania MountainsMap.



*Rys. 4.7. Mikroskop optyczny Sensofar S neox*

Pomiaru dokonywano na 10 różnych otworach, wykonanych podczas obróbki pierwszej głowicy dla zmiennych parametrów tworzenia aerozolu: natężenia przepływu płynu syntetycznego i natężenia przepływu powietrza oraz zmiennej prędkości obrotowej. Dla każdej próby (zmiana parametrów tworzenia aerozolu i prędkości obrotowej wiertła)

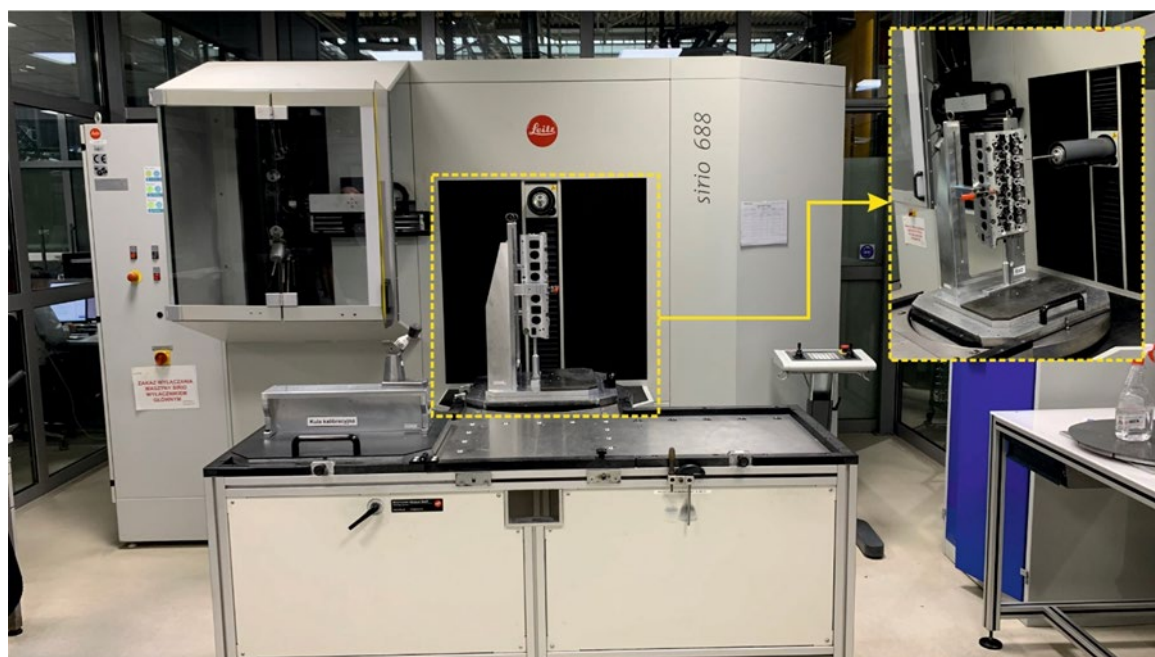
używano nowego wiertła w celu uniknięcia wpływu zużycia wiertła. Pomiarów wykonywano dla 10 otworów wykonanych dla dwóch głowic samochodowych (rys. 4.4c). Do analizy wyników badań topografii powierzchni obrobionej wybrano następujące parametry skrawania:

- ✓  $Sq$  – średnia kwadratowa wysokość powierzchni o ograniczonej skali – parametr wykorzystywany częściej w obróbce skrawaniem niż parametr  $Sa$ , ponieważ jest to odchylenie standardowe, które informuje o stopniu rozrzutu wartości danej wielkości wokół jej średniej. Oznacza to, że im mniejsza jest wartość odchylenia standardowego, tym bardziej zbliżone są obserwacje do średniej. Dodatkowo, odchylenie standardowe jest równoważne pierwiastkowi kwadratowemu z wariancji ( $Sq$ ), natomiast średnia arytmetyczna to suma liczb podzielona przez ich liczbę ( $Sa$ ).
- ✓  $Sz$  – największa wysokość powierzchni o ograniczonej skali – parametr, który jest wrażliwy na pojedyncze wgłębienia, doły, szczyty czy grzbiety powierzchni obrobionej.
- ✓  $Ssk$ ,  $Sku$  – parametry podatne na wyraźne, wysokie wzniesienia i głębokie doliny, te cechy także dostarczają informacji o rozmieszczeniu szczytów na powierzchni. Parametry przestrzenne związane są z określeniem krzywej służącej do linearyzacji, co oddziałuje na zdolność zatrzymywania oleju lub smaru.
- ✓ parametry objętościowe ( $Vmc$ ,  $Vmp$ ,  $Vvc$ ,  $Vvv$ ) – ich wartości pozwalają na uzyskanie informacji o nierównościach, wklęsłościach i wypukłościach na powierzchni, co jest ważne dla kontroli jakości i funkcjonalności komponentów, m.in. dają możliwość przewidywania właściwości funkcjonalnych, takich jak retencja oleju, odprowadzanie cieczy czy interakcje między powierzchnią a materiałami użytkowymi;
- ✓ dodatkowo analizowano mapy warstwiczne oraz widoki izometryczne, które dostarczają informacji o jej trójwymiarowej strukturze, kształcie, nachyleniach i zmianach wysokości nierówności powierzchni obrobionej.

#### **4.4.5. Badania dokładności wymiarowo-kształtowej otworów**

Badania dokładności wymiarowo-kształtowej otworów przeprowadzono z użyciem robota kabinowego SIRIO C 668 (rys. 4.8). Maszyna pomiarowa jest wyposażona w łożo, kolumnę wraz z suportem X/Y, głowicę oraz system pomiarowy, a także konsolę sprzężoną ze stołem obrotowym. Sztywne połączenie urządzenia głównego ze stołem zapewnia pomijalnie mały błąd pomiarowy generowany podczas ruchów. Sterowanie obrotem osi

odbywa się w trybie numerycznym przy wykorzystaniu komend w oprogramowaniu QUINDOS. Za pomocą oprogramowania sterującego możliwe jest także załączanie i wyłączanie ręcznej obsługi stołu obrotowego. Pomiar dokonywany jest w wyniku kontaktu końcówki pomiarowej z próbką, przez co generowany jest impuls dźwięku materiałowego. Następnie za pomocą czujników piezoelektrycznych ulega on przetworzeniu w sygnał zapisywany w bazie danych, co powoduje rejestrację wartości pozycji osi. Dzięki rozbudowanemu systemowi kontroli sprawdzana jest poprawność pomiaru. Dynamiczny sposób pomiaru zapewnia wyeliminowanie wpływu ugięcia końcówki pomiarowej na pomiar, ponieważ w chwili, gdy wartość pomiarowa jest przetwarzana, końcówka pomiarowa ulega działaniu pomijalnie małej siły. Badania wykonywano dla każdego otworu głowicy (razem 10 otworów) w zależności od zmiennych parametrów tworzenia aerozolu: natężenia przepływu płynu syntetycznego i natężenia przepływu powietrza oraz zmiennej prędkości obrotowej wrzeciona.



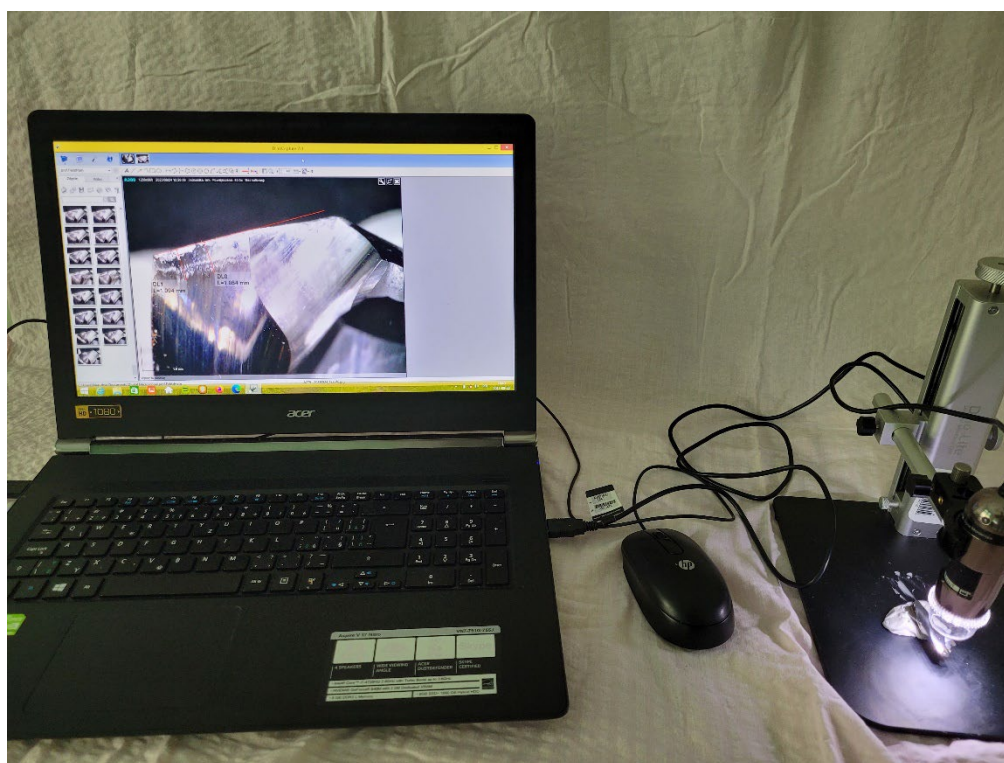
Rys. 4.8. Robot kabinowy SIRIO C 668

#### 4.4.6. Badania zużycia narzędzi

Badania zużycia wiertła wykonano przy wykorzystaniu mikroskopu uniwersalnego Dino Lite, gdzie określono szerokość żłobka na powierzchni natarcia  $KB$  (rys. 4.9). Pomiaru wybranego wskaźnika zużycia ostrza skrawającego dokonywano, co 1000 wykonanych otworów, aż do wykonania 3000 otworów. Nie wykonano pomiarów pasma

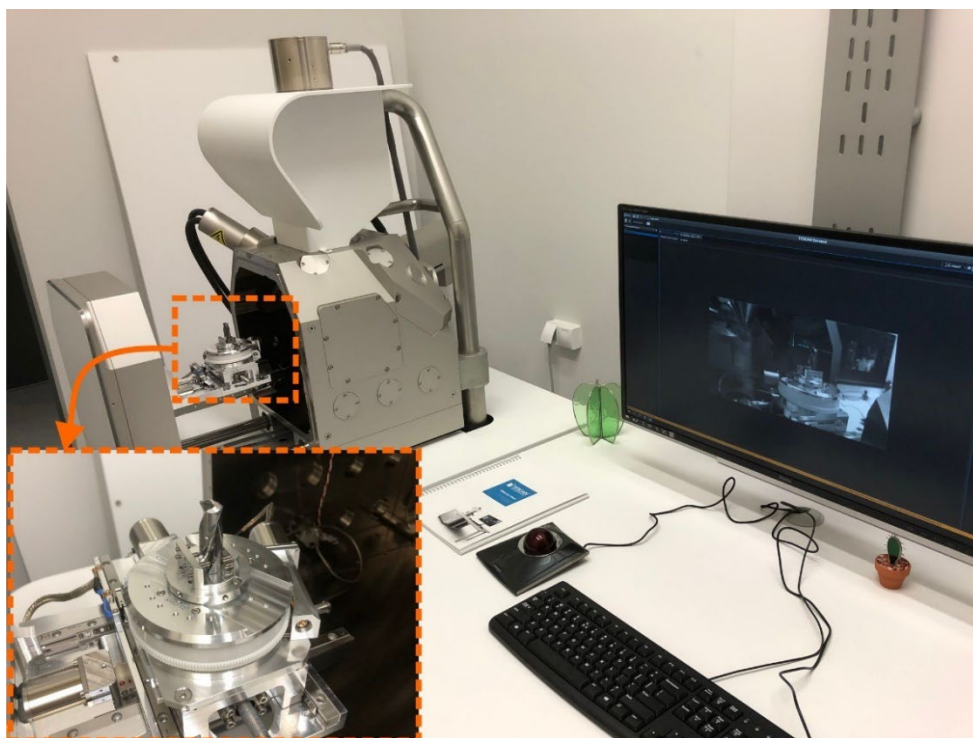


zużycia na powierzchni przyłożenia ze względu na zwiększone zjawisko narostu podczas obróbki stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$ , co utrudniało pomiary. Natomiast w celu analizy mechanizmów zużycia wiertła wykorzystano mikroskop skaningowy TESCAN VEGA GMU (rys. 4.10). Jest to skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) czwartej generacji z wolframową katodą termoemisyjną, który umożliwia obrazowanie SEM w czasie rzeczywistym i analizę składu pierwiastkowego w jednym oknie oprogramowania TESCAN Essence™, co znacznie upraszcza zarówno morfologię powierzchni próbki, jak i lokalne dane dotyczące składu pierwiastkowego i sprawia, że TESCAN VEGA jest skutecznym rozwiązaniem analitycznym do rutynowej kontroli jakości materiałów oraz analizy uszkodzeń.



*Rys. 4.9. Mikroskop uniwersalny Lito Dine*

W trakcie badań wstępnych w warunkach zminimalizowanego smarowania wybrano zmienny parametr tworzenia aerozolu w metodzie MQL, który miał największy wpływ na zużycie narzędzia, czyli parametr natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$ . Pozostałe parametry były stałe i wynosiły odpowiednio: prędkość obrotowa  $n = 7000$  obr./min oraz natężenie przepływu objętościowego cieczy chłodząco-smarującej  $E = 40$  ml/h. Badania wykonano również dla chłodzenia sprężonym powietrzem i obróbki na sucho.



*Rys. 4.10. Mikroskop skaningowy elektronowy TESCAN VEGA GMU*





## 5. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

### 5.1. Ocena drgań narzędzia

#### 5.1.1. Analiza przebiegów czasowych i charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań

Drgania powstałe podczas wiercenia należą do niekorzystnych zjawisk fizycznych, wpływających na stan struktury geometrycznej powierzchni obrobionej (np. błędy kształtu, chropowatość i falistość powierzchni), a niekiedy również na trwałość ostrza skrawającego. Głównym źródłem drgań powstałych podczas wiercenia są błędy geometryczne w układzie obrabiarka-uchwyt-narzędzie, a także zmienne w czasie ugięcia części roboczej wiertła wynikające z obecności zmiennych w czasie sił. W związku z tym, wartości sił wygenerowane w procesie wiercenia są bardzo istotne z punktu widzenia drgań. Zastosowanie różnych metod chłodzenia strefy skrawania może znacząco wpłynąć na zjawiska termomechaniczne i tribologiczne zachodzące w strefie skrawania, a w ten sposób również na siły powstałe w procesie. Dlatego też, zasadnym jest poddanie ocenie różnych metod chłodzenia podczas wiercenia z punktu widzenia przyspieszeń drgań powstałych podczas obróbki.

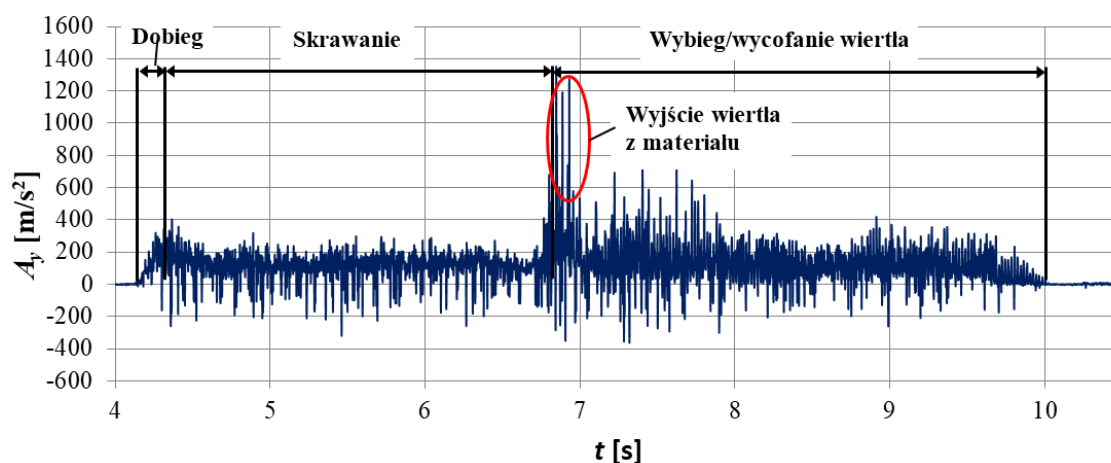
Pierwszy etap analizy przyspieszeń drgań obejmował ocenę jakościową i ilościową przebiegów czasowych drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$ , wygenerowanych podczas wiercenia z zastosowaniem różnych metod chłodzenia strefy skrawania (obróbka na sucho, chłodzenie z zastosowaniem sprężonego powietrza, MQL ze zmiennym natężeniem przepływu płynu obróbkowego  $E$ ). Wyniki badań zaprezentowano na rysunkach 5.1 – 5.6.

Proces wiercenia przelotowego składał się z następujących głównych etapów:

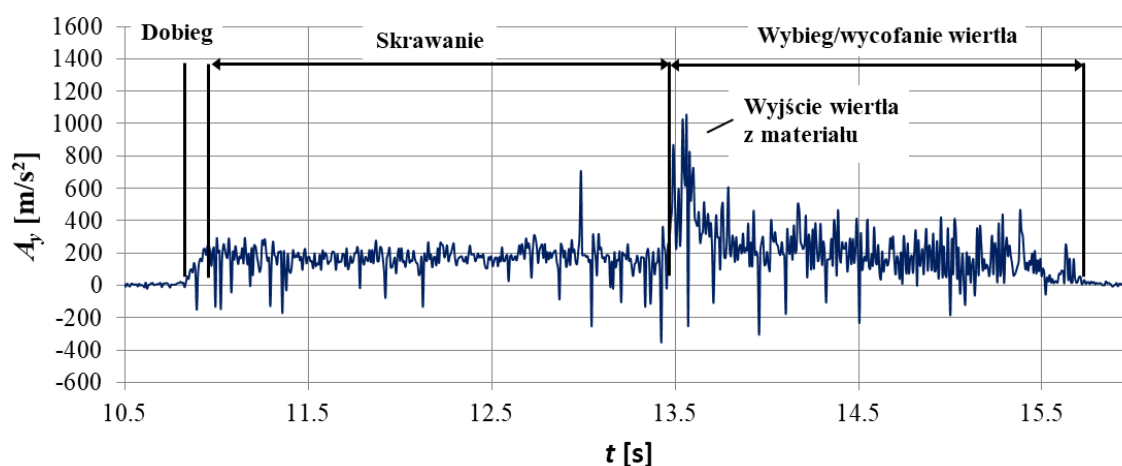
- dobieg narzędzia skrawającego;
- wiercenie;
- wybieg narzędzia z materiału obrabianego;
- wycofanie narzędzia.

W etapie dobiegu narzędzia – niezależnie od zastosowanej metody chłodzenia strefy skrawania – widoczny jest wzrost wartości chwilowych przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu. Wywołane jest to zwiększeniem długości styku czynnych krawędzi skrawających wiertła (zarówno głównych, jak i pomocniczych) z materiałem obrabianym. W pierwszej

fazie, w procesie wiercenia bierze udział ścin wiertła zlokalizowany na części czołowej narzędzia oraz następuje zagłębianie się głównej krawędzi skrawającej w materiał obrabiany.

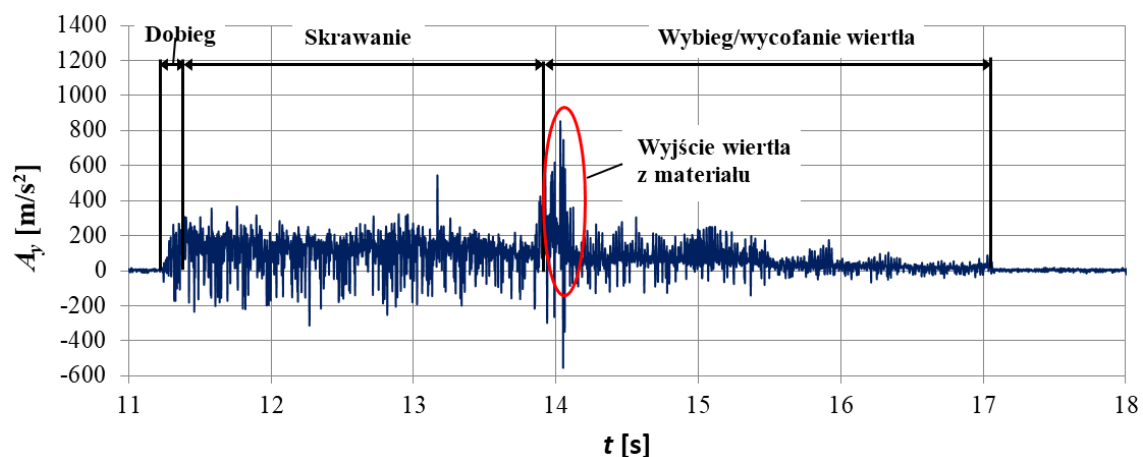


Rys. 5.1. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$  podczas wiercenia na sucho z  $n = 7000$  obr./min

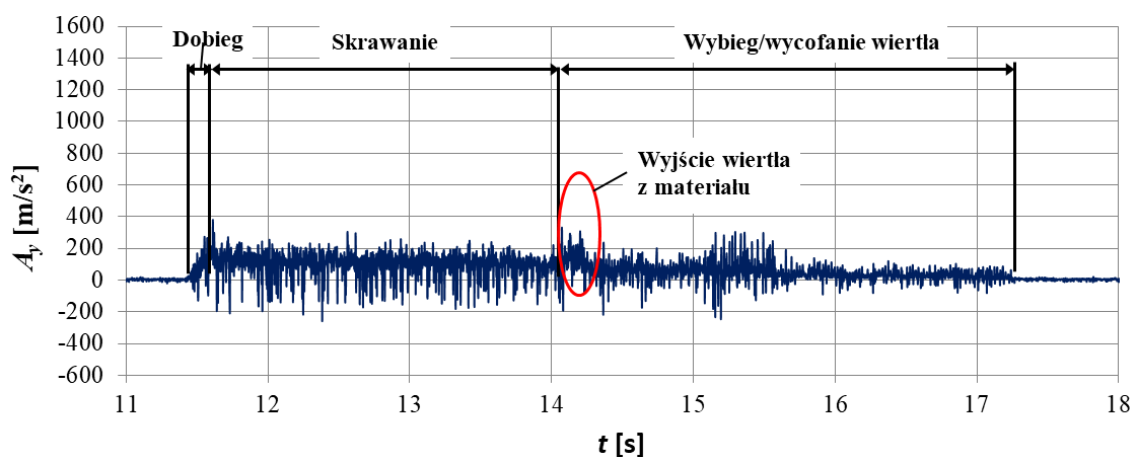


Rys. 5.2. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$  podczas wiercenia z  $n = 7000$  obr./min w warunkach chłodzenia sprężonym powietrzem

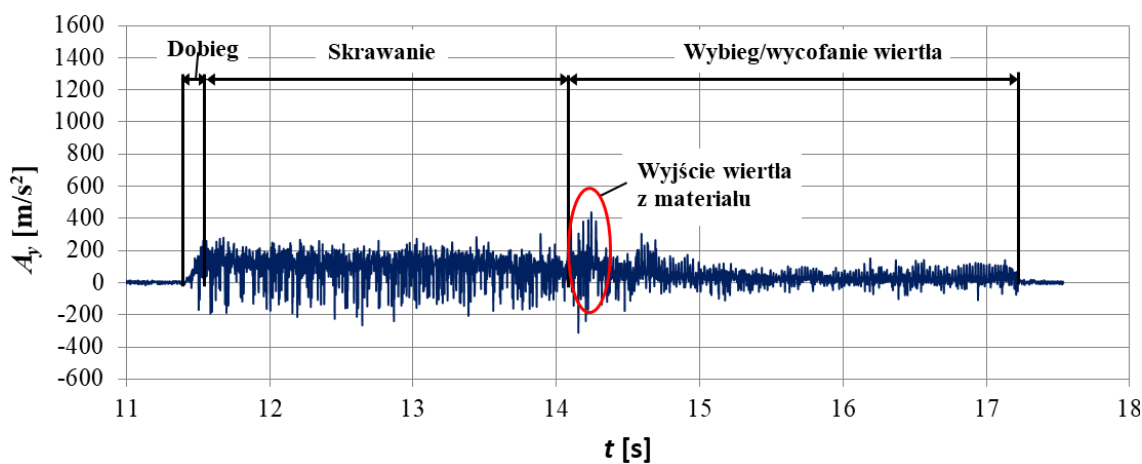
Fazę tę charakteryzuje zwiększenie wartości obciążenia w czasie. Następnie, po zagłębieniu się całej głównej krawędzi skrawającej w materiał obrabiany, występuje styk pomocniczych krawędzi skrawających z obrobionym przedmiotem i względnie stałe obciążenie w czasie obróbki. Oznacza to przejście do etapu skrawania, w trakcie którego, chwilowe amplitudy przyspieszeń drgań pozostają na relatywnie stałym poziomie (rys. 5.1–5.6). W przyjętych warunkach wejściowych wiercenia, etap dobiegu oraz skrawania trwa około 2,7 sekundy.



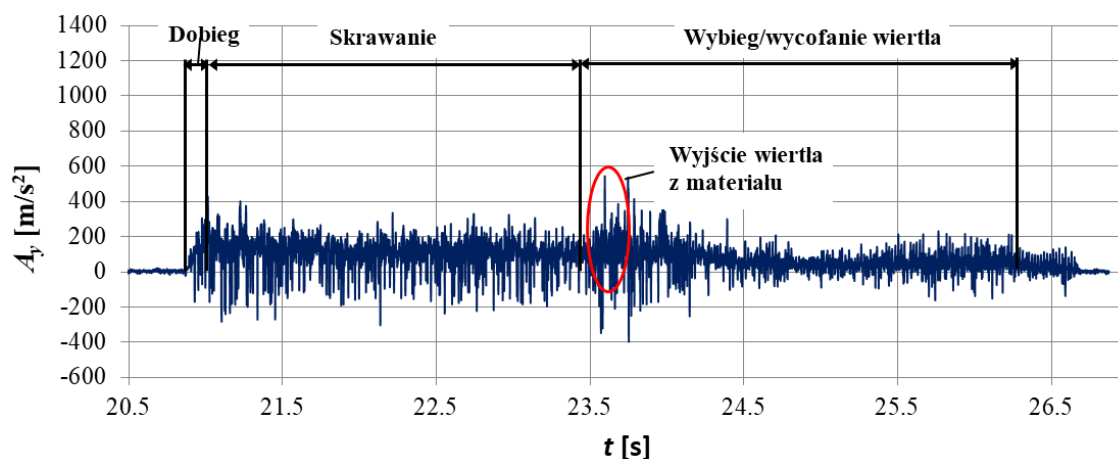
Rys. 5.3. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$  podczas wiercenia z  $n = 7000$  obr./min przy zastosowaniu metody MQL ( $E = 75$  ml/h)



Rys. 5.4. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$  podczas wiercenia z  $n = 7000$  obr./min przy zastosowaniu metody MQL ( $E = 40$  ml/h)



Rys. 5.5. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$  podczas wiercenia z  $n = 7000$  obr./min przy zastosowaniu metody MQL ( $E = 25$  ml/h)



Rys. 5.6. Przebieg czasowy przyspieszeń drgań w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_y$  podczas wiercenia z  $n = 7000$  obr./min przy zastosowaniu metody MQL ( $E = 15$  ml/h)

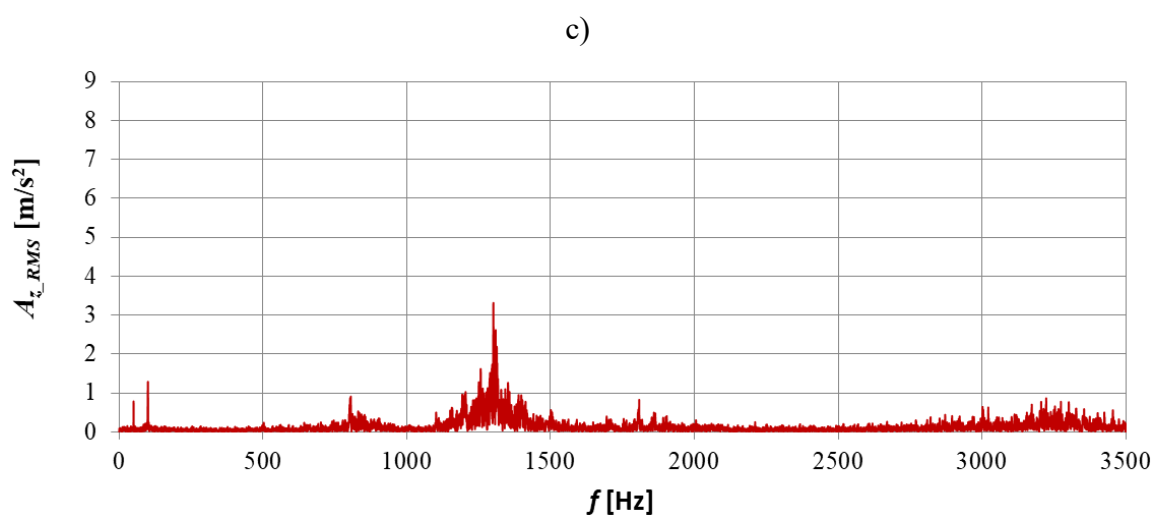
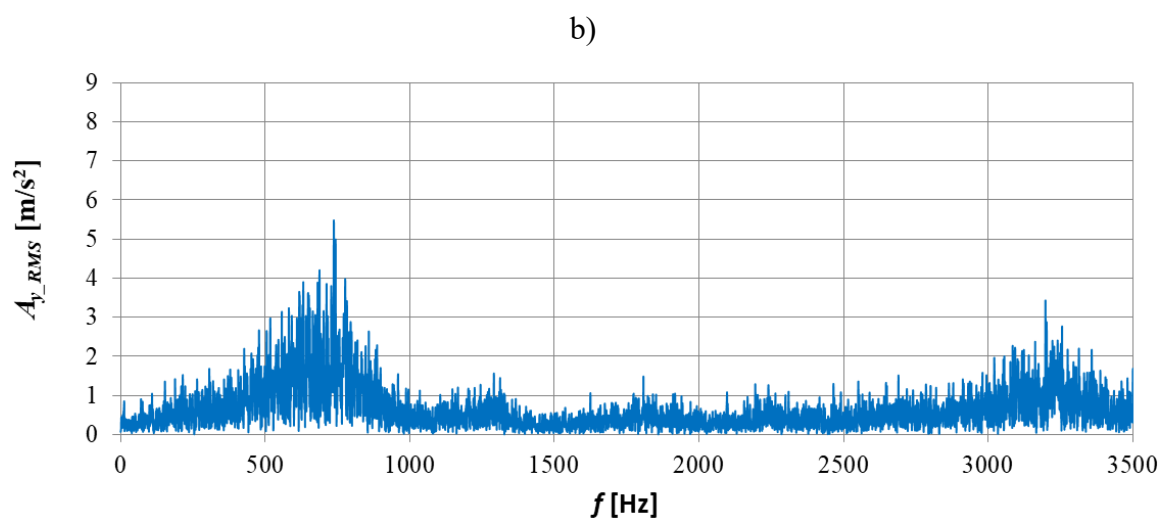
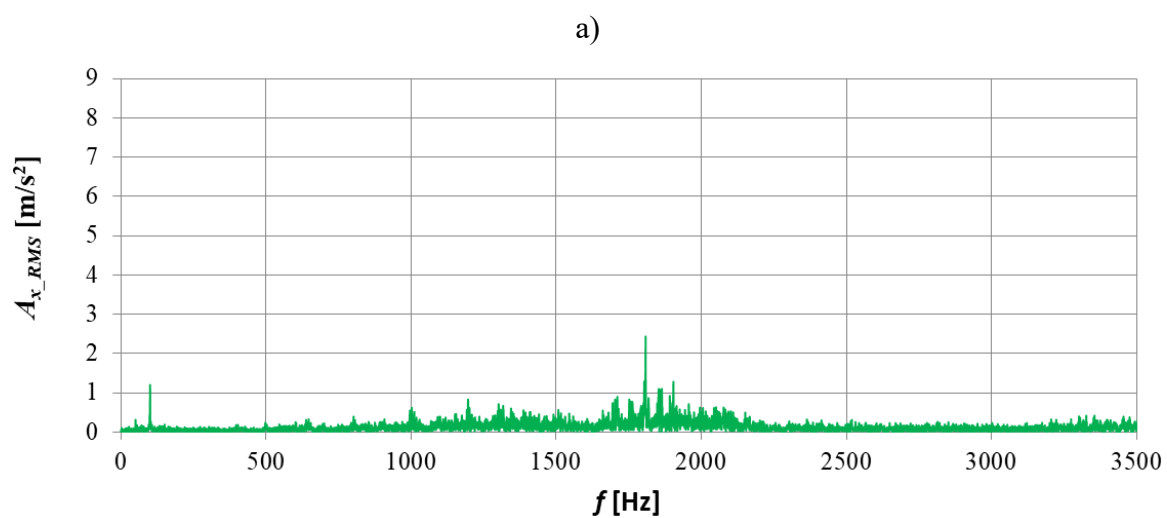
Kolejny etap obejmuje przebicie (przez część roboczą wiertła) dna wykonanego otworu i wybieg narzędzia z przedmiotu obrabianego. W zakresie wiercenia z zastosowaniem wybranych metod chłodzenia strefy skrawania (na przykład: obróbka na sucho, chłodzenie z zastosowaniem sprężonego powietrza), zaobserwowano gwałtowny skok chwilowych amplitud przyspieszeń drgań podczas etapu wyjścia wiertła z materiału obrabianego. Podczas wiercenia na sucho i z zastosowaniem sprężonego powietrza chwilowe amplitudy przyspieszeń drgań były w tym etapie pracy narzędzia nawet około 3,5 razy większe od amplitud zarejestrowanych podczas etapu wiercenia (rys. 5.1, 5.2). W przypadku wiercenia z zastosowaniem metody MQL i parametru  $E = 75$  ml/h (rys. 5.3) drgania podczas wyjścia wiertła z materiału obrabianego były około 3,2 razy większe od amplitud zarejestrowanych podczas etapu wiercenia. Niemniej podczas wiercenia w warunkach zminimalizowanego smarowania z zastosowaniem wartości parametru:  $E = 15$  ml/h,  $E = 25$  ml/h,  $E = 40$  ml/h, wartości przyspieszeń drgań podczas wyjścia narzędzia były na poziomie drgań występujących podczas etapu wiercenia. Obserwacja ta wskazuje na jednoznaczny wpływ zastosowanej metody chłodzenia strefy skrawania oraz wydatku przepływu cieczy chłodząco-smarującej na poziom drgań podczas wyjścia ostrza z materiału obrabianego. Przyczyną intensywnego wzrostu amplitud przyspieszeń drgań podczas wiercenia z zastosowaniem niektórych metod chłodzenia strefy skrawania w trakcie wyjścia narzędzia z przedmiotu obrabianego może być duży nacisk dna otworu/formowanego zadzioru (podczas przelotu wiertła) na narzędzie, przyczyniające się do lokalnego wzrostu składowych siły całkowitej, a w ten sposób drgań. Niemniej, podczas wiercenia

z zastosowaniem metody MQL i niektórych wartości natężenia przepływu płynu syntetycznego następuje prawdopodobnie zwiększenie smarowania strefy skrawania (możliwe jest wytworzenie tzw. tribofilmu na powierzchniach natarcia i przyłożenia wiertła), co przyczynia się do zmniejszenia obciążeń podczas wyjścia wiertła z materiału obrabianego [125].

Kolejny etap pracy narzędzia obejmował wycofanie wiertła (poprzez obrobiony otwór) z materiału obrabianego. W zakresie tego etapu, podczas wiercenia na sucho i z zastosowaniem sprężonego powietrza (rys. 5.1, 5.2) zaobserwowano wzrost poziomu chwilowych amplitud drgań w porównaniu do wartości występujących w procesie wiercenia. Oznaczać to może, iż w zakresie wycofania narzędzia powstają relatywnie wysokie poziomy przyspieszeń drgań wywołane błędami geometrycznymi oraz zjawiskami tarciovymi w strefie styku pomocnicze powierzchnie przyłożenia wiertła – materiał obrobiony. Warto zwrócić uwagę, iż w przypadku wiercenia z zastosowaniem metody MQL (rys. 5.3–5.6) następuje smarowanie powierzchni styku narzędzie – przedmiot obrobiony, w wyniku czego poziomy amplitud przyspieszeń drgań podczas wybiegu wiertła są porównywalne (a w niektórych przypadkach nawet mniejsze) od wartości powstałych w etapie wiercenia.

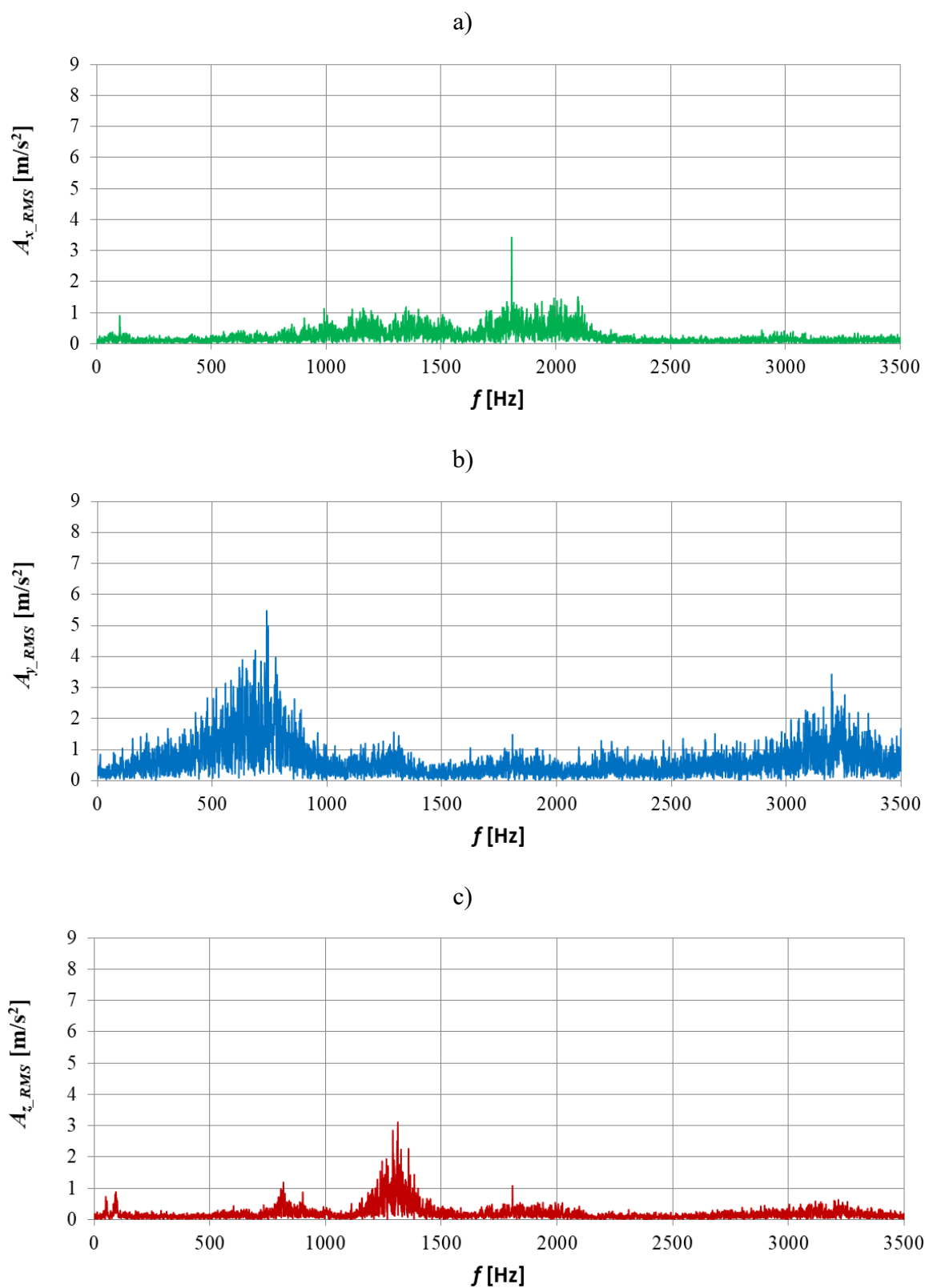
Kolejny etap analizy zarejestrowanych sygnałów obejmował ocenę charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych przyspieszeń drgań. W celu identyfikacji składowych częstotliwościowych zmierzonych sygnałów przyspieszeń drgań opracowano charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe wyznaczone w oparciu o szybką transformatę Fouriera (Fast Fourier Transform - FFT). Analiza FFT polega na dekompozycji sygnału periodycznego na cząstkowe składowe o określonej amplitudzie i częstotliwości (elementarne funkcje sinusoidalne). W ten sposób umożliwia analizę złożonego, okresowo-zmiennego sygnału pod kątem zjawisk dynamicznych wpływających na charakter tego przebiegu. W procesie skrawania analiza FFT umożliwia identyfikację takich zjawisk jak np. drgania układu OUPN wywołane błędami geometrycznymi (np. bicie osiowe i promieniowe elementów układu OUPN), drgania samowzbudne, drgania rezonansowe, segmentacja wiórów i inne.

Z przeprowadzonej analizy FFT sygnałów przyspieszeń drgań (rys. 5.7–5.9) wynika, iż niezależnie od zastosowanych warunków chłodzenia i smarowania, w procesie wiercenia z prędkością  $n = 7000$  obr./min wyróżnić można obecność dominujących składowych częstotliwościowych przyspieszeń drgań, których przedział występowania zależy od rozpatrywanej składowej przyspieszeń drgań.

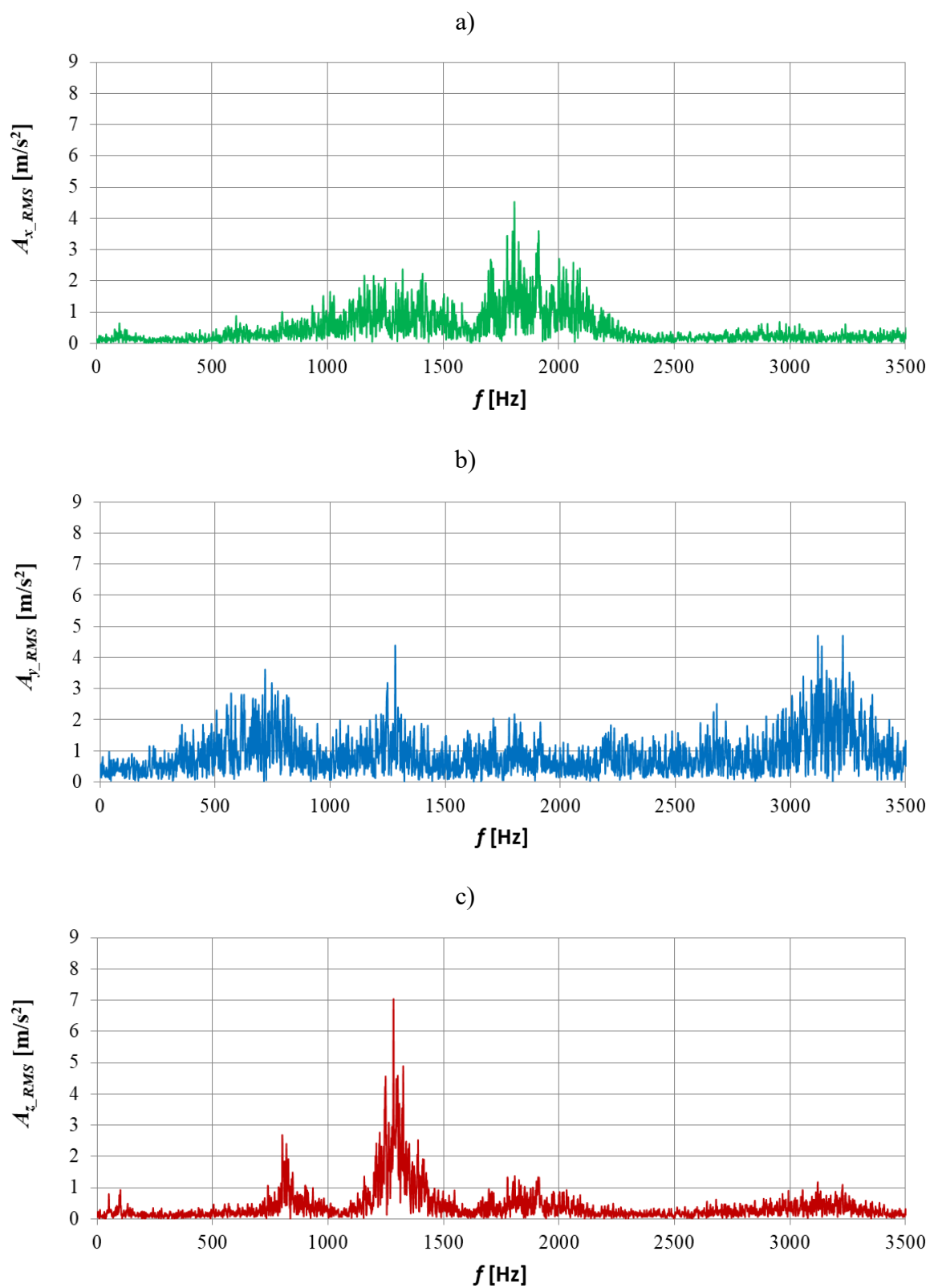


Rys. 5.7. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowa (FFT) przyspieszeń drgań podczas wiercenia na sucho z  $n = 7000 \text{ obr./min}$ : a)  $A_x$ ; b)  $A_y$ ; c)  $A_z$





Rys. 5.8. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowa (FFT) przyspieszeń drgań podczas wiercenia z chłodzeniem sprężonym powietrzem  
z  $n = 7000$  obr./min: a)  $A_x$ ; b)  $A_y$ ; c)  $A_z$



Rys. 5.9. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowa (FFT) przyspieszeń drgań podczas wiercenia w warunkach MQL ( $E = 40 \text{ ml/h}$ )  
z  $n = 7000 \text{ obr./min}$ : a)  $A_x$ ; b)  $A_y$ ; c)  $A_z$

Dla każdej z badanych metod chłodzenia strefy skrawania, dominujące piki składowych częstotliwościowych przyspieszeń drgań występują:

- w zakresie od około 600 Hz do 2100 Hz dla składowej  $A_x$ ,
- w zakresie od około 500 Hz do 1000 Hz oraz 3000 Hz do 3500 Hz dla składowej  $A_y$ ,
- w zakresie od około 7500 Hz do 850 Hz oraz 1100 Hz do 1400 Hz dla składowej  $A_z$ .

Należy podkreślić, iż obecność tych dominujących składowych częstotliwościowych nie jest związana z kinematyką procesu opisaną składowymi częstotliwościowymi prędkości obrotowej wrzeciona ( $f_{no} = 50$  Hz) i przejścia ostrzy ( $f_o = 100$  Hz). W związku z tym mogą być wywołane pewnymi zjawiskami dynamicznymi w procesie wiercenia, związanymi z właściwościami dynamicznymi układu OUPN (np. częstotliwościami własnymi narzędzia, wrzeciona, uchwytu, przedmiotu obrabianego, itd.).

#### **5.1.2. Analiza statystycznej istotności wpływu parametrów wejściowych wiercenia na przyspieszenia drgań**

W niniejszym podrozdziale określono statystyczną istotność wpływu wybranych parametrów wejściowych procesu wiercenia na wartości średniokwadratowe (RMS) przyspieszenia drgań.

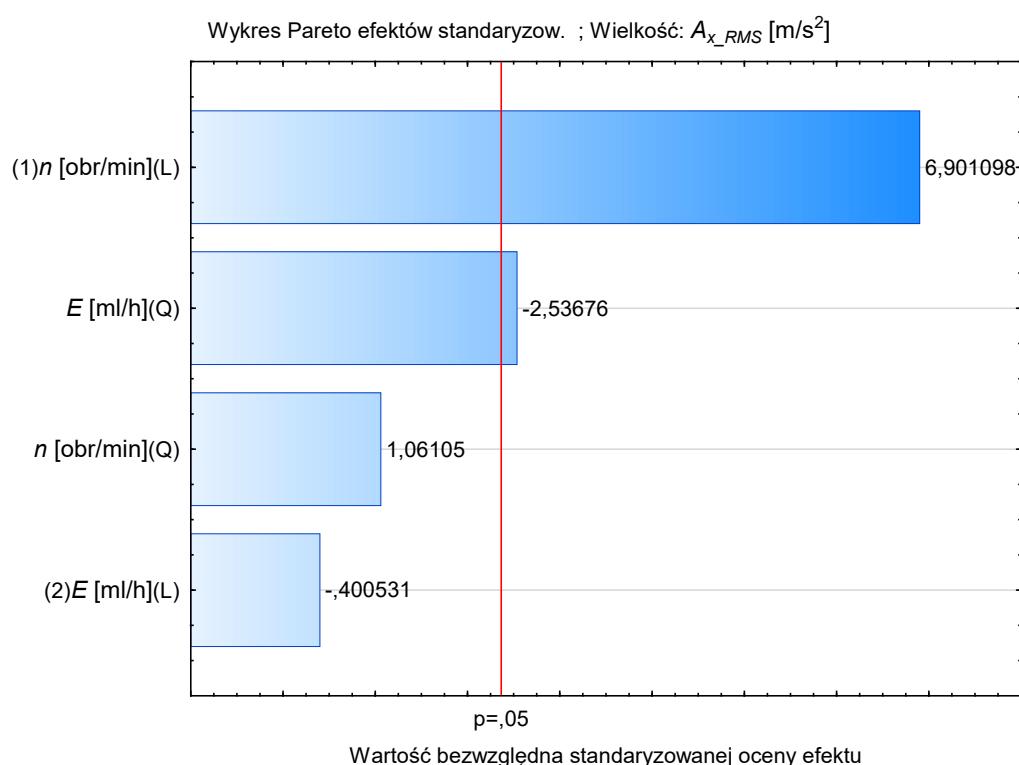
Aby uwzględnić niemonotoniczny wpływ wielkości wejściowych wiercenia na wartości RMS przyspieszenia drgań przyjęto modele regresji w postaci równań kwadratowych dwóch i trzech zmiennych. Kolejno, względem wyznaczonych wartości RMS przyspieszeń drgań (dla badanych wielkości wejściowych procesu) i zamodelowanych w programie Statistica 13 równań regresji (miary RMS przyspieszenia drgań), dokonano analizy wariancji ANOVA, przyjmując przedziały ufności na poziomie 95% (poziom istotności 5%).

Po przeprowadzeniu analizy opracowano wykresy Pareto efektów standaryzowanych, przedstawiające porównanie wartości bezwzględnych standaryzowanej oceny efektu dla badanych wielkości wejściowych, odnosząc je do liniowej (na wykresach jako  $L$ ) i kwadratowej (na wykresach jako  $Q$ ) zależności. Podczas, gdy wartości bezwzględne standaryzowanej oceny efektu dla danej wielkości wejściowej (np. parametru przepływu cieczy  $E$ ) są mniejsze od krytycznej wartości oceny efekty (oznaczonej na wykresach pionową czerwoną linią), wówczas określona wielkość wejściowa nie wywiera

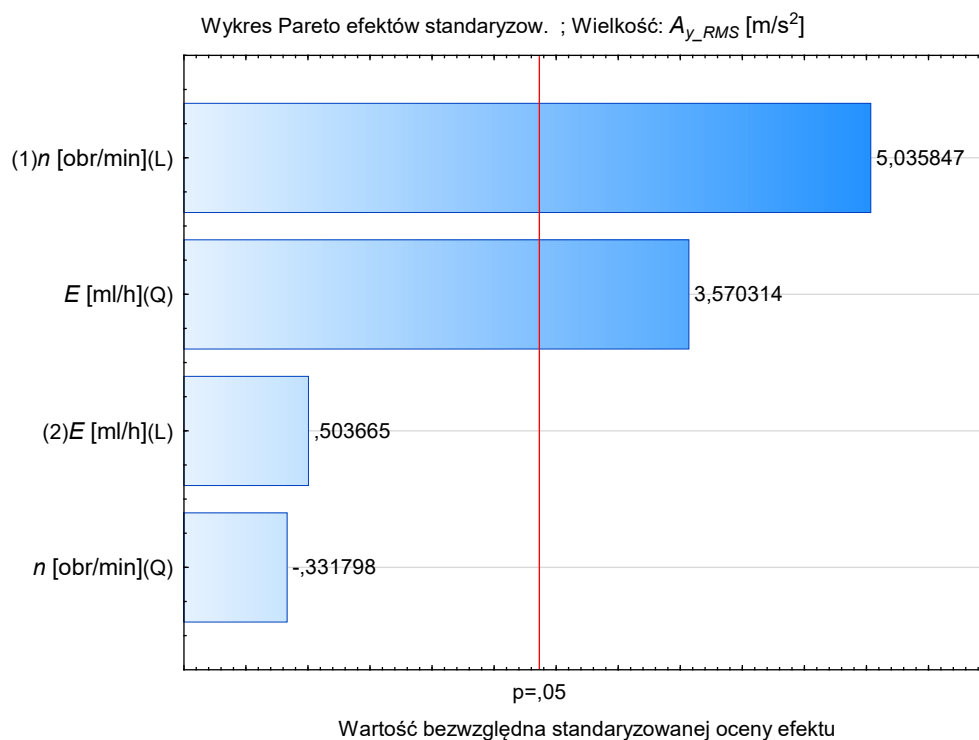
statystycznie istotnego wpływu (przyjmując poziom istotności 5%) na przebiegi wartości RMS przyspieszenia drgań, opisanych funkcją liniową lub kwadratową. Podczas, gdy wartość bezwzględna standaryzowanej oceny efektu przekracza wartość krytyczną, stwierdza się, iż dana wielkość wejściowa wiercenia posiada statystycznie istotny wpływ na przebiegi wartości RMS przyspieszenia drgań, opisanych funkcją liniową lub kwadratową.

Rysunki 5.10–5.12 przedstawiają wykresy Pareto efektów standaryzowanych dla wartości RMS przyspieszeń drgań, wygenerowanych podczas wiercenia z zastosowaniem metody MQL, uwzględniając prędkość obrotową  $n$  oraz wydatek przepływu płynu obróbkowego  $E$  jako wielkości wejściowe.

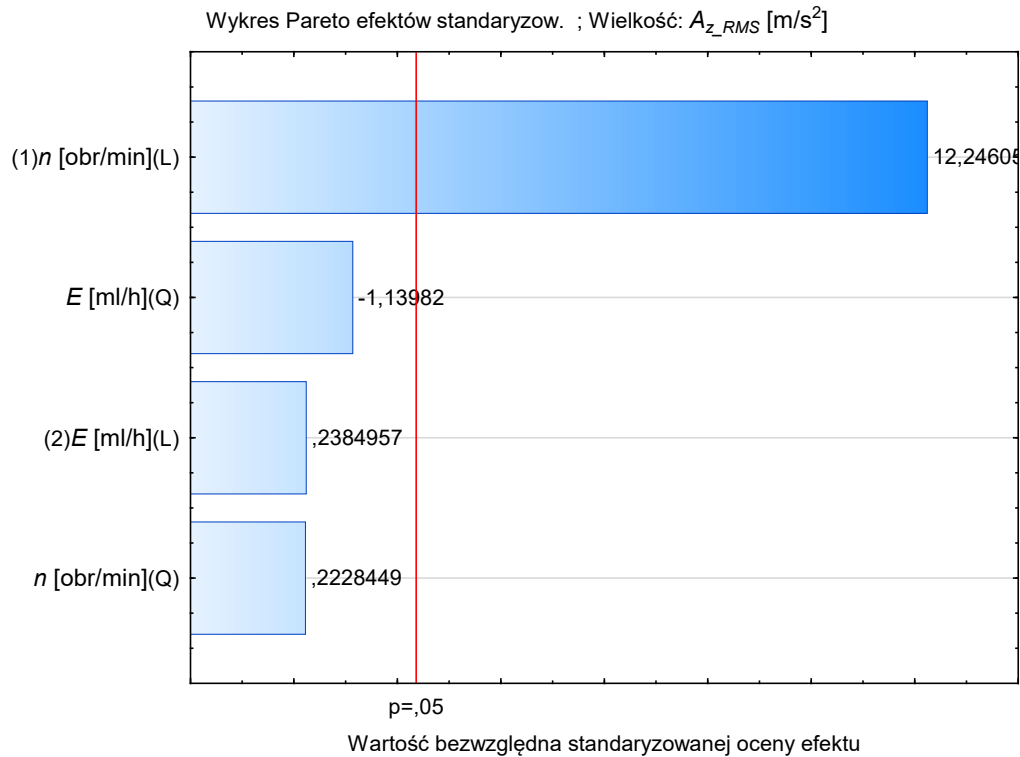
Zaobserwowano, iż dla wszystkich badanych kierunków przyspieszeń drgań ( $A_{x\_RMS}$ ,  $A_{y\_RMS}$ ,  $A_{z\_RMS}$ ), prędkość obrotowa  $n$  wywiera statystycznie istotny wpływ na przebiegi wartości RMS przyspieszenia drgań, opisane funkcją liniową. Innymi słowy, wpływ prędkości obrotowej na drgania podczas wiercenia opisany jest zależnością liniową.



Rys. 5.10. Wykres Pareto efektów standaryzowanych dla zmiennych parametrów  $n$  i  $E$  zastosowanych podczas wiercenia oraz składowej  $A_{x\_RMS}$



Rys. 5.11. Wykres Pareto efektów standaryzowanych dla zmiennych parametrów  $n$  i  $E$  zastosowanych podczas wiercenia oraz składowej  $A_{y\_RMS}$



Rys. 5.12. Wykres Pareto efektów standaryzowanych dla zmiennych parametrów  $n$  i  $E$  zastosowanych podczas wiercenia oraz składowej  $A_{z\_RMS}$

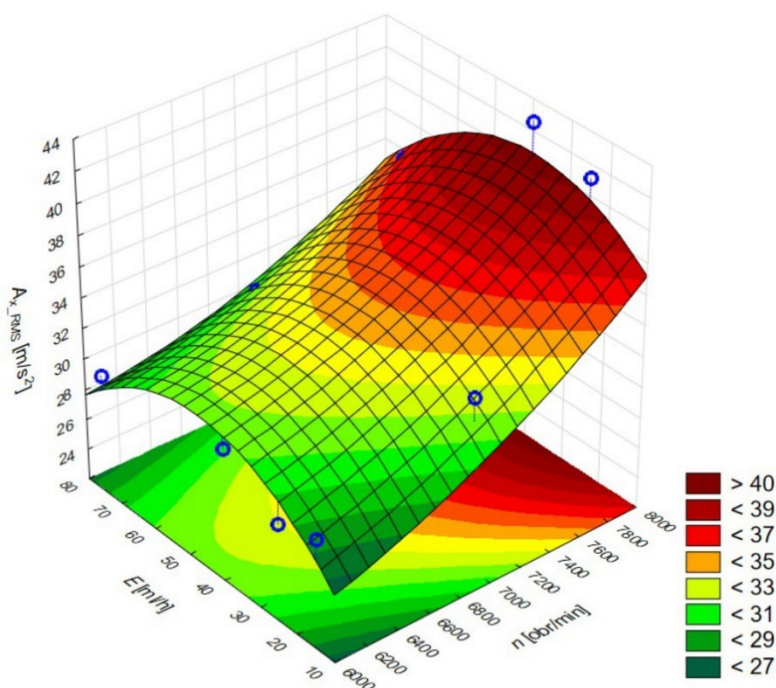
Związek pomiędzy przyspieszeniami drgań podczas wiercenia, a prędkością obrotową wrzeczona może wynikać z proporcjonalności siły odśrodkowej (powstałej w wyniku obecności pewnego niewyważenia układu OUPN i wpływającej na chwilowe ugięcia narzędzia) do prędkości obrotowej, a także ze zmiany wartości składowych siły całkowitej (warunkujących drgania), występujących wraz ze zmianą prędkości obrotowej.

Przeprowadzone analizy wykazały również statystycznie istotny wpływ wydatku przepływu płynu obróbkowego  $E$  na przebiegi wartości RMS przyspieszenia drgań w kierunkach poprzecznych do osi wiertła ( $A_{x\_RMS}$ ,  $A_{y\_RMS}$ ), opisane modelem w postaci funkcji kwadratowej. Wyniki tych analiz wskazują, iż parametr  $E$  jest bardzo ważną zmienną, a dobór jego optymalnej wartości może być istotny z punktu widzenia efektów procesu wiercenia w warunkach MQL. Statystyczna istotność modelu kwadratowego przyspieszeń drgań dla zmiennej  $E$  może oznaczać złożony wpływ intensywności przepływu płynu obróbkowego w metodzie MQL na zjawiska fizyczne występujące w strefie skrawania. Jednakże problem ten wymaga dalszych badań. Warto również podkreślić, iż w przypadku składowej posuwowej przyspieszenia drgań ( $A_{z\_RMS}$ ) nie odnotowano statystycznie istotnego wpływu tego parametru na przebiegi wartości RMS przyspieszeń drgań opisane zależnościami liniowymi oraz kwadratowymi. Oznacza to, iż nie wykryto jednoznacznego, statystycznego związku pomiędzy parametrem  $E$ , a wygenerowani drganiami w kierunku posuwowym.

### **5.1.3. Analiza wpływu parametrów wejściowych wiercenia na wartości średniokwadratowe przyspieszenia drgań**

Na rysunkach 5.13–5.15 przedstawiono wpływ prędkości obrotowej  $n$  oraz wydatku przepływu płynu syntetycznego  $E$  na wartości średniokwadratowe RMS przyspieszeń drgań w trzech badanych kierunkach ( $A_{x\_RMS}$ ,  $A_{y\_RMS}$ ,  $A_{z\_RMS}$ ). Niezależnie od kierunku pomiaru drgań, wzrost wartości prędkości obrotowej wywołał liniowy przyrost przyspieszeń drgań podczas wiercenia z zastosowaniem techniki MQL oraz podczas wiercenia na sucho i z zastosowaniem sprężonego powietrza (rys. 5.1.13 – 5.1.15 oraz rys. 5.1.16 i rys. 5.1.21). Przyczyną tej zależności może być wpływ prędkości obrotowej na zwiększenie wartości siły wymuszającej w układzie OUPN (zależnej, m.in. od wartości siły odśrodkowej), a w ten sposób na wzrost amplitudy drgań wymuszonych. Dodatkowo, niezależnie od warunków obróbki, średniokwadratowe przyspieszenia drgań w kierunku

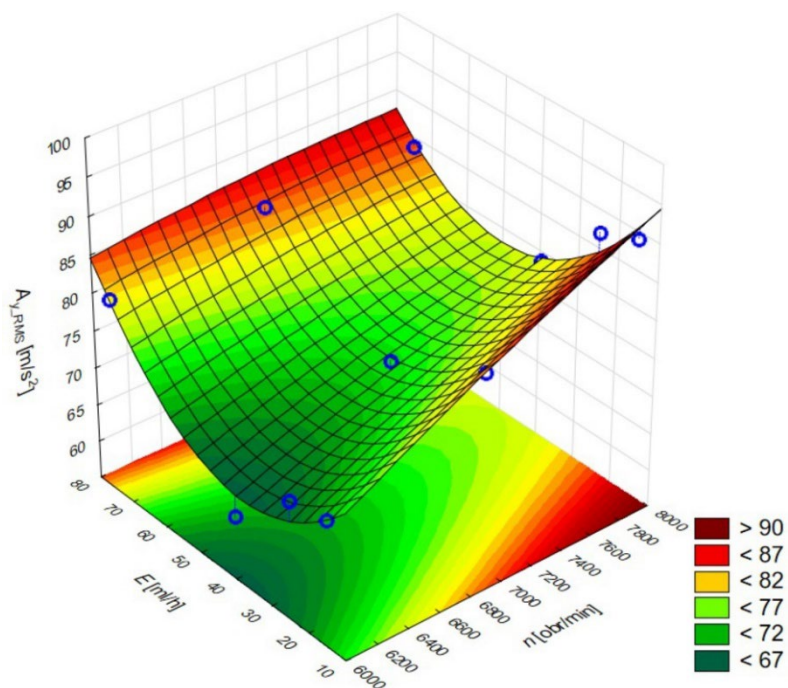
poprzecznym  $A_{y\_RMS}$  przyjmowały większe wartości od wartości otrzymanych dla kierunków  $A_{x\_RMS}$  i  $A_{z\_RMS}$ .



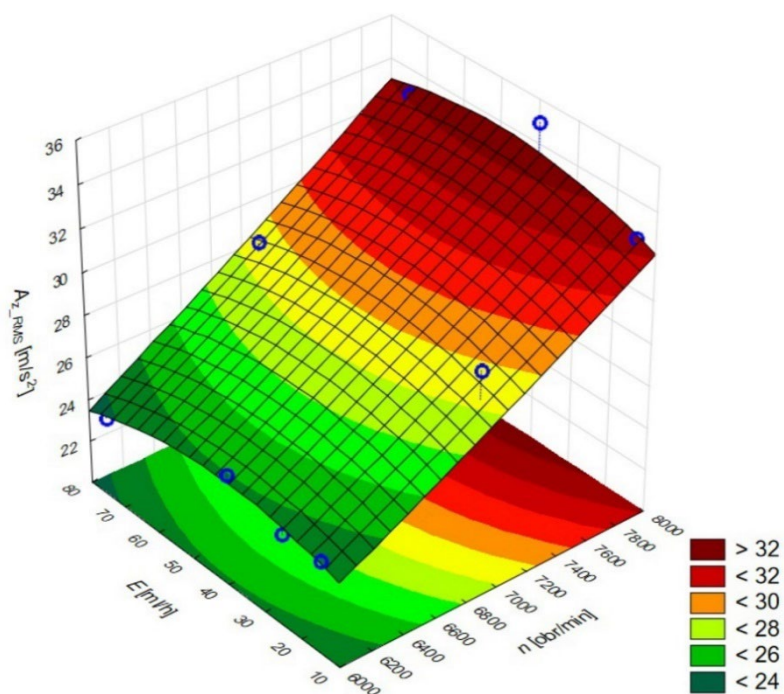
Rys. 5.13. Wpływ prędkości obrotowej  $n$  oraz wydatku przepływu cieczy chłodząco-smarującej  $E$  na wartości średniokwadratowe RMS przyspieszeń drgań w kierunku  $A_{x\_RMS}$  podczas wiercenia w warunkach MQL

Rozpatrując wydatek przepływu płynu obróbkowego  $E$  zaobserwowano nieliniowy wpływ tego parametru na wartości przyspieszeń drgań. Na dodatek, w przypadku składowych  $A_{x\_RMS}$  i  $A_{z\_RMS}$ , maksymalne wartości RMS przyspieszeń drgań odnotowano podczas wiercenia w warunkach MQL z wartościami wydatku przepływu płynu obróbkowego zawartymi w przedziale  $E = 40 - 50$  ml/h. Niemniej, w odniesieniu do składowej  $A_{y\_RMS}$ , podczas wiercenia MQL z wartościami wydatku przepływu cieczy zawartymi w przedziale  $E = 40 - 50$  ml/h, obserwuje się najmniejsze wartości RMS przyspieszeń drgań. Niniejsze obserwacje sugerują, iż dynamika wiercenia może być zależna od intensywności przepływu płynu obróbkowego w metodzie MQL. Ustalenie zależności analitycznej pomiędzy tą wielkością, a drganiami generowanymi w procesie wiercenia wymaga jednak dalszych badań.

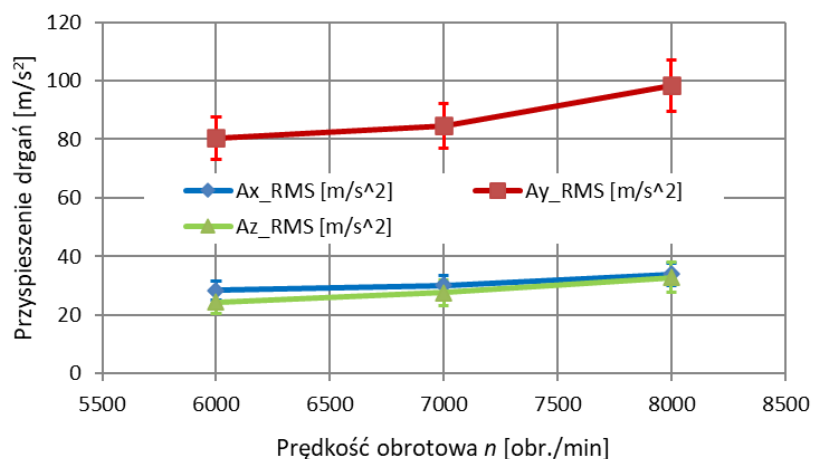




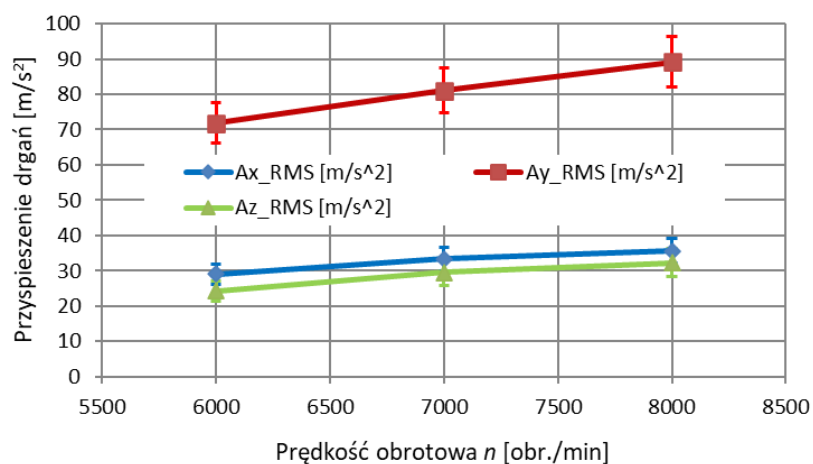
Rys. 5.14. Wpływ prędkości obrotowej  $n$  oraz wydatku przepływu płynu obróbkowego  $E$  na wartości średniokwadratowe RMS przyspieszeń drgań w kierunku  $A_{y\_RMS}$  podczas wiercenia w warunkach MQL



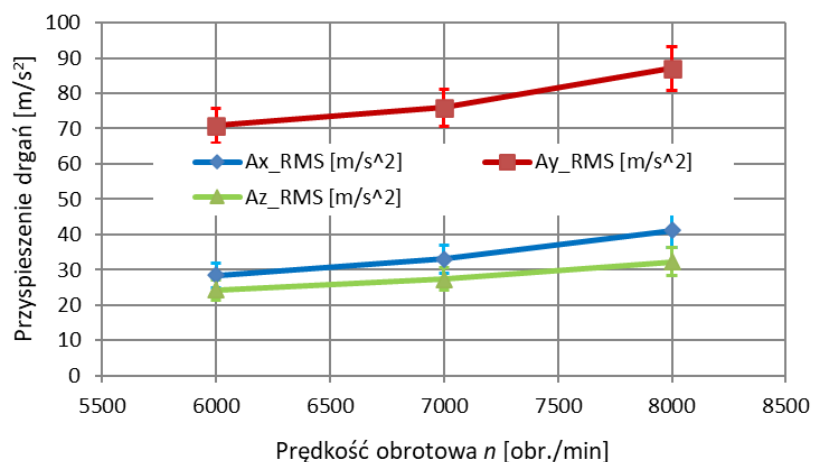
Rys. 5.15. Wpływ prędkości obrotowej  $n$  oraz wydatku przepływu płynu obróbkowego  $E$  na wartości średniokwadratowe RMS przyspieszeń drgań w kierunku  $A_{z\_RMS}$  podczas wiercenia MQL



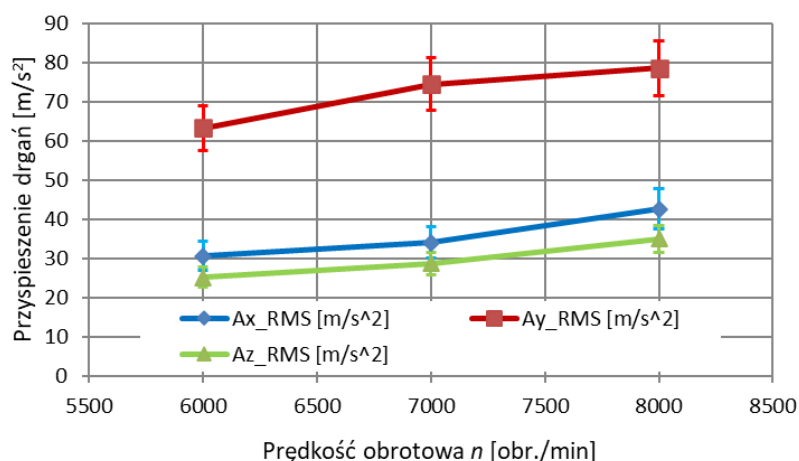
Rys. 5.16. Wpływ prędkości obrotowej na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań podczas wiercenia na sucho



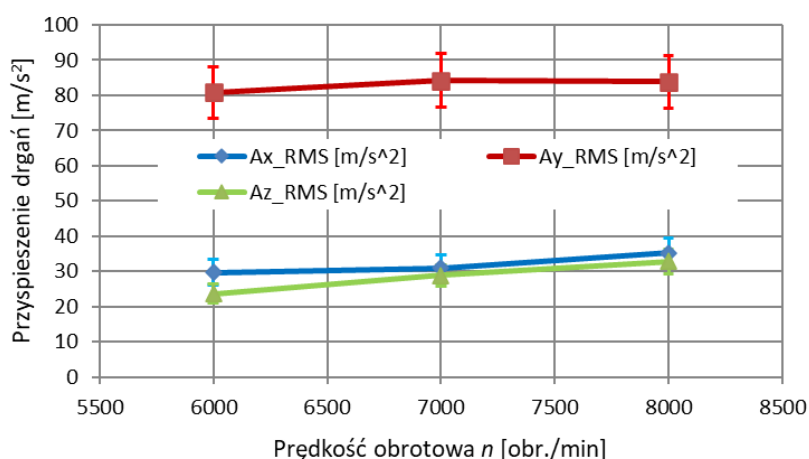
Rys. 5.17. Wpływ prędkości obrotowej na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań podczas wiercenia w warunkach MQL dla  $E=15$  ml/h



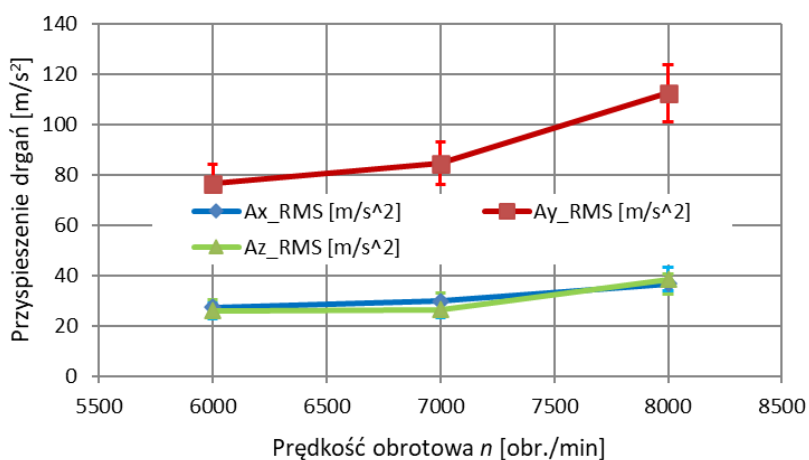
Rys. 5.18. Wpływ prędkości obrotowej na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań podczas wiercenia w warunkach MQL dla  $E=25$  ml/h



Rys. 5.19. Wpływ prędkości obrotowej na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań podczas wiercenia w warunkach MQL dla  $E=40$  ml/h

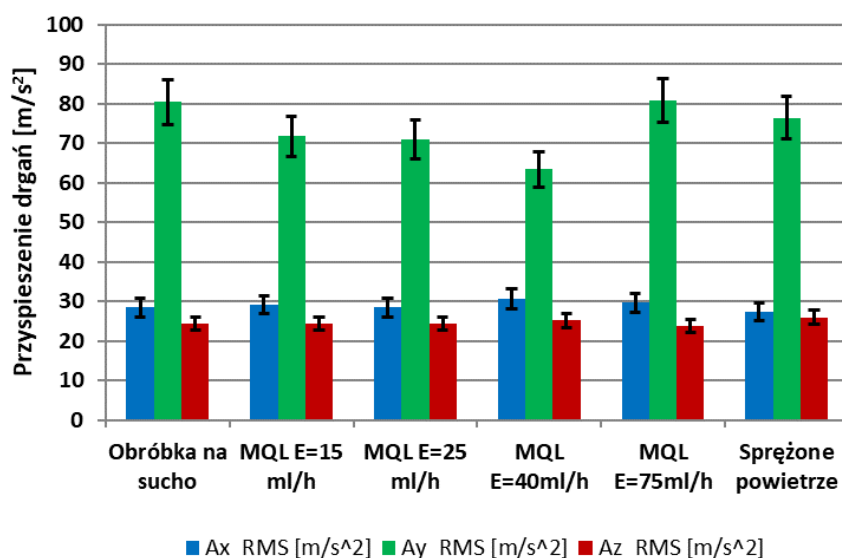


Rys. 5.20. Wpływ prędkości obrotowej na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań podczas wiercenia w warunkach MQL dla  $E=75$  ml/h



Rys. 5.21. Wpływ prędkości obrotowej na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań podczas wiercenia w warunkach sprężonego powietrza

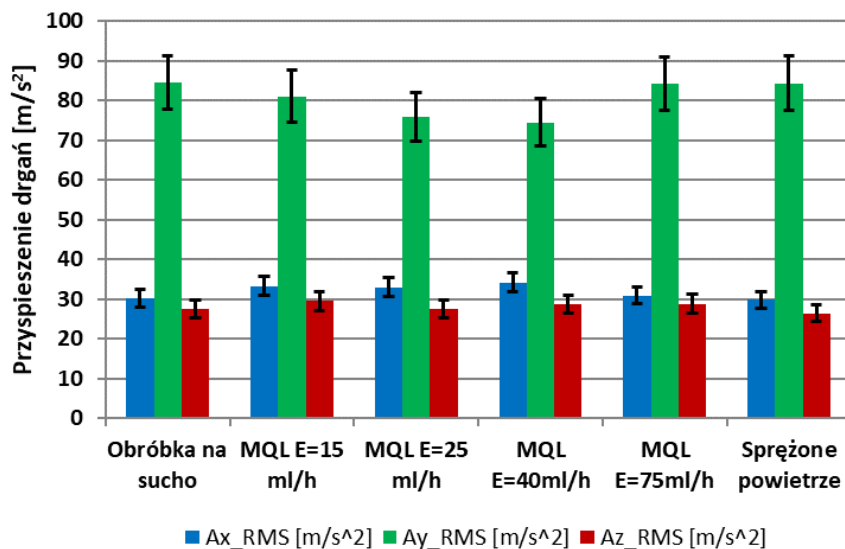
Na rysunkach 5.22–5.24 przedstawiono wpływ warunków chłodzenia i smarowania strefy skrawania na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań, wygenerowane podczas wiercenia badanego stopu aluminium. Rozpatrując miarę RMS przyspieszeń drgań, nie zaobserwowano znaczących różnic w wartościach składowych  $A_{x\_RMS}$  i  $A_{z\_RMS}$  niezależnie od badanej prędkości obrotowej i warunków obróbki. Niemniej, biorąc pod uwagę składową w kierunku poprzecznym do osi wiertła  $A_{y\_RMS}$  można zaobserwować, iż niezależnie od prędkości obrotowej jej wartość jest mniejsza podczas wiercenia w warunkach MQL z  $E = 40$  ml/h, w porównaniu do wartości otrzymanych podczas wiercenia w pozostałych badanych warunkach chłodzenia i smarowania strefy skrawania. Wartości przyspieszeń drgań  $A_{y\_RMS}$  podczas wiercenia w warunkach MQL z  $E = 40$  ml/h i prędkością obrotową  $n = 6000$  obr./min są od 11% do 27% mniejsze od wartości wygenerowanych podczas wiercenia z zastosowaniem pozostałych metod chłodzenia i smarowania strefy skrawania. W przypadku wiercenia z prędkością obrotową  $n = 7000$  obr./min, różnice te wynoszą od 2% do 12%, natomiast podczas obróbki z prędkością obrotową  $n = 8000$  obr./min, różnice zawierają się w przedziale od 6% do 30%.



Rys. 5.22. Wpływ warunków wiercenia na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań dla  $n = 6000$  obr./min

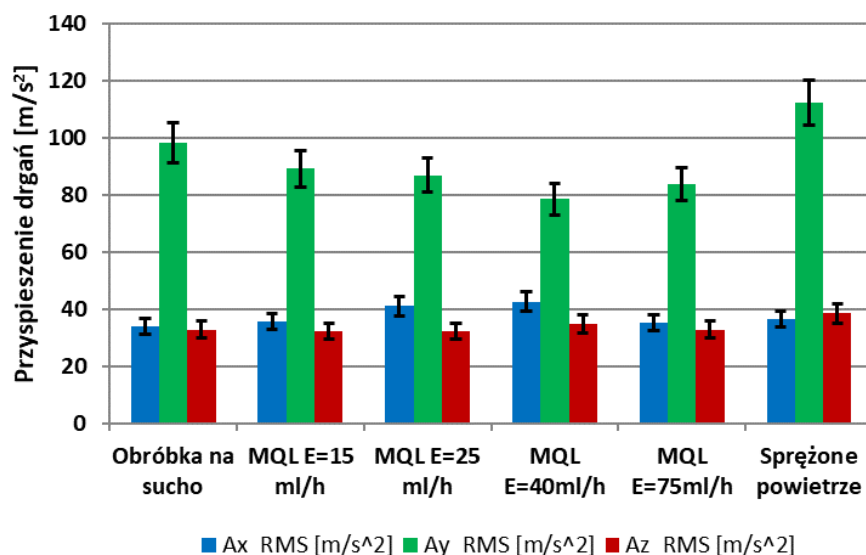
Celem wykazania uogólnionego oddziaływania przyspieszeń drgań w procesie wiercenia, w zależności od zastosowanych warunków chłodzenia i smarowania strefy skrawania, w kolejnym etapie analizy poddano wartości RMS wypadkowych drgań  $A_{RMS}$ . Celem wyznaczenia wartości tej wielkości, zastosowano następujące równanie:

$$A_{RMS} = \sqrt{A_{x\_RMS}^2 + A_{y\_RMS}^2 + A_{z\_RMS}^2} \quad (1.1)$$

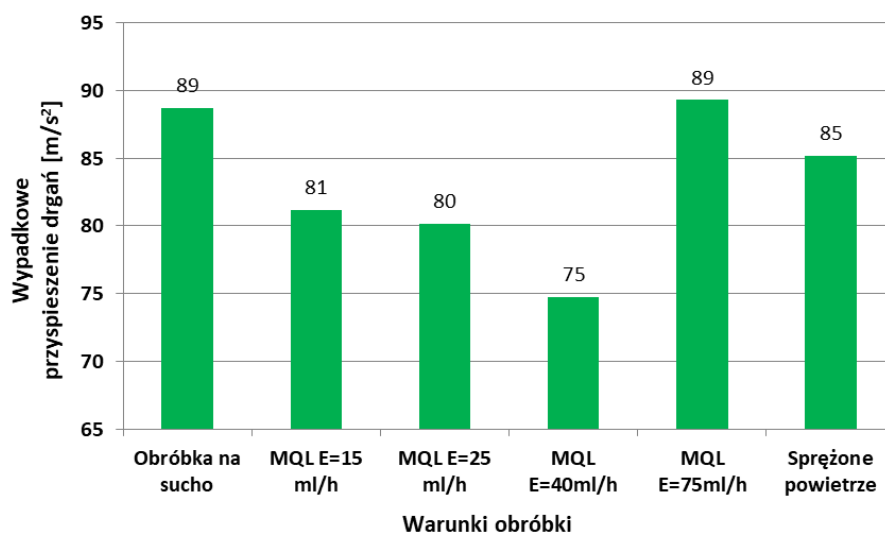


Rys. 5.23. Wpływ warunków wiercenia na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań, dla  $n = 7000$  obr./min

Na rysunkach 5.25–5.27 przedstawiono wpływ warunków chłodzenia i smarowania strefy skrawania na wartości średniokwadratowe wypadkowych przyspieszeń drgań, wygenerowane podczas wiercenia stopu aluminium.

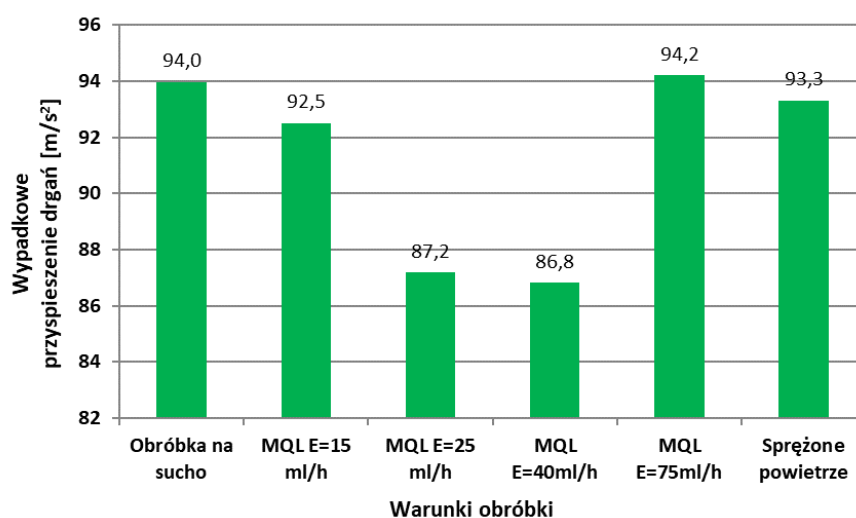


Rys. 5.24. Wpływ warunków wiercenia na wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań dla  $n = 8000$  obr./min

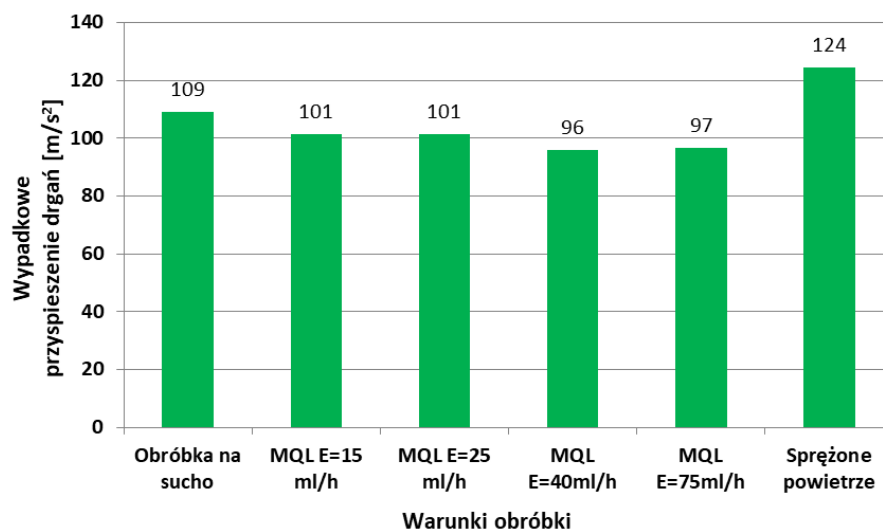


Rys. 5.25. Wpływ warunków wiercenia na wartości średniokwadratowe wypadkowych przyspieszeń drgań dla  $n = 6000$  obr./min

Biorąc pod uwagę wypadkowe drgania, można zauważyć, iż w większości badanych przypadków (wiercenie z prędkościami obrotowymi  $n = 6000$  obr./min –  $8000$  obr./min), wartości średniokwadratowe tej wielkości są mniejsze podczas wiercenia w warunkach MQL z  $E = 40$  ml/h, w porównaniu do wartości otrzymanych podczas wiercenia w pozostałych badanych warunkach chłodzenia i smarowania strefy skrawania. W procesie wiercenia z prędkością obrotową  $n = 7000$  obr./min wartości RMS wypadkowych przyspieszeń drgań są również relatywnie mniejsze, lecz na porównywalnym poziomie do wartości wygenerowanych podczas wiercenia w warunkach zastosowania metody MQL z natężeniem przepływu płynu syntetycznego na poziomie 25 ml/h.



Rys. 5.26. Wpływ warunków wiercenia na wartości średniokwadratowe wypadkowych przyspieszeń drgań dla  $n = 7000$  obr./min



Rys. 5.27. Wpływ warunków wiercenia na wartości średniokwadratowe wypadkowych przyspieszeń drgań dla  $n = 8000 \text{ obr./min}$

Przedstawione powyżej analizy ukazują, iż prawidłowy/optimalny dobór parametru wydatku przepływu cieczy obróbkowej  $E$  w technice MQL może mieć bardzo istotne znaczenie z punktu widzenia dynamiki wiercenia (określonej poziomami przyspieszeń drgań).



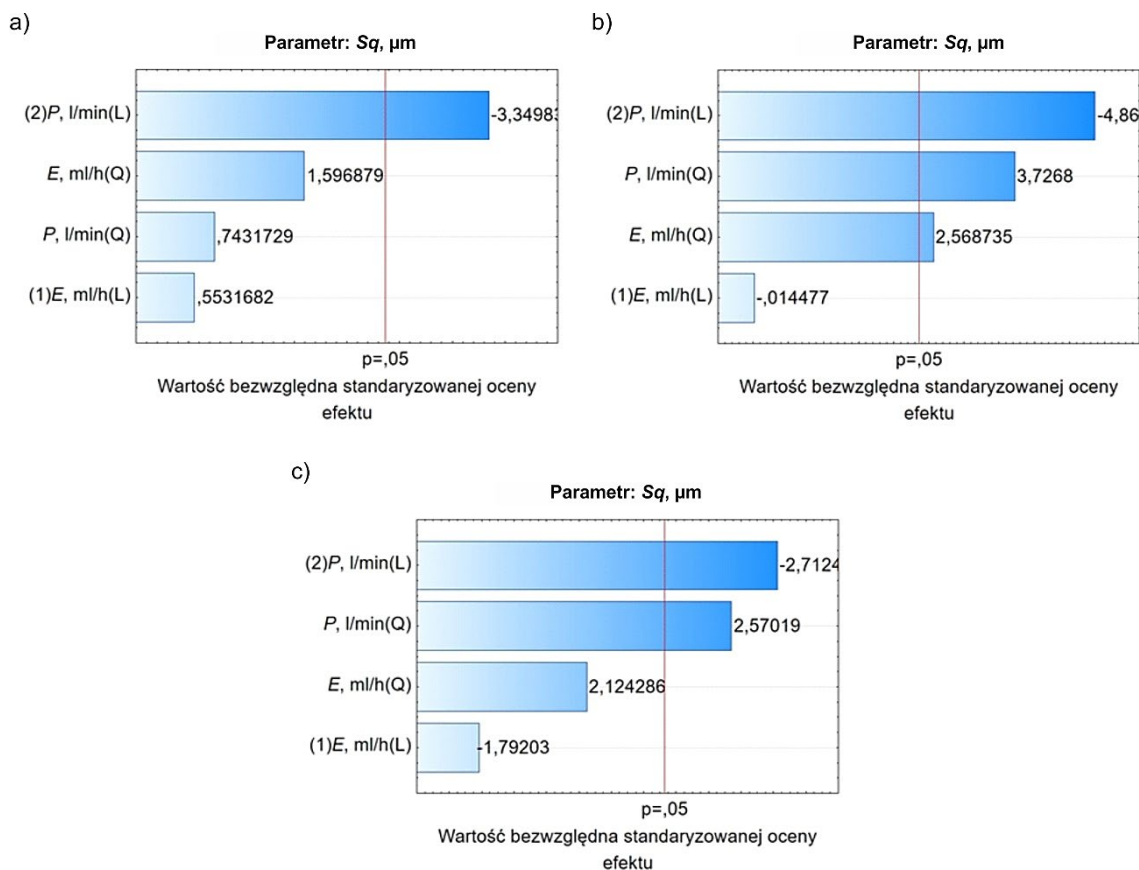
## 5.2. Ocena topografii powierzchni obrobionej

W celu analizy topografii powierzchni obrobionej wykorzystano oprogramowanie Statistica 13, dzięki któremu sporządzono wykresy efektów standaryzowanych, określane również jako wykresy Pareto. Wygenerowano je w oparciu o wartości: średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sq$  oraz największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sz$  topografii powierzchni obrobionej po wierceniu stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  ze zmiennymi wartościami: prędkości obrotowej wrzeciona  $n$  i parametrów tworzenia aerozolu  $E$  i  $P$ . Wykresy Pareto pozwalają na odniesienie badanych wielkości wejściowych do liniowej  $L$  i kwadratowej  $Q$  zależności posługując się wartościami bezwzględnymi standaryzowanej oceny efektu. Jeżeli wspomniane wartości bezwzględne znajdują się poniżej krytycznej wartości oceny efektu, uznaje się, że rozpatrywana wielkość wejściowa nie ma istotnego wpływu pod względem statystycznym na analizowane parametry 3D topografii powierzchni obrobionej.

Wykresy Pareto dla trzech zastosowanych wartości prędkości obrotowej wrzeciona podczas wiercenia w warunkach chłodzenia metodą MQL przedstawiono na rys. 5.28–5.29.

Z analizy wykresów Pareto wygenerowanych dla parametru  $Sq$  topografii powierzchni (rys. 5.28) wynika, że statystycznie istotny wpływ na jego wartości wykazuje głównie zmienne natężenie przepływu objętościowego powietrza  $P$ . Rozpatrując uzyskane wyniki zarówno względem zależności liniowych, jak i kwadratowych, wartości bezwzględne  $P$  przekraczają wartość krytyczną dla prędkości obrotowych  $n = 7000$  obr./min i  $n = 8000$  obr./min. W przypadku pierwszej wymienionej wartości  $n$ , istotny wpływ pod względem statystycznym ma również natężenie przepływu objętościowego płynu syntetycznego przy zależności kwadratowej. Z kolei w wyniku wiercenia w warunkach  $n = 6000$  obr./min, wpływ na analizowany parametr  $Sq$  wykazuje tylko natężenie przepływu objętościowego powietrza, lecz jedynie w przypadku zależności liniowej.

W wyniku analizy uzyskanych zależności (rys. 5.28) ustalono, że dla wartości prędkości obrotowej wrzeciona wynoszących 7000 i 8000 obr./min, statystycznie istotny wpływ na największą wysokość powierzchni o ograniczonej skali  $Sz$  wykazuje kolejno natężenie przepływu objętościowego powietrza  $P$  dla zależności liniowej i kwadratowej bądź jedynie kwadratowej. W przypadku zastosowania najmniejszej przyjętej wartości prędkości obrotowej wrzeciona, żaden z parametrów tworzenia mgły olejowej nie wykazuje istotnego wpływu na wartość  $Sz$  pod względem statystycznym.

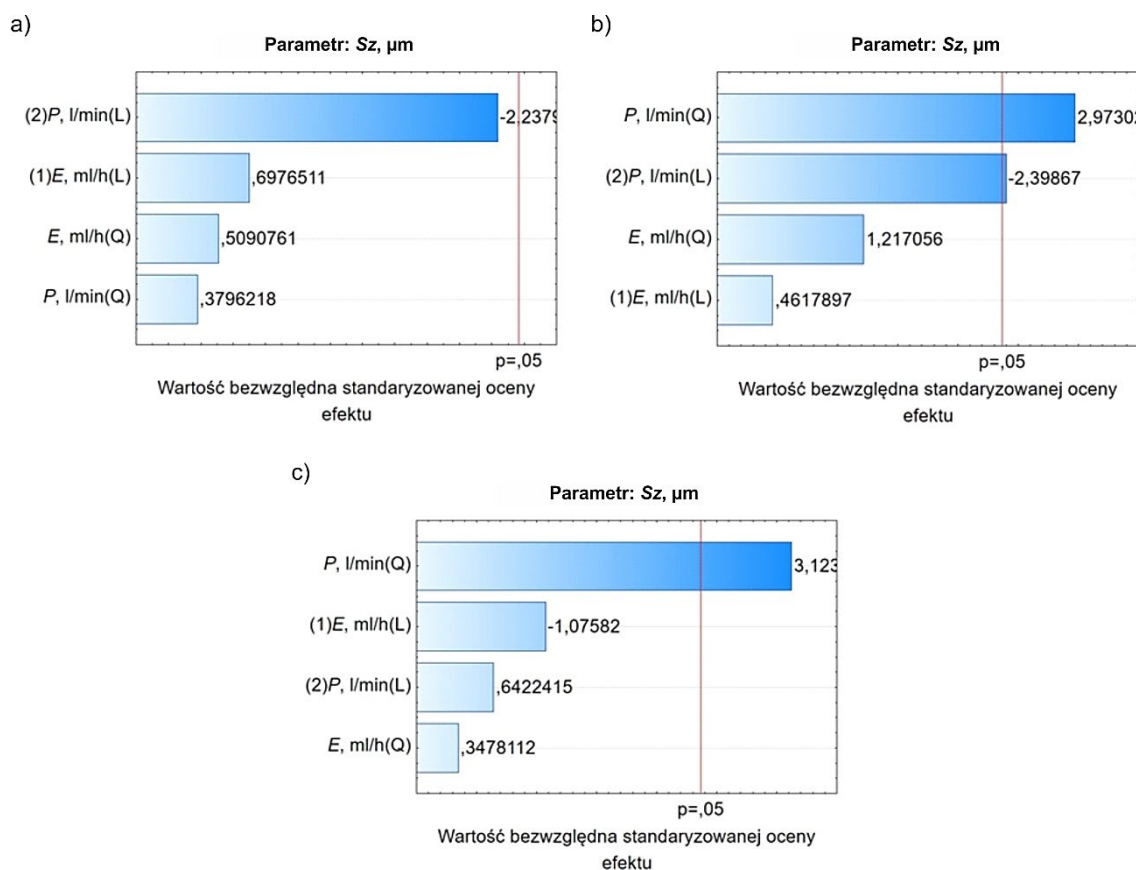


Rys. 5.28. Wykresy efektów standaryzowanych wpływu zmiennych parametrów tworzenia aerozolu na wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sq$  w metodzie zminimalizowanego smarowania po wierceniu stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy prędkości obrotowej: a)  $n = 6000$  obr./min, b)  $7000$  obr./min, c)  $8000$  obr./min

Wpływ zmiennych wartości parametrów tworzenia medium czynnego tj. natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$  i płynu syntetycznego  $E$  na wartości: średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sq$  i największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sz$  przy zmiennych prędkościach obrotowych wrzeciona  $n$  przedstawiono na rys. 5.30–5.31.

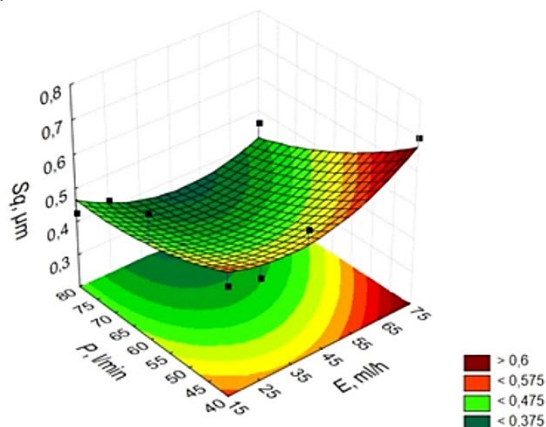
Na podstawie uzyskanych zależności stwierdzono, że przy prędkości obrotowej wrzeciona wynoszącej zarówno  $7000$  obr/min (rys. 5.30b), jak i  $8000$  obr/min (rys. 5.30c), najmniejsze wartości parametru  $Sq$  zaobserwowano, gdy natężenie przepływu objętościowego powietrza  $P$  oraz płynu syntetycznego  $E$  wynosi kolejno:  $60$ – $75$  l/min i  $35$ – $55$  ml/h. Należy jednak podkreślić, że aby uzyskać minimalne wartości  $Sq$  w warunkach wiercenia z prędkością obrotową  $n = 8000$  obr./min, zaleca się zastosować następujące parametry tworzenia medium czynnego:  $P = 65$  l/min,  $E = 45$  ml/h. Zgodnie z badaniami Zhu i in. [126] zwiększanie natężenia przepływu powietrza prowadzi do

uzyskania większej prędkości transportowanych kropelek medium czynnego, a jak wskazują Jadhav i Deivanathan [99], zbyt duża prędkość przy niewielkich rozmiarach kropelek może prowadzić do ich odbijania się od strefy skrawania, zmniejszając tym samym skuteczność penetracji przez aerozol, co może odpowiadać za uzyskanie minimalnych wartości  $Sq$  jedynie przy średnich wartościach  $P$  z badanego zakresu. Zastosowanie mniejszych wartości natężenia przepływu objętościowego powietrza (40–50 l/min) oraz minimalnego i maksymalnego natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego (15–25 ml/h oraz 65–75 ml/h) tłumaczy się z otrzymaniem maksymalnych wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sq$ . W przypadku wiercenia z najmniejszą prędkością obrotową  $n = 6000$  obr./min, minimalne wartości  $Sq$  uzyskano w warunkach  $P = 75–80$  l/min,  $E = 35–55$  ml/h, a maksymalne przy parametrach tworzenia aerozolu odpowiadających:  $P = 40–45$  l/min,  $E = 65–75$  ml/h.

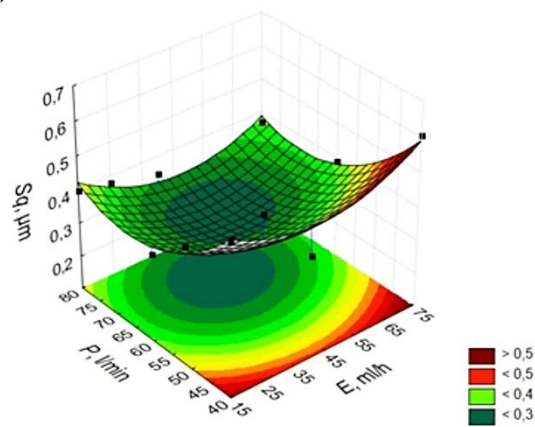


Rys. 5.29. Wykresy efektów standaryzowanych wpływu zmiennych parametrów tworzenia aerozolu na wartości największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sz$  w metodzie zminimalizowanego smarowania po wierceniu stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy prędkości obrotowej: a)  $n = 6000$  obr./min, b)  $7000$  obr./min, c)  $8000$  obr./min

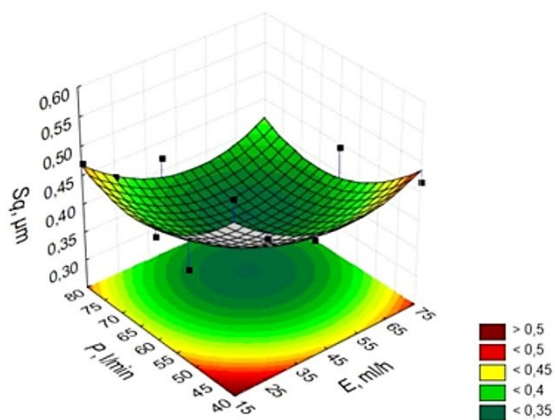
a)



b)



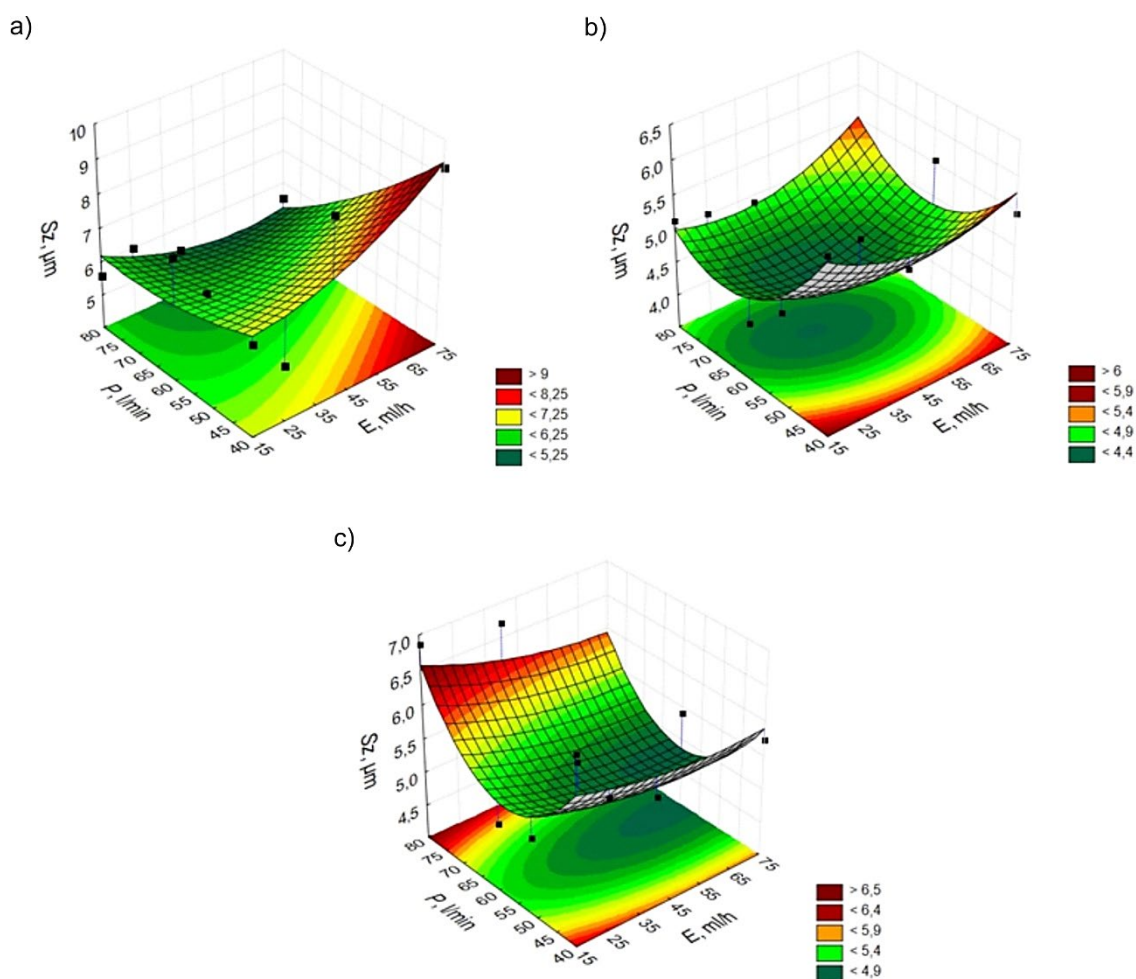
c)



Rys. 5.30. Wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $S_q$  w zależności od zmiennych wartości natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$  i płynu syntetycznego  $E$  w metodzie MQL po wierceniu stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy prędkości obrotowej: a)  $n = 6000$  obr./min, b)  $7000$  obr./min, c)  $8000$  obr./min

W wyniku analizy zależności przedstawionych na rys. 5.31 ustalono, że w miarę zwiększania prędkości obrotowej wrzeciona, minimalną wartość największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $S_z$  stwierdzono w warunkach zmniejszania natężenia przepływu objętościowego powietrza. Dla  $n = 6000$  obr./min (rys. 5.31a), wartość  $P$  wynosiła od 75 do 80 l/min, w przypadku  $n = 7000$  obr./min (rys. 5.31b), natomiast wartość  $P$  zapewniająca minimalne wartości  $S_z$  wynosiła 65 l/min, a zwiększając prędkość obrotową do 8000 obr./min (rys. 5.31c), najmniejsze wartości omawianego parametru uzyskano przy tworzeniu aerozolu z  $P = 55\text{--}60$  l/min. Zalecane wartości natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego dla poszczególnych prędkości obrotowych wrzeciona wynosiły kolejno:  $E = 35\text{--}55$  ml/h,  $E = 35$  ml/h oraz  $E = 50\text{--}75$  ml/h. Z kolei maksymalne wartości  $S_z$  w każdym przypadku uzyskano w warunkach najmniejszego

rozpatrywanego natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P = 40\text{--}45$  l/min, z wyjątkiem wiercenia z prędkością obrotową  $n = 8000$  obr./min (rys. 5.31c), podczas którego największe wartości omawianego parametru 3D topografii powierzchni uzyskano po zastosowaniu natężenia przepływu powietrza wynoszącego od 75 do 80 l/min. Wartości natężenia przepływu objętościowego oleju skutkujące maksymalnymi wartościami  $Sz$  były natomiast zróżnicowane i wynosiły kolejno:  $E = 65\text{--}75$  ml/h ( $n = 6000$  obr./min),  $E = 15\text{--}25$  ml/h oraz  $E = 75$  ml/h ( $n = 7000$  obr./min),  $E = 15\text{--}35$  ml/h ( $n = 8000$  obr./min).



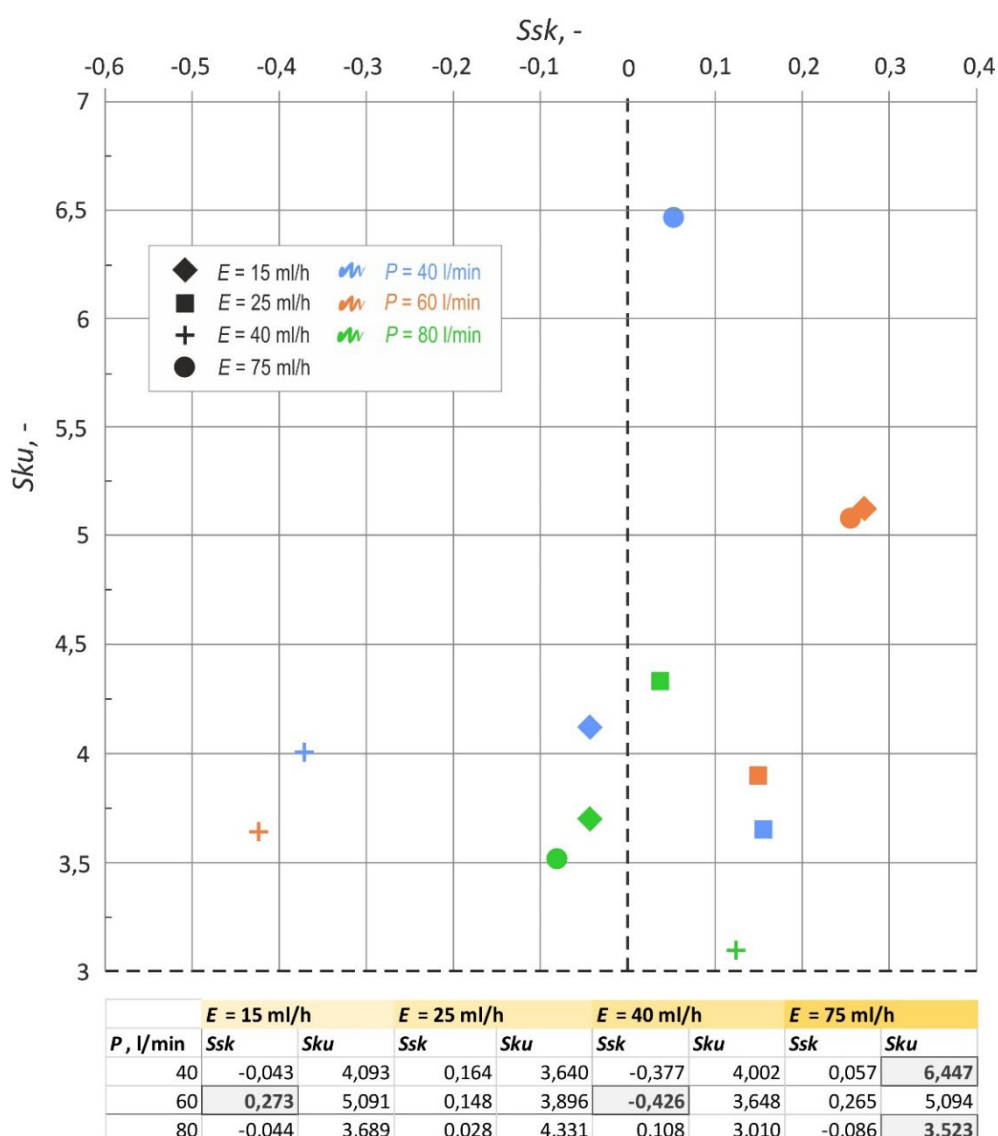
Rys. 5.31. Wartości największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sz$  w zależności od zmiennych wartości natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$  i oleju  $E$  w metodzie MQL po wierceniu stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy prędkości obrotowej:

a)  $n = 6000$  obr./min, b)  $7000$  obr./min, c)  $8000$  obr./min

Uzyskanie większych wartości  $Sz$  przy najmniejszej badanej wartości natężenia przepływu oleju można powiązać z wynikami przeprowadzonych badań symulacyjnych, zgodnie z którymi w warunkach  $E = 15$  ml/h uzyskano kropelki o największych rozmiarach (tab. 3.12–3.20), co przekłada się na ich ograniczoną zdolność do penetracji strefy

skrawania, a w konsekwencji – na zapewnienie efektywnego chłodzenia i smarowania oraz pokrywa się z najmniejszymi wartościami wypadkowych przyspieszeń drgań (rys. 5.25–5.26). Oznacza to, iż zmniejszenie przyspieszeń drgań narzędzia wpływa bezpośrednio na odwzorowywanie ostrza w materiale obrabianym, które kształtuje „niższe” mikronierówności powierzchni.

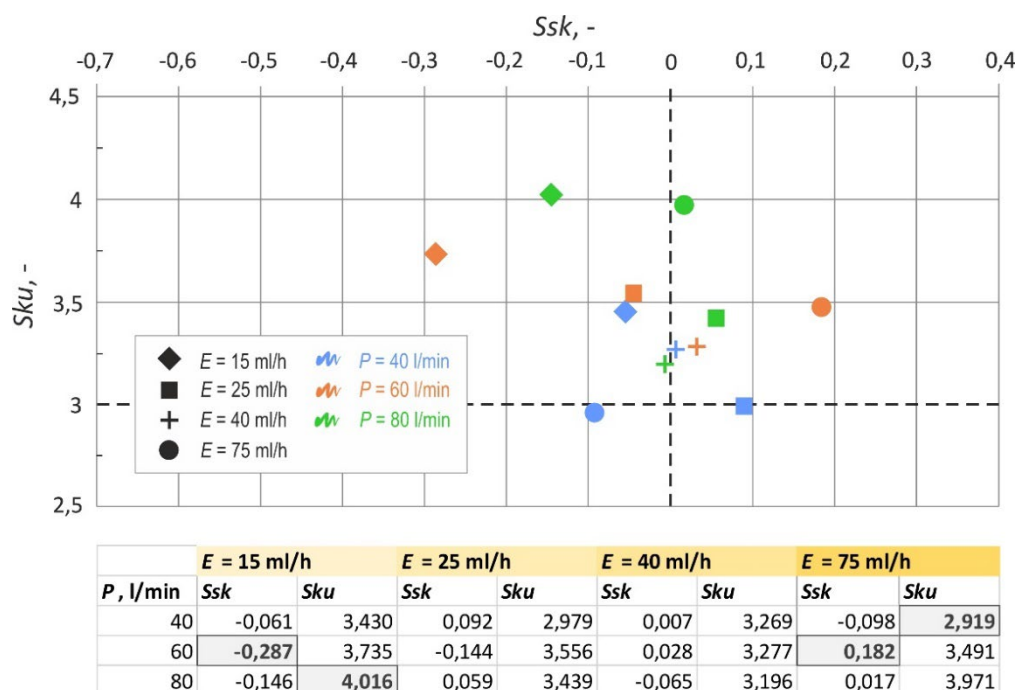
Wpływ parametrów tworzenia aerozolu na wartości współczynnika asymetrii powierzchni o ograniczonej skali  $Ssk$  oraz współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $Sku$  dla trzech rozpatrywanych prędkości obrotowych wrzeciona  $n$  przedstawiono na rys. 5.32–5.34.



Rys. 5.32 Wartości współczynnika asymetrii powierzchni o ograniczonej skali  $Ssk$  i współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $Sku$  w zależności od parametrów tworzenia aerozolu  $E$  i  $P$  podczas wiercenia stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  z prędkością obrotową  $n = 6000 \text{ obr./min}$



Analizując wartości amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni po wierceniu w warunkach chłodzenia metodą MQL (rys. 5.32) zaobserwowano, że bez względu na zmianę parametrów tworzenia mgły olejowej, rozkład wierzchołków na powierzchni zawsze przyjmował postać leptokurtyczną. Wartością  $Sku$  najbardziej zbliżoną do  $Sku = 3$ , oznaczającą rozkład mezokurtyczny, charakteryzowało się połączenie natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P = 80$  l/min z natężeniem przepływu objętościowego oleju  $E = 40$  ml/h. Maksymalną wartość kurtozy zaobserwowano natomiast dla parametrów tworzenia mgły olejowej wynoszących:  $P = 40$  l/min i  $E = 75$  ml/h, co jak wskazuje Królczyk i in. [127], świadczy o obecności dużej liczby wysokich szczytów bądź głębokich dolin na powierzchni obrabianej, a ponadto oznacza występowanie wad powierzchniowych. Z kolei na podstawie wartości parametru  $Ssk$  zaobserwowano, że najmniejszą asymetrię rozkładu wierzchołków uzyskiwano dla zmiennych wartości  $E$ , ale przy  $P = 40$  l/min bądź  $P = 80$  l/min. Środkowa rozpatrywana wartość natężenia przepływu objętościowego powietrza prowadziła do uzyskania maksymalnej asymetrii lewostronnej (przy  $E = 40$  ml/h) świadczącej o przewadze głębokich dolin na powierzchni, a także do maksymalnej asymetrii prawostronnej (przy  $E = 15$  ml/h) wskazującej na przewagę ostrych szczytów.



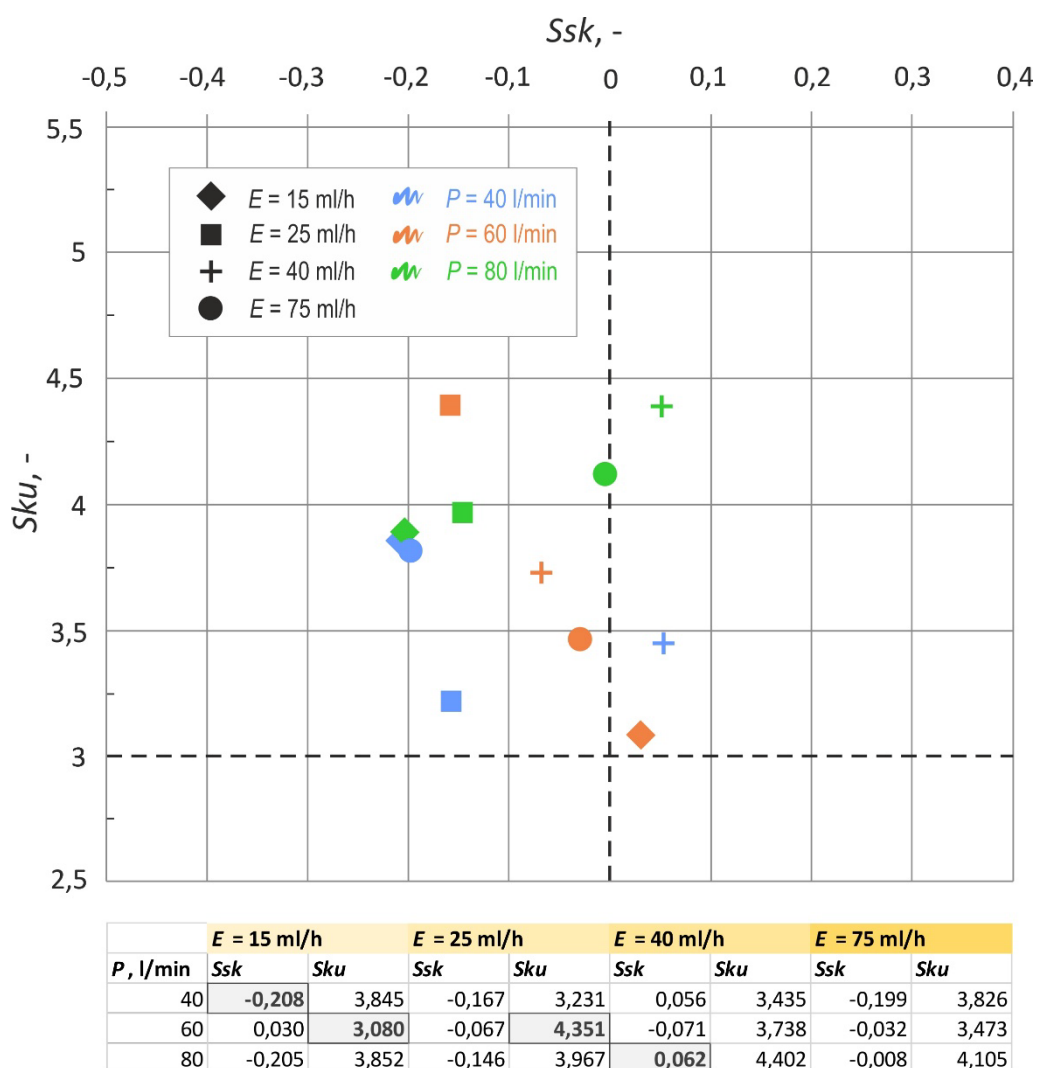
Rys. 5.33. Wartości współczynnika asymetrii powierzchni o ograniczonej skali  $Ssk$  i współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $Sku$  w zależności od parametrów tworzenia aerozolu  $E$  i  $P$  podczas wiercenia stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  z prędkością obrotową  $n = 7000$  obr./min



Na podstawie otrzymanej zależności (rys. 5.33) zaobserwowano, że zwiększenie natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego  $E$  do 40 ml/h spowodowało uzyskanie wartości  $Ssk$  zbliżonych do zera, szczególnie przy  $P = 40$  l/min oraz  $P = 80$  l/min, co zauważono również w warunkach prędkości obrotowej wrzeciona wynoszącej 6000 obr./min (rys. 5.32). Świadczy to o niewielkiej asymetrii lewo- i prawostronnej wierzchołków na powierzchni obrobionej. Maksymalną asymetrią lewostronną charakteryzowała się natomiast powierzchnia po wierceniu w warunkach  $P = 60$  l/min i  $E = 15$  ml/h, co oznacza przewagę głębokich dolin. Z kolei przy parametrach tworzenia aerozolu wynoszących  $P = 60$  l/min i  $E = 75$  ml/h osiągnięto maksymalną wartość  $Ssk$  wskazującą na silną asymetrię prawostronną i przewagę ostrych szczytów mikronierówności powierzchni, które (wg Niemczewskiej-Wójcik [128]) na początku eksploatacji wytworzonych elementów ulegną ścięciu na skutek sił oddziałujących na materiał. Analizując uzyskane wartości kurtozy  $Sku$  zaobserwowano, że rozkład wierzchołków najbardziej zbliżony do mezokurtycznego, lecz o charakterze platokurtycznym uzyskano podczas zastosowania parametrów tworzenia medium czynnego o wartościach:  $P = 40$  l/min,  $E = 25$  ml/h, jak również  $E = 75$  ml/h. W takich warunkach powierzchnia obrobiona cechuje się brakiem wysokich szczytów bądź głębokich dolin. W pozostałych przypadkach rozkład wierzchołków na powierzchni przyjmował postać leptokurtyczną, a maksymalną wartość  $Sku$ , wskazującą na obecność licznych wad powierzchniowych odnotowano dla  $P = 80$  l/min i  $E = 15$  ml/h.

Na podstawie wartości  $Sku$  uzyskanych podczas wiercenia przy prędkości obrotowej wrzeciona  $n = 8000$  obr./min (rys. 5.34), stwierdzono, że rozkład wierzchołków dla wszystkich rozpatrywanych wartości parametrów tworzenia mgły olejowej przyjmował postać leptokurtyczną, wskazującą występowanie ostrych wierzchołków na powierzchni. Minimalną wartość współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $Sku$  odnotowano przy natężeniu przepływu objętościowego powietrza  $P = 60$  l/min oraz przy natężeniu przepływu objętościowego oleju  $E = 15$  ml/h. Z kolei maksymalną wartość kurtozy, świadczącą o występowaniu wad powierzchniowych oraz wysokich szczytów bądź głębokich dołów na powierzchni obrobionej, uzyskano w warunkach  $P = 60$  l/min,  $E = 25$  ml/h. Wartości parametru  $Ssk$  wskazują, że najmniejszą asymetrią charakteryzują się powierzchnie obrabiane w warunkach tworzenia aerozolu z parametrami:  $P = 60$  l/min i  $E = 75$  ml/h bądź  $E = 15$  ml/h, a szczególnie, gdy natężenie przepływu objętościowego powietrza wynosi 80 l/min, a płynu syntetycznego 75 ml/h. Najmniejszą wartość  $Ssk$  zaobserwowano dla trzech kombinacji parametrów tworzenia medium czynnego:  $P = 80$

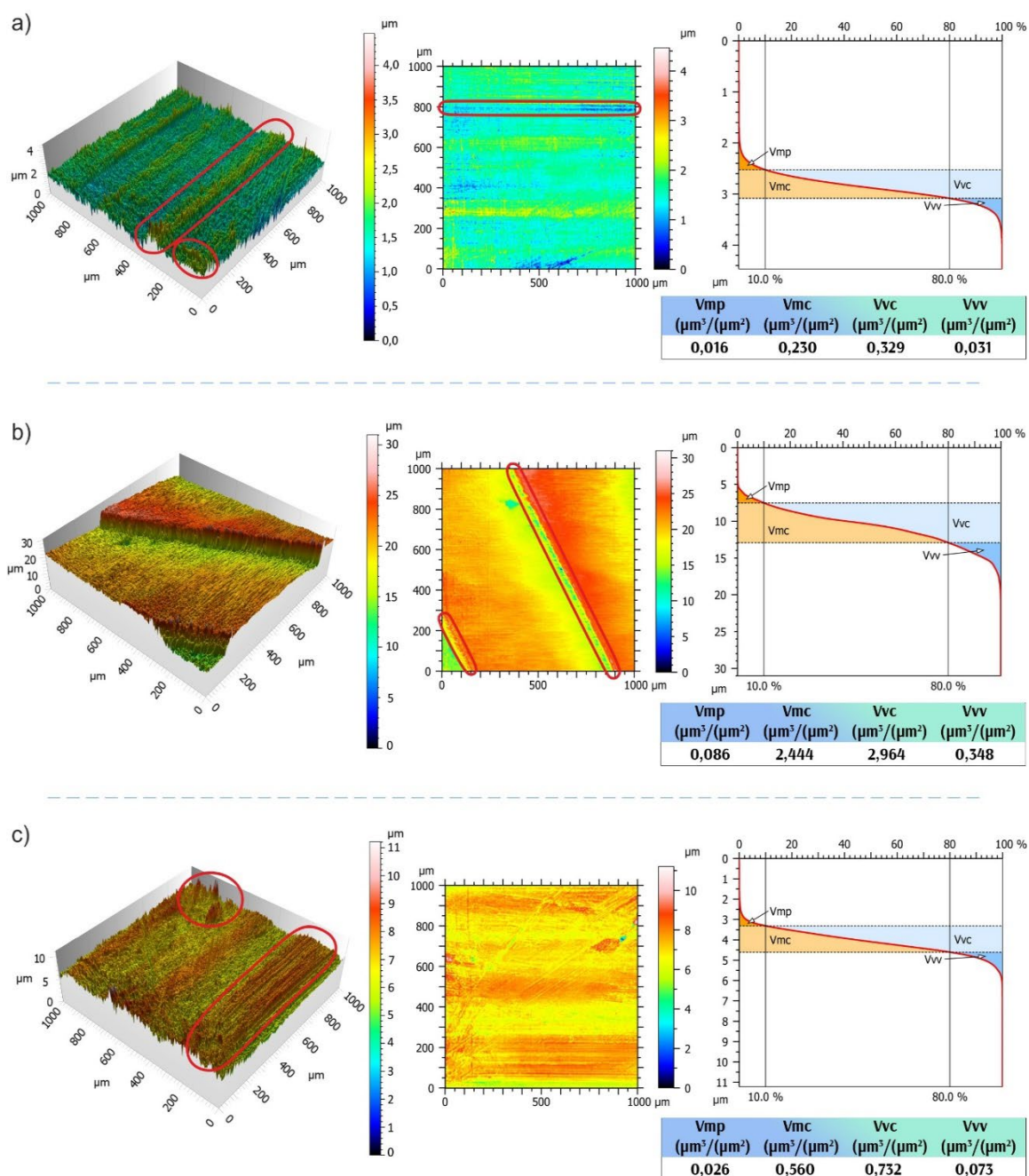
l/min i  $E = 15$  ml/h,  $P = 40$  l/min i  $E = 15$  ml/h,  $P = 40$  l/min i  $E = 75$  ml/h. Wskazuje to na asymetrię lewostronną z przewagą głębokich dolin na powierzchni oraz jednocześnie potwierdza wyniki badań symulacyjnych, zgodnie z którymi dla natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego wynoszącego 15 ml/h dla wiertła z prędkością obrotową 8000 obr./min otrzymywano mniejsze rozmiary kropeł, które nie są w stanie zapewnić wystarczającego chłodzenia i smarowania strefy skrawania.



Rys. 5.34. Wartości współczynnika asymetrii powierzchni o ograniczonej skali  $Ssk$  i współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $Sku$  w zależności od parametrów tworzenia mgły olejowej  $E$  i  $P$  podczas wiercenia stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  z prędkością obrotową  $n = 8000$  obr./min

Widoki izometryczne, mapy warstwiczne i parametry objętościowe 3D topografii powierzchni obrobionej próbek charakteryzujących się najmniejszą wartością parametru

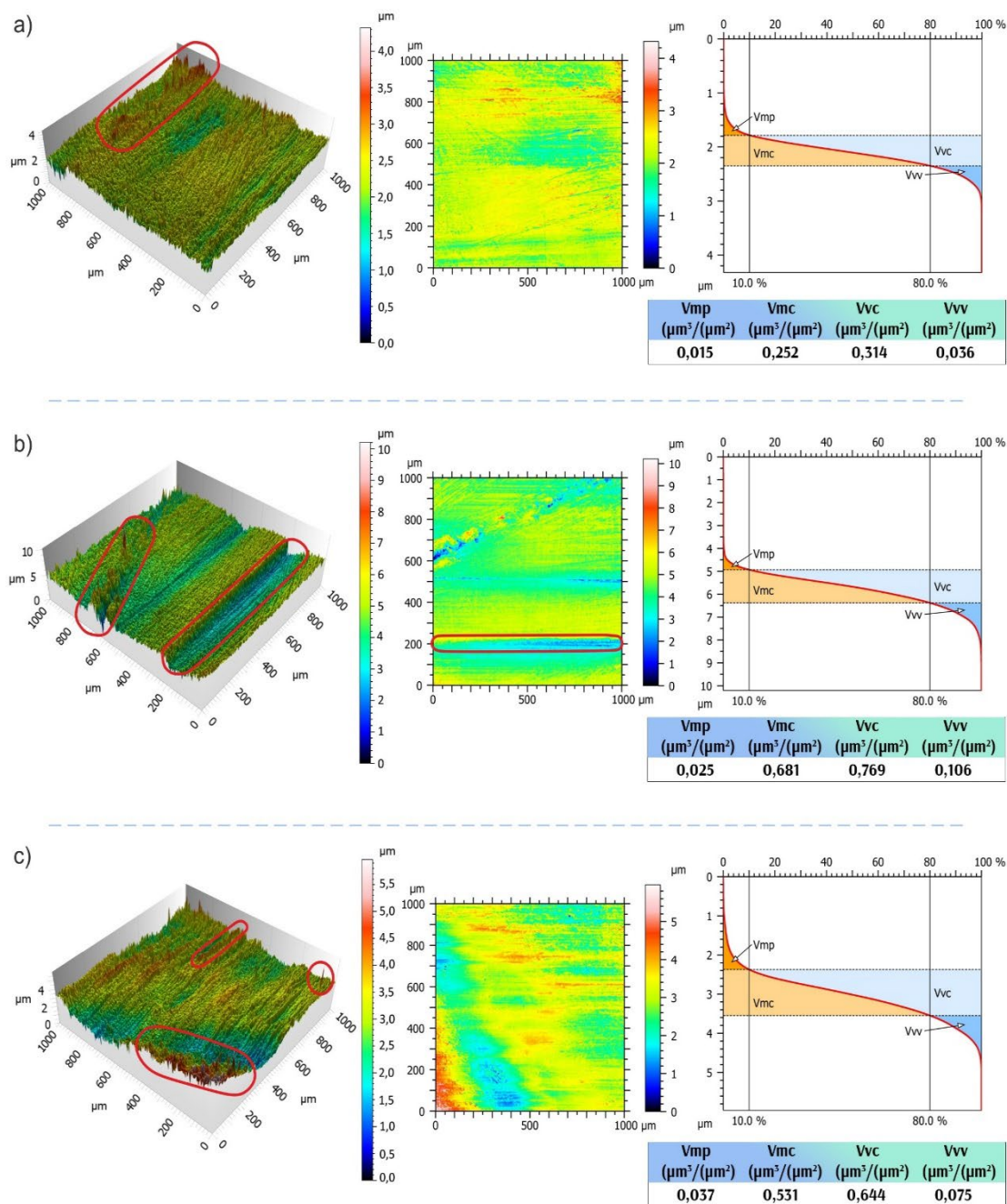
$S_q$  dla trzech rozpatrywanych prędkości wrzeciona  $n$  i wybranych metod chłodzenia przedstawiono na rys. 5.35–5.37.



Rys. 5.35. Zestawienie widoków izometrycznych, map warstwicowych oraz parametrów objętościowych 3D po wierceniu stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) z prędkością obrotową  $n = 6000$  obr./min w warunkach: a) chłodzenia metodą MQL z parametrami tworzenia medium czynnego  $E = 40$  ml/h,  $P = 80$  l/min, b) obróbki na sucho, c) chłodzenia sprężonym powietrzem

Analizując topografię powierzchni przedstawionych na rys. 5.35 zaobserwowano, iż każda z nich charakteryzowała się występowaniem nieregularnych wzniesień bądź szczytów. Na powierzchni po wierceniu w warunkach chłodzenia medium czynnym o następujących parametrach tworzenia mgły olejowej:  $E = 40$  ml/h,  $P = 80$  l/min (rys. 5.35a) odnotowano występowanie długiego pasma szczytów oraz pasma dolin, a także skupisko nieregularnych wierzchołków. W wyniku przeprowadzenia obróbki na sucho (rys. 5.35b), powierzchnia charakteryzowała się nierównościami o charakterze schodkowym, natomiast po wykorzystaniu sprężonego powietrza (rys. 5.35c), na powierzchni zaobserwowano szerokie pasmo szczytów oraz skupisko nieregularnych wierzchołków. Tasdelen i in. [118] wskazują, że zastosowanie sprężonego powietrza podczas wiercenia prowadzi do występowania zjawiska płynięcia bocznego, jak również do przywierania materiału obrabianego do ścianek otworu, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia chropowatości powierzchni. W przypadku wiercenia w warunkach obróbki na sucho, jak i sprężonego powietrza (rys. 5.35b, c) nie odnotowano jednak występowania głębokich dolin. Analiza parametrów objętościowych dowiodła, że minimalne wartości  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$  i  $V_{vv}$  uzyskano w wyniku zastosowania metody MQL w warunkach  $E = 40$  ml/h,  $P = 80$  l/min, a maksymalne po obróbce na sucho. W porównaniu do pozostałych rozpatrywanych metod chłodzenia, ich wartości uległy zmniejszeniu przy zastosowaniu metody MQL maksymalnie o około: 81,4% ( $V_{mp}$ ), 90,6% ( $V_{mc}$ ), 88,9% ( $V_{vc}$ ) i 91,1% ( $V_{vv}$ ).

W wyniku analizy topografii powierzchni uzyskanych po wierceniu z prędkością wrzeciona wynoszącą  $n = 7000$  obr./min odnotowano ponownie najmniejsze występowanie nieregularnych szczytów i dolin po zastosowaniu metody zminimalizowanego smarowania (rys. 5.36a). Na powierzchni obrabianej w takich warunkach zaobserwowano jedynie jedno pasmo nieregularnych wierzchołków. W przypadku obróbki na sucho (rys. 5.36b), uzyskana powierzchnia charakteryzowała się nie tylko pasmem wierzchołków zlokalizowanym pod kątem ostrym w stosunku do pozostałych nierówności, ale również głęboką doliną. Z kolei po zastosowaniu sprężonego powietrza (rys. 5.36c) na powierzchni uzyskano pojedyncze wierzchołki oraz ich nieregularne skupiska. Analiza rozpatrywanych parametrów objętościowych wykazała, że minimalne wartości  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$  i  $V_{vv}$  otrzymano poprzez zastosowanie metody zminimalizowanego smarowania, a ich maksymalne wartości wystąpiły w wyniku obróbki na sucho (wyjątek stanowi parametr  $V_{mp}$ , którego maksymalną wartość zaobserwowano po chłodzeniu sprężonym powietrzem).

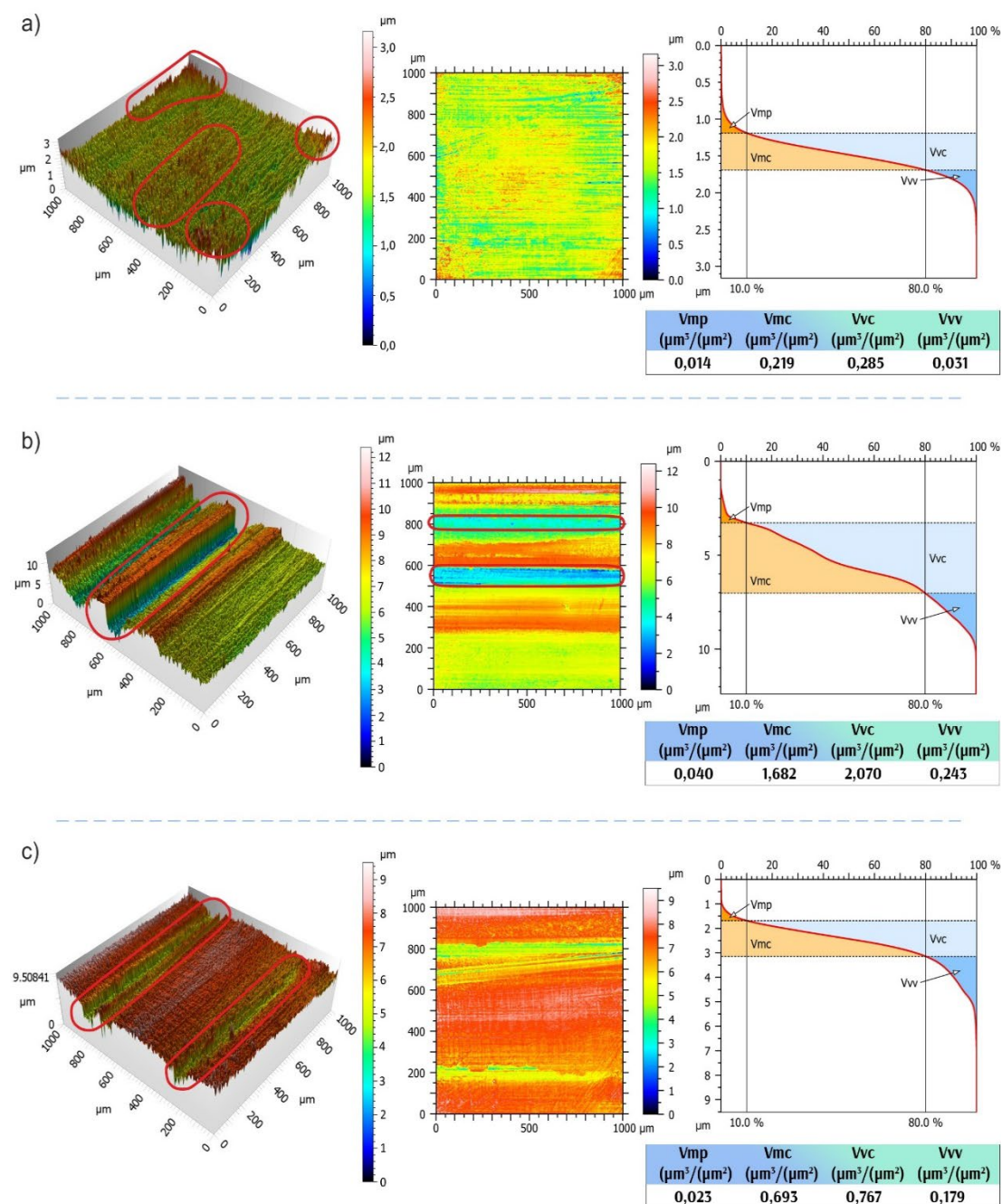


Rys. 5.36. Zestawienie widoków izometrycznych, map warstwicowych oraz parametrów objętościowych 3D po wierceniu stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) z prędkością obrotową  $n = 7000 \text{ obr./min}$  w warunkach: a) chłodzenia metodą MQL z parametrami tworzenia medium czynnego  $E = 40 \text{ ml/h}$ ,  $P = 60 \text{ l/min}$ , b) obróbki na sucho, c) chłodzenia sprężonym powietrzem

Stephenson i in. [129] wskazują, że zwiększenie prędkości obrotowej wiertła prowadzi do skuteczniejszego odprowadzania wiórów ze strefy skrawania, a zgodnie z przeprowadzonymi badaniami symulacyjnymi wartości natężenia przepływu objętościowego powietrza  $P$  i natężenia przepływu objętościowego oleju  $E$  wynoszące



kolejno 60 l/min i 40 ml/h przyczyniły się do powstawania kropeł o mniejszych średnicach, co łącznie mogło doprowadzić do zmniejszenia chropowatości powierzchni i uzyskania zmniejszonych wartości parametrów objętościowych (rys. 5.36).



Rys. 5.37. Zestawienie widoków izometrycznych, map warstwowych oraz parametrów objętościowych 3D po wierceniu stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) z prędkością obrotową  $n = 8000$  obr/min w warunkach: a) chłodzenia metodą MQL z parametrami tworzenia medium czynnego  $E = 25$  ml/h,  $P = 60$  l/min, b) obróbki na sucho, c) chłodzenia sprężonym powietrzem

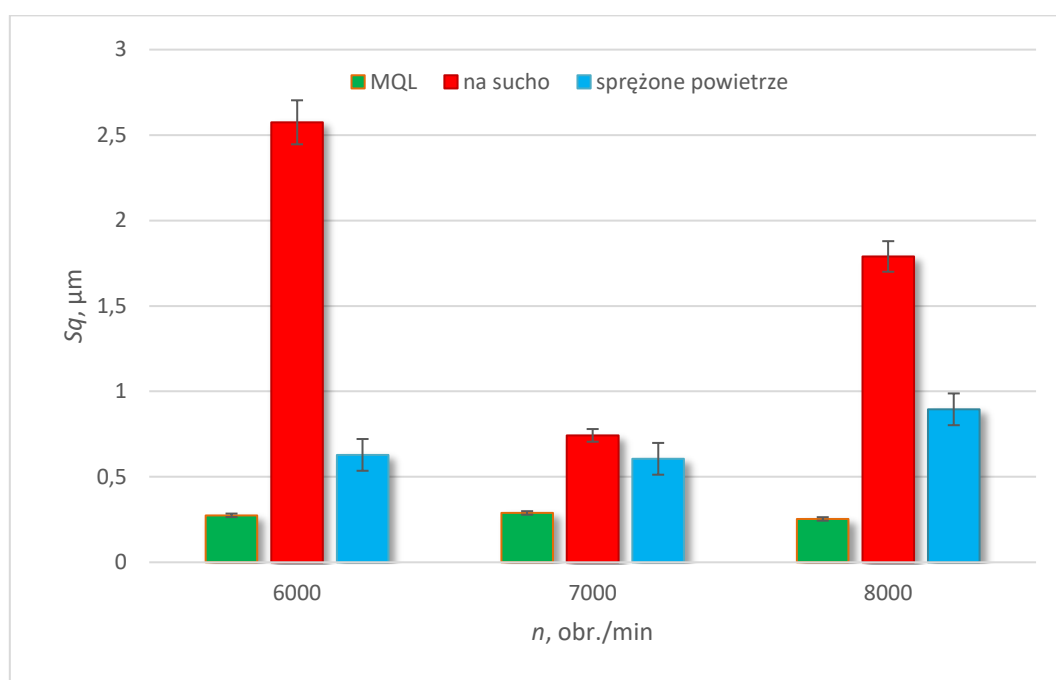
Ostatecznie dzięki zastosowaniu metody MQL z parametrami:  $E = 40$  ml/h,  $P = 60$  l/min (rys. 5.36a) uzyskano zmniejszenie wartości  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$  i  $V_{vv}$  maksymalnie o około: 59,5%, 63%, 59,2% i 66% w porównaniu do pozostałych rozpatrywanych warunków obróbki przy prędkości obrotowej wiertła  $n = 7000$  obr./min.

Analizując topografie powierzchni przedstawione na rys. 5.37 zaobserwowano, że w wyniku zastosowania metody MQL (rys. 5.37a) na powierzchni występowały liczne nieregularne wierzchołki tworzące skupiska oraz pasma szczytów zlokalizowane w centralnej części punktu badawczego. Z kolei dla dwóch pozostałych metod chłodzenia tj. obróbki na sucho (rys. 5.37b) i sprężonego powietrza (rys. 5.37c) odnotowano występowanie dolin, przy czym po obróbce na sucho charakteryzowały się one dużą szerokością, a na powierzchni zaobserwowano też szerokie pasma szczytów. W wyniku analizy wartości parametrów objętościowych stwierdzono, iż zastosowanie metody zminimalizowanego smarowania skutkowało uzyskaniem minimalnych wartości  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$  i  $V_{vv}$  nie tylko w porównaniu do pozostałych metod chłodzenia zastosowanych przy prędkości obrotowej wrzeciona  $n = 8000$  obr./min, ale również w zestawieniu z wartościami otrzymanymi dla metody MQL przy wierceniu z pozostałymi prędkościami  $n$  (rys. 5.35a–5.36a). Wskazuje to zatem, iż w celu zmniejszenia wartości parametrów objętościowych, nie należy stosować zbyt małej prędkości obrotowej wiertła ani zbyt wysokiego natężenia przepływu powietrza i płynu syntetycznego. W porównaniu do obróbki na sucho oraz wiercenia w warunkach chłodzenia sprężonym powietrzem, zastosowanie metody MQL umożliwiło zmniejszenie wartości objętości materiału wierzchołków powierzchni o ograniczonej skali  $V_{mp}$ , objętości materiału rdzenia powierzchni o ograniczonej skali  $V_{mc}$ , objętości pustek rdzenia powierzchni o ograniczonej skali  $V_{vc}$  i objętości pustek wgłębień powierzchni o ograniczonej skali  $V_{vv}$  maksymalnie o około: 65%, 87%, 86,2% i 87,2%.

Na rys. 5.38–5.39 przedstawiono wpływ trzech metod chłodzenia na wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $S_q$  oraz największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $S_z$  przy zmiennych prędkościach obrotowych wiertła  $n$ . Analizując zależność wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali od metody chłodzenia (rys. 5.38) zaobserwowano, że bez względu na zastosowaną prędkość obrotową narzędzia, maksymalne wartości  $S_q$  uzyskano w wyniku obróbki na sucho, a minimalne – przy zastosowaniu metody zminimalizowanego smarowania. W przypadku MQL najkorzystniejszą prędkość obrotową stanowi 8000

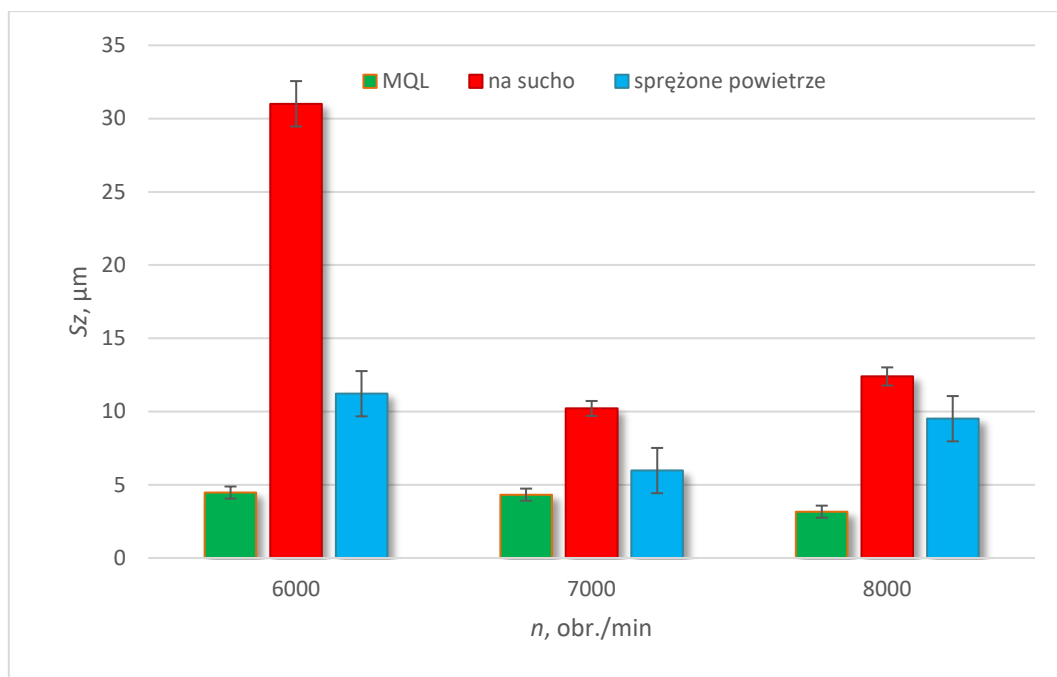


obr./min, natomiast dla pozostałych metod jest to 7000 obr./min. W porównaniu do obróbki na sucho i chłodzenia sprężonym powietrzem, wykorzystanie mgły olejowej podczas wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) umożliwiło zmniejszenie wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali o około: 89,3% i 56,3% ( $n = 6000$  obr./min), 61,1% i 52,3% ( $n = 7000$  obr./min), 85,8% i 71,7% ( $n = 8000$  obr./min).



Rys. 5.38. Wartości średniej kwadratowej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $Sq$  w zależności od zastosowanej metody chłodzenia przy zmiennej prędkości obrotowej wiertła  $n$

W wyniku analizy otrzymanej zależności (rys. 5.39) odnotowano, że ponownie maksymalne wartości rozpatrywanego parametru 3D topografii powierzchni uzyskano podczas obróbki na sucho, a minimalne dzięki zastosowaniu metody MQL. Tak jak w przypadku parametru  $Sq$  (rys. 5.38), w celu zmniejszenia wartości największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali przy chłodzeniu metodą zminimalizowanego smarowania zaleca się realizację wiercenia z prędkością obrotową równą 8000 obr./min, natomiast w przypadku pozostałych metod – z prędkością  $n = 7000$  obr./min. W zestawieniu z obróbką na sucho i sprężonym powietrzem dzięki metodzie MQL wartość  $Sz$  uległa zmniejszeniu o około: 85,6% i 60,1% ( $n = 6000$  obr./min), 57,7% i 27,6% ( $n = 7000$  obr./min) oraz 74,5% i 66,8% ( $n = 8000$  obr./min).

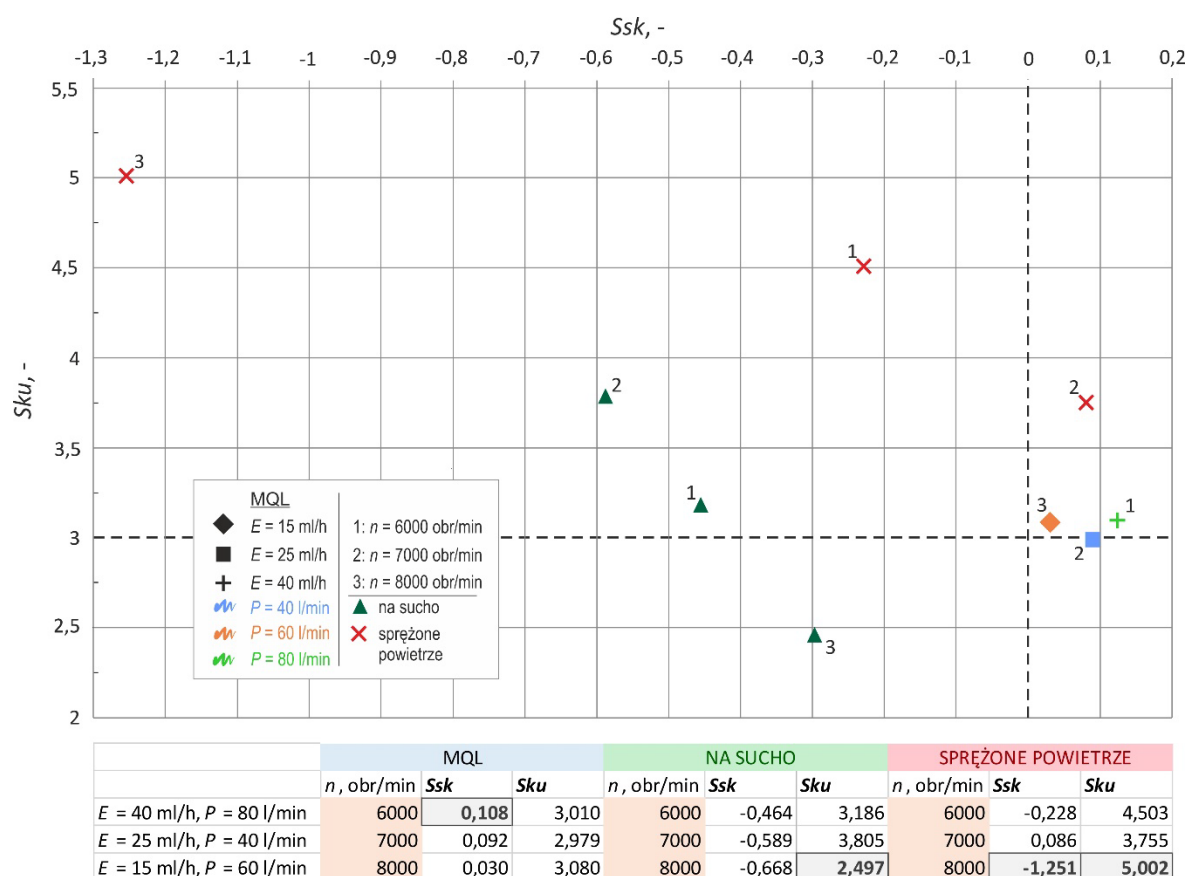


Rys. 5.39. Wartości największej wysokości powierzchni o ograniczonej skali  $S_z$  w zależności od zastosowanej metody chłodzenia przy zmiennej prędkości obrotowej wiertła  $n$

Na rys. 5.40 przedstawiono wartości współczynnika asymetrii powierzchni o ograniczonej skali  $S_{sk}$  oraz współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $S_{ku}$  w zależności od zastosowanej metody chłodzenia przy trzech zmiennych prędkościach obrotowych wrzeciona.

W wyniku analizy wpływu metody chłodzenia na wartości parametrów amplitudowych (rys. 5.40) zaobserwowano, iż metoda MQL zapewnia nie tylko wartości  $S_{ku}$  najbardziej zbliżone do 3, świadczące o niewielkiej liczbie wysokich szczytów, głębokich dolin oraz wad powierzchniowych bądź nawet o ich braku przy zastosowaniu parametrów:  $P = 40$  l/min i  $E = 25$  ml/h, ale również umożliwia maksymalne ograniczenie asymetrii powierzchni przy natężeniach przepływu objętościowego powietrza i płynu syntetycznego wynoszących:  $P = 60$  l/min,  $E = 15$  ml/h. W takich warunkach obróbki powierzchnia będzie charakteryzowała się jedynie niewielką asymetrią prawostronną. W wyniku obróbki na sucho w zależności od prędkości obrotowej uzyskano platokurtyczny i leptokurtyczny rozkład wierzchołków. Wskazuje to więc na konieczność stosowania prędkości obrotowej  $n = 8000$  obr/min w celu wyeliminowania wad powierzchniowych oraz wysokich szczytów i głębokich dolin na powierzchni obrobionej. Dla każdej wartości  $n$  uzyskano również asymetrię lewostronną, przy czym maksymalną wartość  $S_{sk}$  dla obróbki na sucho odnotowano przy prędkości obrotowej wynoszącej 7000 obr./min. Zastosowanie

sprężonego powietrza doprowadziło do uzyskania leptokurtycznego rozkładu wierzchołków i maksymalnej wartości  $Sku$  spośród wszystkich trzech rozpatrywanych metod chłodzenia. Wskazuje to zatem na obecność licznych wad powierzchniowych oraz, jak wskazują Świrad i in. [130], występowanie ostrych wierzchołków na powierzchni obrobionej. Obróbka z wykorzystaniem sprężonego powietrza skutkowałą również najniższą ujemną wartością parametru  $Ssk$ , na podstawie, której można stwierdzić, że powierzchnia cechuje się asymetrią lewostronną z przewagą głębokich dołów. Jedynie w warunkach prędkości obrotowej wynoszącej 7000 obr./min występowała asymetria prawostronna, świadcząca o przewadze ostrych szczytów na powierzchni obrobionej.



Rys. 5.40. Wartości współczynnika asymetrii powierzchni o ograniczonej skali  $Ssk$  i współczynnika nachylenia powierzchni o ograniczonej skali  $Sku$  w zależności od metody chłodzenia dla trzech zastosowanych prędkości obrotowych wiertła  $n$

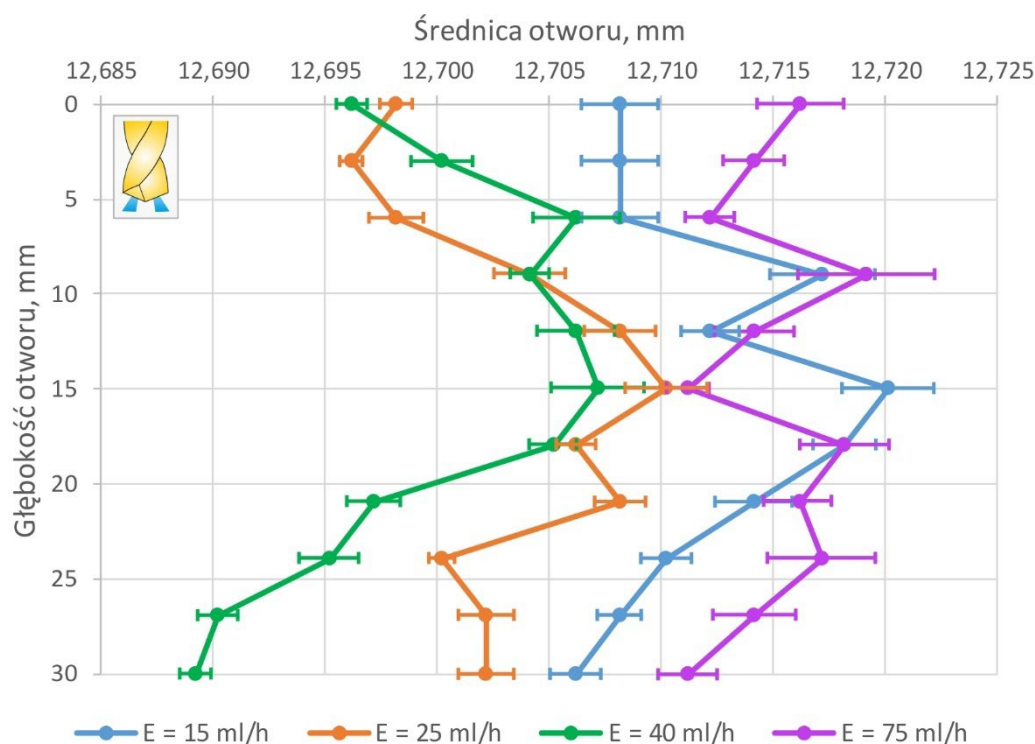


### 5.3. Ocena dokładności wykonania otworów

Dokładność wykonania otworów w głowicach silnikowych jest niezwykle istotna z kilku powiązanych ze sobą powodów. Głowica silnika to kluczowy komponent, który odpowiada za wiele aspektów pracy silnika, takich jak przepływ paliwa, spalanie i odprowadzanie spalin. Dlatego też dokładność wykonania otworów ma wpływ na różne aspekty działania silnika oraz ogólną wydajność i trwałość pojazdu.

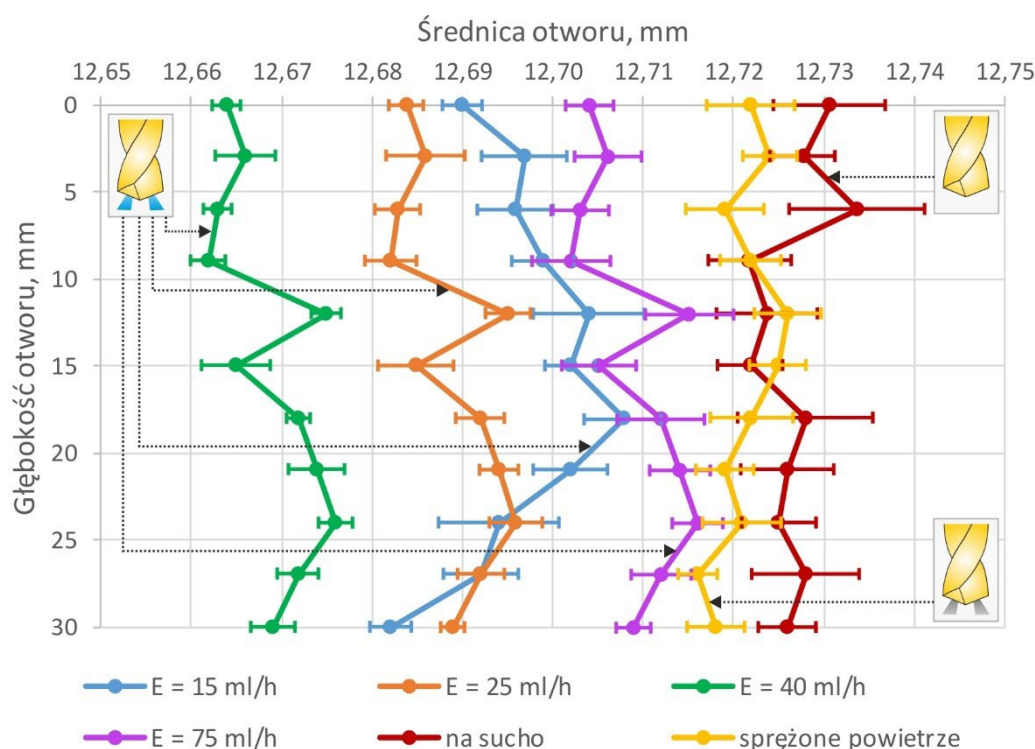
W pracy przedstawiono dokładność wykonania otworów wykonanych w głowicy silnikowej odpowiedzialnych za prawidłowy montaż głowicy do bloku silnika. W przedsiębiorstwie Volkswagen Motor Polska Sp. z o. o. tolerancja wykonania takiego otworu powinna mieścić się  $+0,1$  mm, czyli wymiar graniczny nie może przekroczyć wartości 12,7 mm

Badania przeprowadzono w zależności od zmiennych parametrów tworzenia aerozolu w metodzie MQL dla wszystkich zmiennych prędkości obrotowych (rys. 5.41–5.49). Dodatkowo wykonano otwory podczas toczenia z chłodzeniem sprężonym powietrzem oraz przy obróbce na sucho dla trzech wybranych prędkości obrotowych narzędzia w celu porównania z metodą MQL (rys. 5.42, 5.45 oraz 5.48).



Rys. 5.41. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla:  $n = 6000$  obr./min i  $P = 40$  l/min

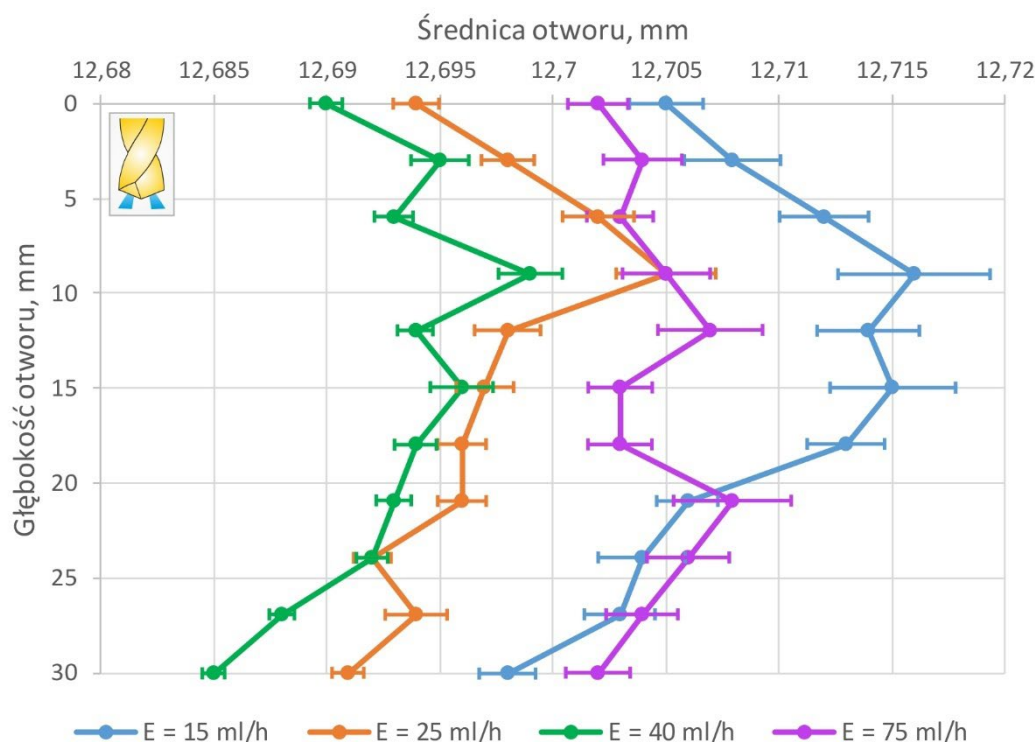
Analizując wartości średnicy otworu wykonanych dla prędkości obrotowej 6000 obr./min (rys. 5.41) oraz natężenia przepływu powietrza  $P$  stwierdzono, że dla wszystkich wartości zmiennych natężenia cieczy chłodząco-smarującej przekroczono dopuszczalną tolerancję wymiarową na całej długości otworu (średnica narzędzia  $d = 12$  mm i długość pomiarowa wewnątrz otworu  $l = 30$  mm). Najbardziej dokładny otwór ze względu na nie przekroczenie wymiaru granicznego, stwierdzono dla przepływu  $E = 25$  ml/h (do  $l \leq 6$  mm) oraz 40 ml/h (od  $l \geq 21$  mm).



Rys. 5.42. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla  $P = 60$  l/min oraz w warunkach chłodzenia sprężonym powietrzem i przy obróbce na sucho dla  $n = 6000$  obr./min

Zwiększenie natężenia przepływu powietrza do 60/min umożliwiło wykonanie otworów spełniających dokładność wymiarową dla  $E = 25$  ml/h oraz  $E = 40$  ml/h, ponieważ różnice pomiędzy wartością średnic otworu nie przekraczała tolerancji  $+0,1$  mm na całej długości otworu. W tych warunkach tworzenia medium czynnego w metodzie MQL uzyskano mniejsze krople aerozolu (tab. 3.13) w porównaniu do pozostałych wartości natężenia przepływu płynu syntetycznego ( $E = 15$  ml/h oraz  $E = 75$  ml/h), co spowodowało lepszą penetrację strefy skrawania przez aerozol i zmniejszenie temperatury w strefie skrawania [131]. Zastosowanie wiercenia na sucho lub chłodzenia sprężonym powietrzem podczas

obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) spowodowało zwiększenie niedokładności otworu i przekroczenie dopuszczalnej wartości. Jest to spowodowane zarówno większymi wartościami średniokwadratowych wypadkowych przyspieszeń drgań (rys. 5.25) jak również zwiększoną temperaturą skrawania w wyniku braku smarowania, wpływających na powstanie większych odkształceń plastycznych otworu [131].



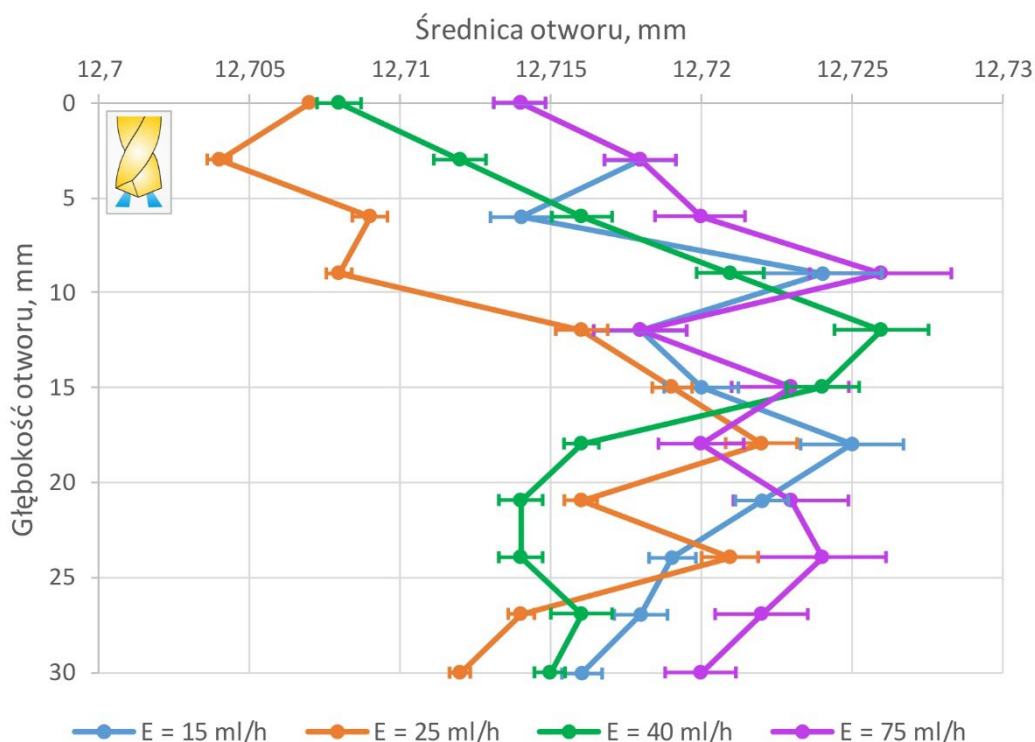
Rys. 5.43. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla:  $n = 6000 \text{ obr./min}$  i  $P = 80 \text{ l/min}$

Przy zastosowaniu większego natężenia przepływu powietrza nie stwierdzono średniej średnicy wartości otworów, które mieściłyby się w dopuszczalnej wartości  $12,6 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$ . Tylko w przypadku zastosowania  $P = 40 \text{ ml/h}$ , tylko 3 z 10 otworów, które zostały poddane pomiarom mieściły się w zakładanej tolerancji. Zwiększenie przepływu powietrza może prowadzić do zwiększenia turbulencji aerozolu [132] a tym samym zmniejszeniu chłodzenia i smarowania krawędzi skrawających narzędzia (rys. 3.14). Największą niedokładność wymiarową zaobserwowano dla minimalnego przepływu natężenia płynu syntetycznego ( $E = 15 \text{ ml/h}$ ).

Zwiększenie prędkości obrotowej do  $7000 \text{ obr./min}$  (rys. 5.44–5.46) spowodowało nieznaczne zwiększenie dokładności wykonania otworu (różnice dla poszczególnych parametrów tworzenia aerozolu nie przekraczały 5%). Zastosowanie wartości  $P = 40 \text{ l/min}$

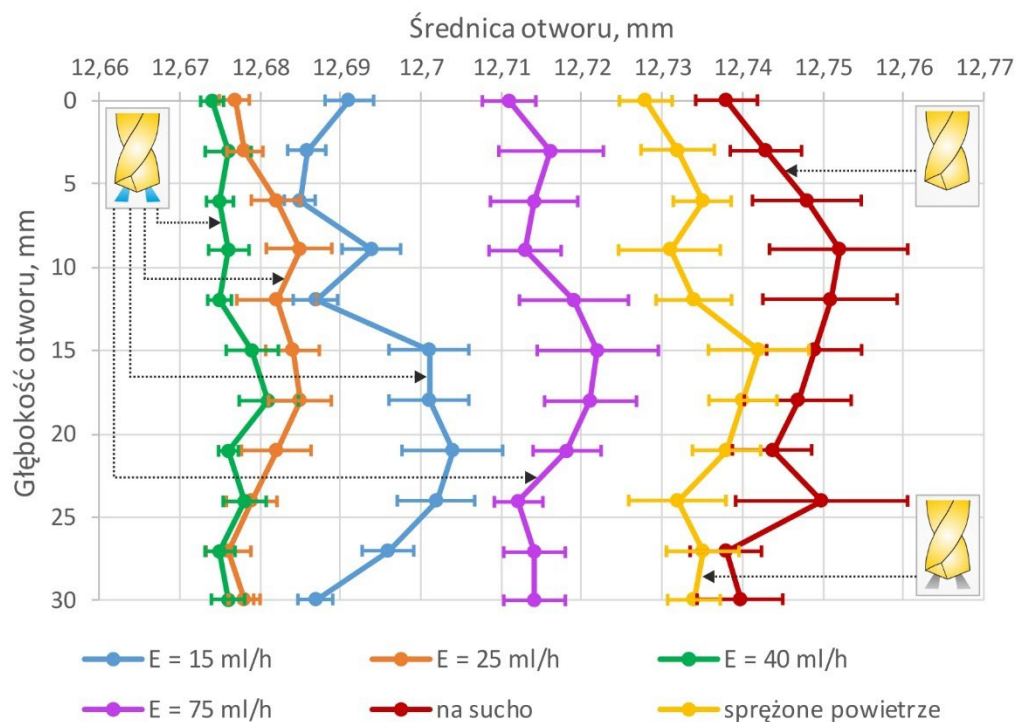


dla rozpatrywanej prędkości obrotowej spowodowało uzyskanie dla wszystkich otworów większej wartości średnicy niż dopuszczalna tolerancja wymiarowa  $+0,1$  mm (rys. 5.44). Wartości średnicy otworu zostały zwiększone przy zastosowaniu większej prędkości obrotowej w szczególności przy obróbce na sucho. Średnie wartości średnic otworu mieszczą się w granicach wymiarowych w warunkach tworzenia aerozolu dla  $P = 60 - 80$  l/min oraz  $E = 25 - 45$  ml/h.

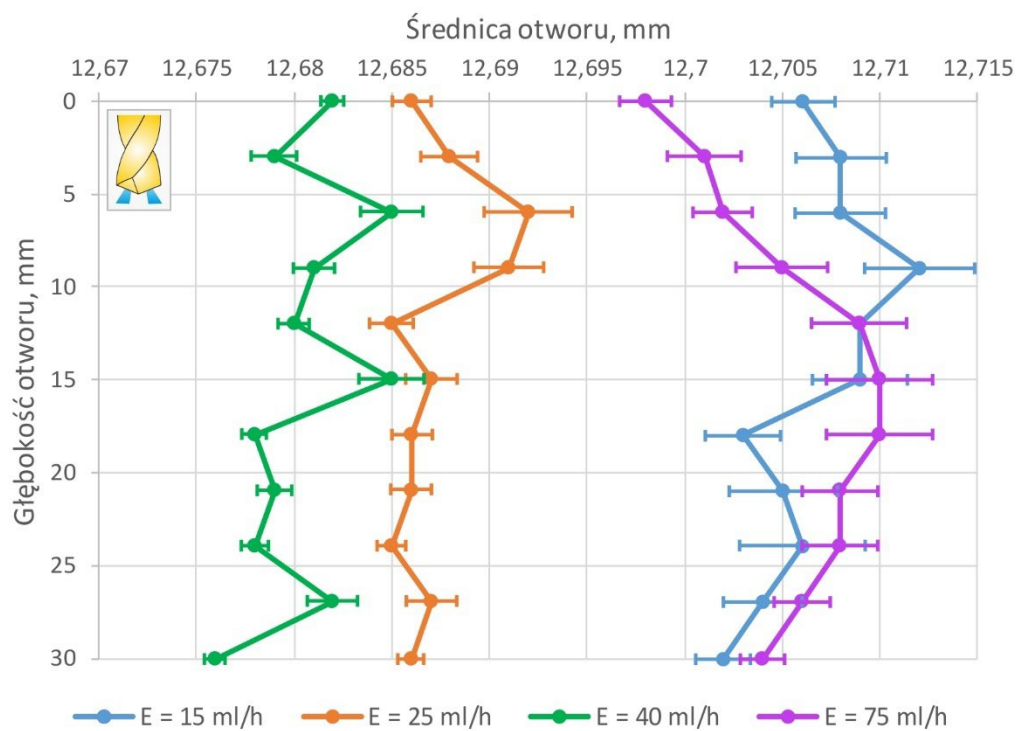


Rys. 5.44. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla:  $n = 7000$  obr./min i  $P = 40$  l/min

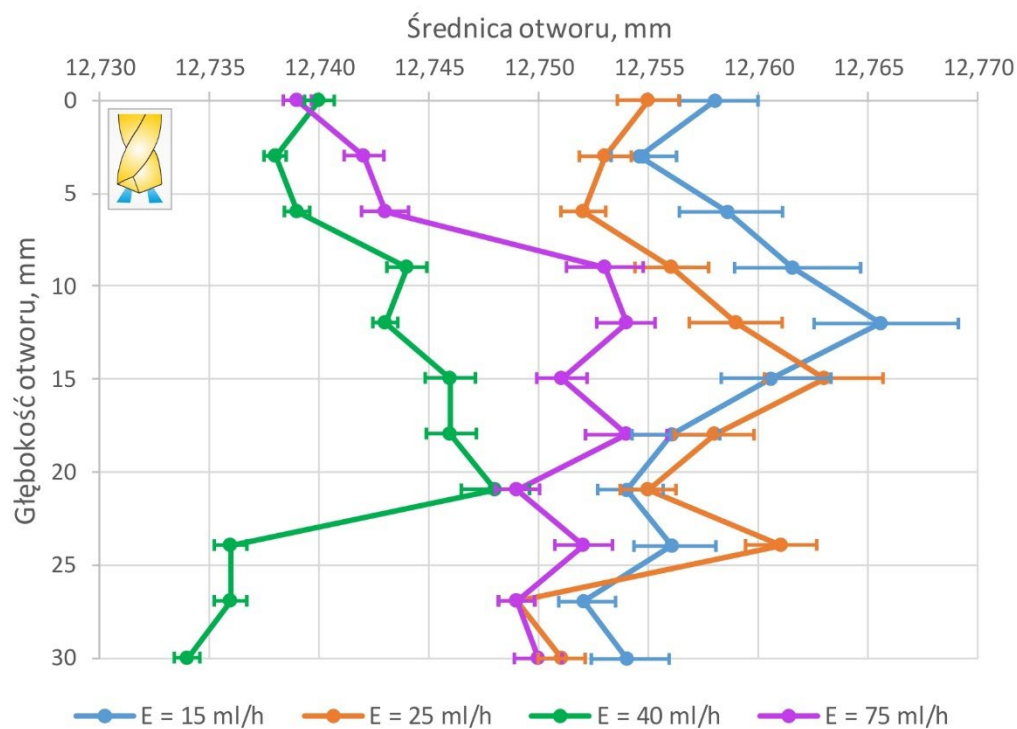
Dopuszczalna tolerancja otworu została natomiast przekroczona dla wszystkich średnic otworów przy zastosowaniu największej prędkości obrotowej w całym przedziale zmiennych parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania jak również i ze względu na metodę chłodzenia (rys. 5.47–5.49). Jest to spowodowane zarówno zwiększeniem temperatury w strefie skrawania związanej ze zwiększoną prędkością obrotową narzędzia jak również większymi wartościami średniokwadratowymi wypadkowych przyspieszeń drgań (rys. 5.27). Najmniejsze wartości średnicy wykonanego otworu stwierdzono dla natężenia przepływu powietrza 60 l/min i natężenia przepływu płynu syntetycznego 40 ml/h.



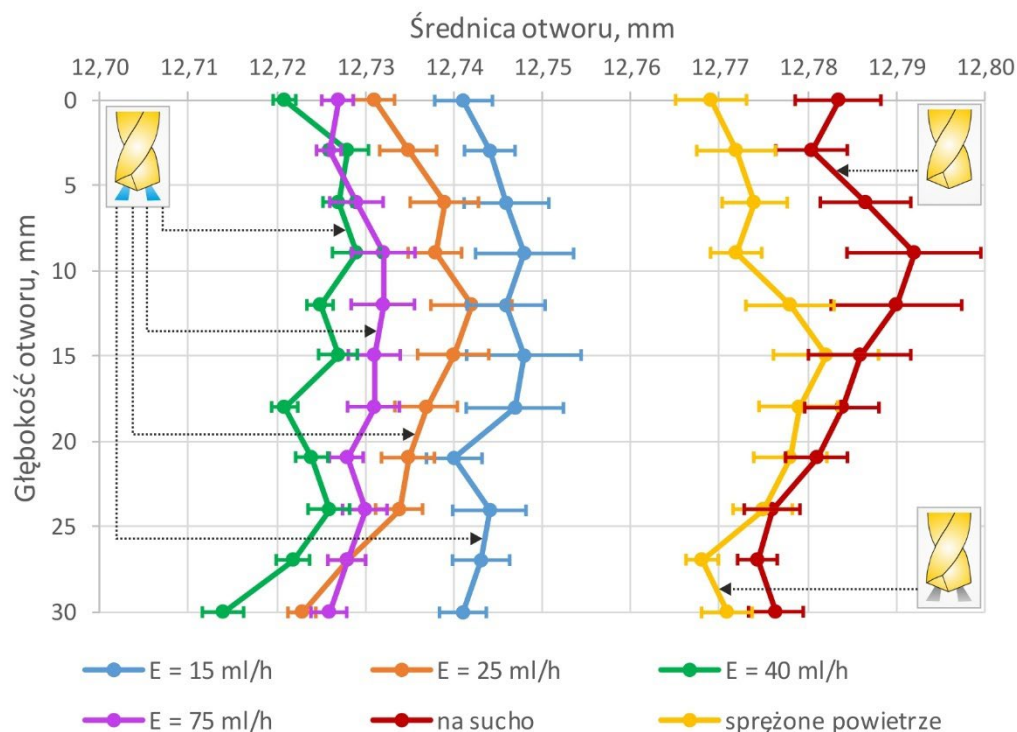
Rys. 5.45. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla  $P = 60$  l/min oraz w warunkach chłodzenia sprężonym powietrzem i przy obróbce na sucho dla  $n = 7000$  obr./min



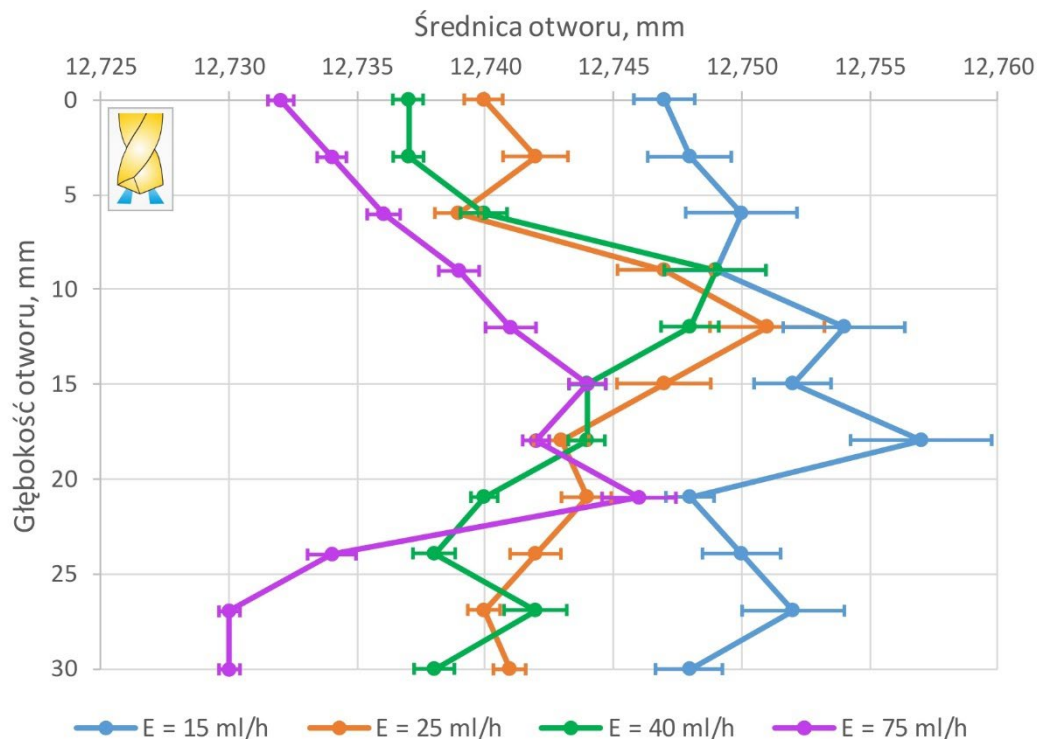
Rys. 5.46. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla:  $n = 7000$  obr./min i  $P = 80$  l/min



Rys. 5.47. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla:  $n = 8000$  obr./min i  $P = 40$  l/min



Rys. 5.48. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla  $P = 60$  l/min oraz w warunkach chłodzenia sprężonym powietrzem i przy obróbce na sucho dla  $n = 8000$  obr./min

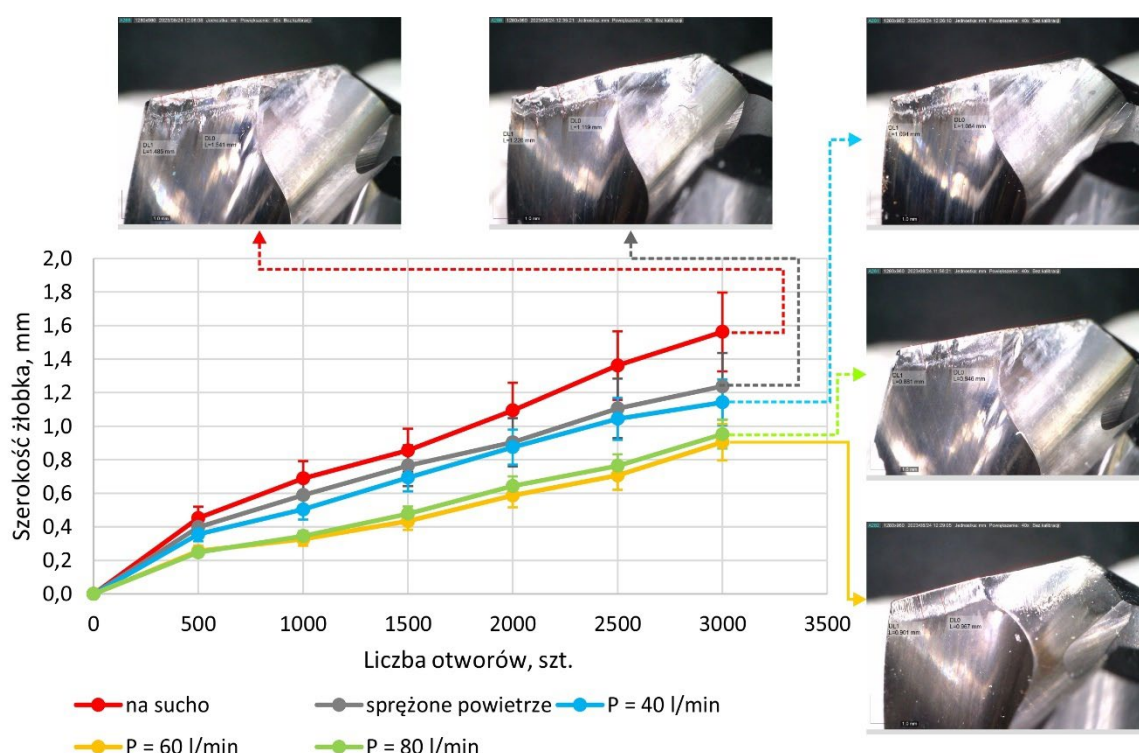


Rys. 5.49. Wartości średnicy otworu w zależności od zmiennego przepływu natężenia płynu syntetycznego w metodzie MQL dla:  $n = 7000 \text{ obr./min}$  i  $P = 80 \text{ l/min}$

Podsumowując największy wpływ na dokładność wymiarową wykonywanych otworów ma prędkość obrotowa narzędzia jak również zastosowanie metody zminimalizowanego smarowania podczas obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu). Ważnym zagadnieniem przy zastosowaniu większych prędkości obrotowych jest również odpowiednie dobranie wartości parametrów tworzenia aerozolu medium czynnego, albowiem przy zastosowaniu prędkości obrotowej  $7000 \text{ obr./min}$  dla  $P \geq 60 \text{ l/min}$  oraz  $E = 25 - 40 \text{ ml/h}$  zaobserwowano wykonanie otworu w zakładanej tolerancji.

## 5.4. Ocena zużycia narzędzia

Zużycie wiertła wykonano uwzględniając pomiary szerokości żłobka na powierzchni natarcia narzędzia oraz analizy SEM. Wpływ metody chłodzenia oraz natężenia przepływu powietrza w metodzie zminimalizowanego smarowania na szerokość żłobka  $KB$  przedstawiono na rys. 5.50. Badania wykonano dla stałego natężenia przepływu płynu syntetycznego i prędkości skrawania, dla których stwierdzono najmniejsze wartości drgań i wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej.

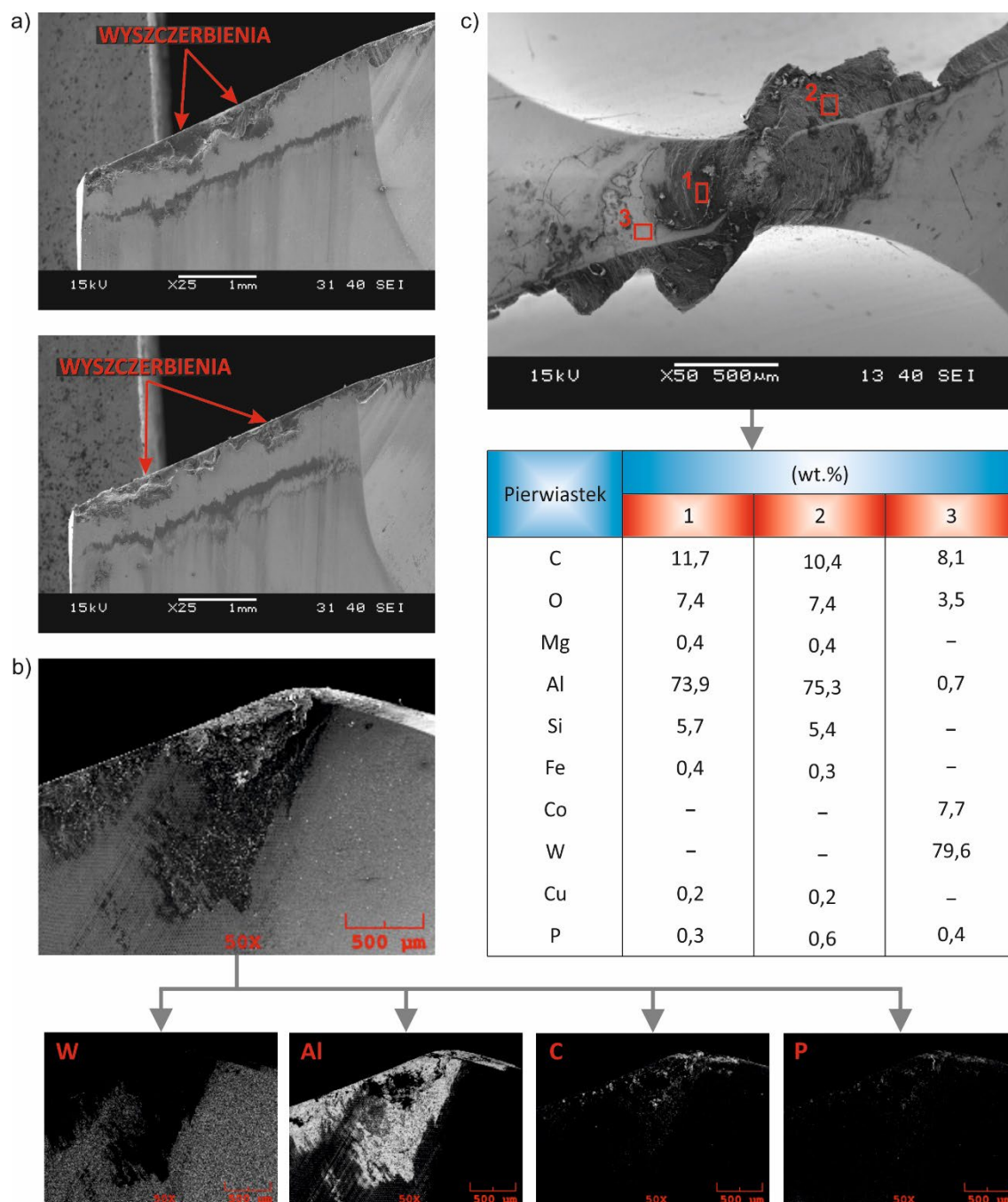


Rys. 5.50. Szerokość żłobka  $KB$  w zależności od natężenia przepływu powietrza w metodzie zminimalizowanego smarowania oraz metody chłodzenia dla  $E = 40$  ml/h i  $n = 7000$  obr./min

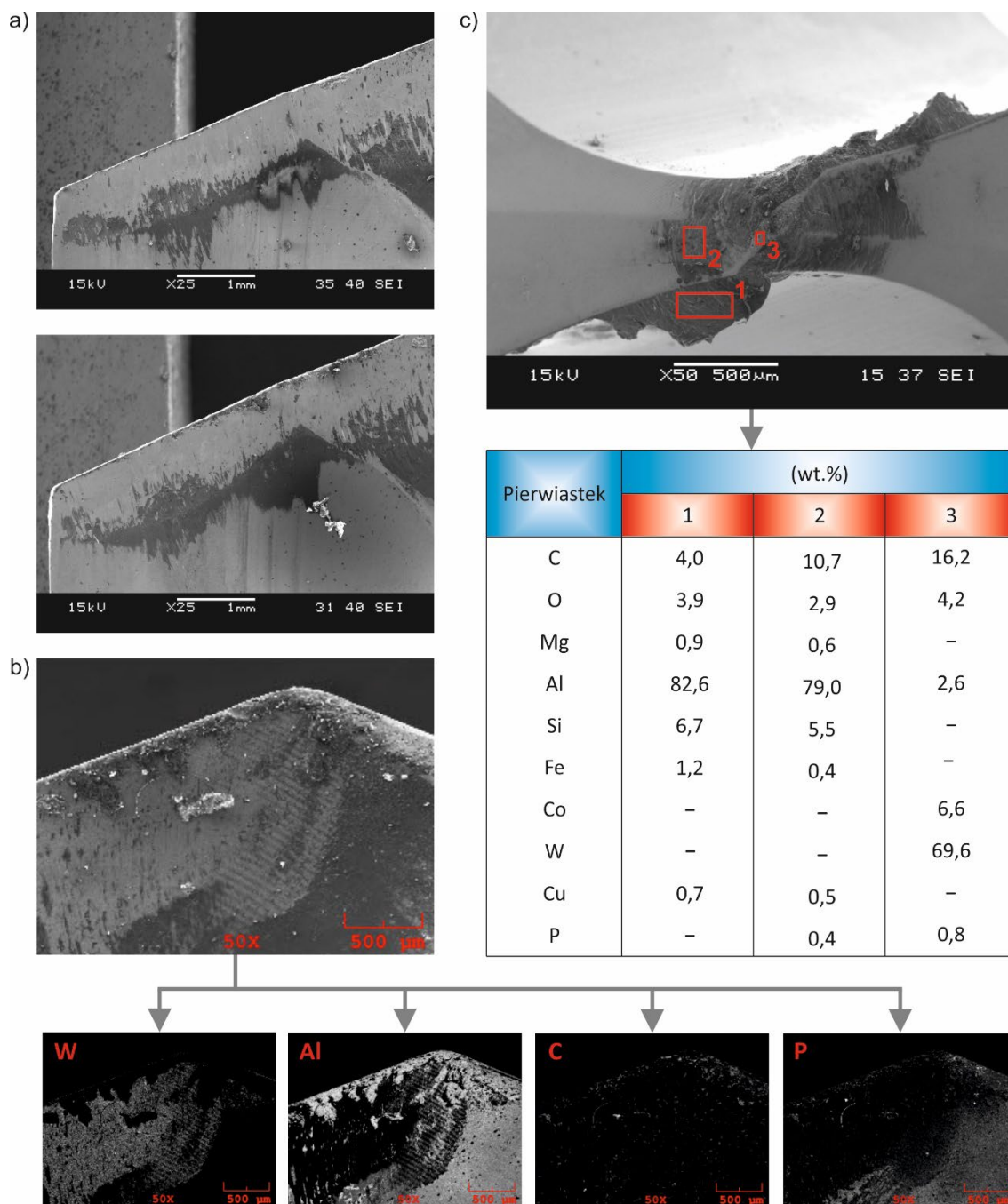
Analizując szerokość żłobka (rys. 5.50) stwierdzono, że w całym przedziale liczby wykonanych otworów największe wartości tego parametru uzyskano przy obróbce na sucho. Chłodzenie sprężonym powietrzem spowodowało zmniejszenie  $KB$  o około 20,7% w porównaniu do obróbki na sucho. Przy zastosowaniu zmiennego natężenia przepływu powietrza w metodzie MQL najmniejsze wartości odnotowano przy  $P = 60$  l/min. W tych warunkach tworzenia aerozolu stwierdzono najmniejsze zawirowania strugi oraz największy obszar zwilżania krawędzi skrawających wiertła (rys. 3.15b), jak również najmniejsze wartości kropli (tab. 3.16). Główną przyczyną większego zużycia wiertła jest również większa temperatura i tarcie w strefie styku ostrze–materiał obrabiany



spowodowane brakiem chłodzenia i smarowania. Należy zauważyć, że w wyższej temperaturze spoiwo kobaltowe w wiertle węglkowym ulega osłabieniu, co prowadzi do odkształcenia plastycznego [133]. Obserwacje z użyciem SEM połączonego z EDS przeprowadzone dla pięciu ostrzy skrawających po wykonaniu 3000 otworów w głowicy samochodowej stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) przedstawiono na rys. 5.51–5.55.



Rys. 5.51. Ostrze skrawające po wykonaniu 3000 otworów w stopie aluminium AlSi10Mg(Cu) przy chłodzeniu metodą MQL z  $P = 40$  l/min,  $E = 60$  ml/h i  $n = 7000$  obr./min: a) obrazy SEM powierzchni natarcia; b) jakościowa i ilościowa analiza składu chemicznego wierzchołka wiertła z mikroobszarów 1, 2, i 3; c) mapa rozkładu pierwiastków

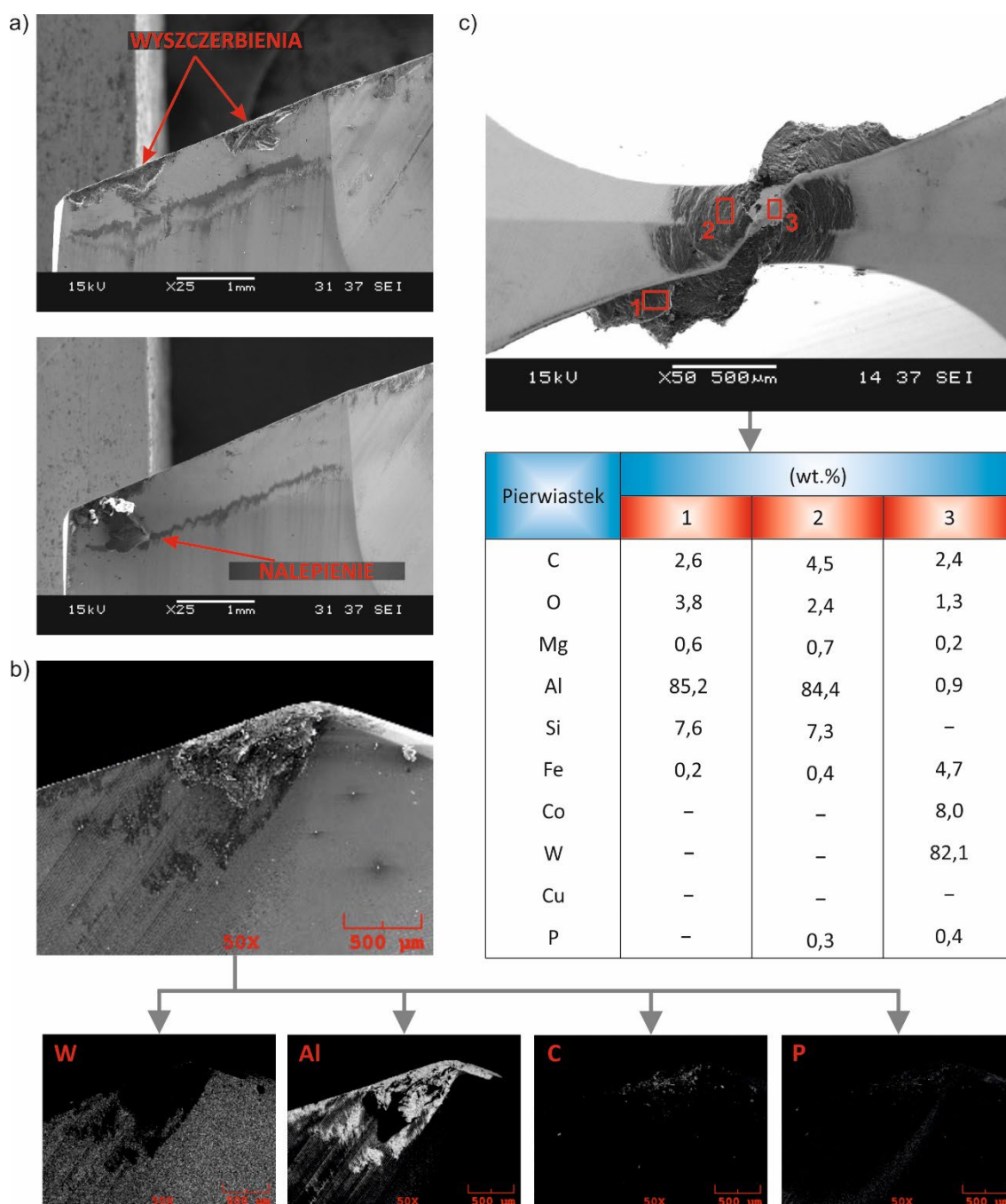


Rys. 5.52. Ostrze skrawające po wykonaniu 3000 otworów w stopie aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy chłodzeniu metodą MQL z  $P = 60$  l/min,  $E = 60$  ml/h i  $n = 7000$  obr./min: a) obrazy SEM powierzchni natarcia; b) jakościowa i ilościowa analiza składu chemicznego wierzchołka wiertła z mikroobszarów 1, 2, i 3; c) mapa rozkładu pierwiastków

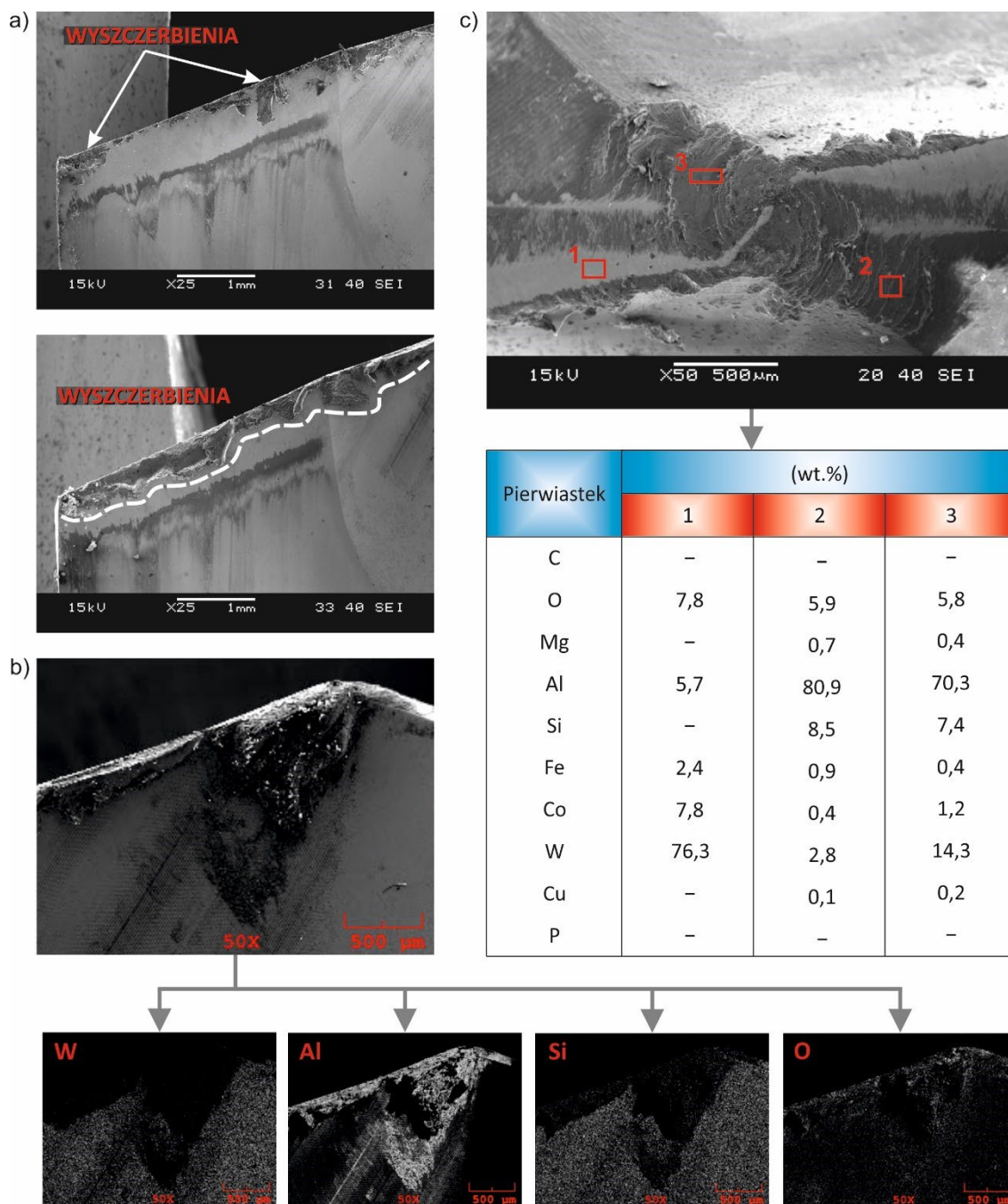
W trakcie analizy ostrza skrawającego po wykonaniu 3000 otworów w stopie aluminium w warunkach chłodzenia metodą MQL z natężeniem przepływu powietrza 40 l/min zaobserwowano na powierzchni natarcia zwiększony obszar, na którym występowały znaczne wyszczerbienia (rys. 5.51a). W mikroobszarach analizy składu chemicznego



stwierdzono występowanie pierwiastków fosfor i węgiel (rys. 5.51c), które są jednym ze składników wybranego płynu syntetycznego. Na powierzchni natarcia zaobserwowano (rys. 5.51b) intensywne występowanie aluminium, co świadczy o zwiększonej adhezji na narzędziu.



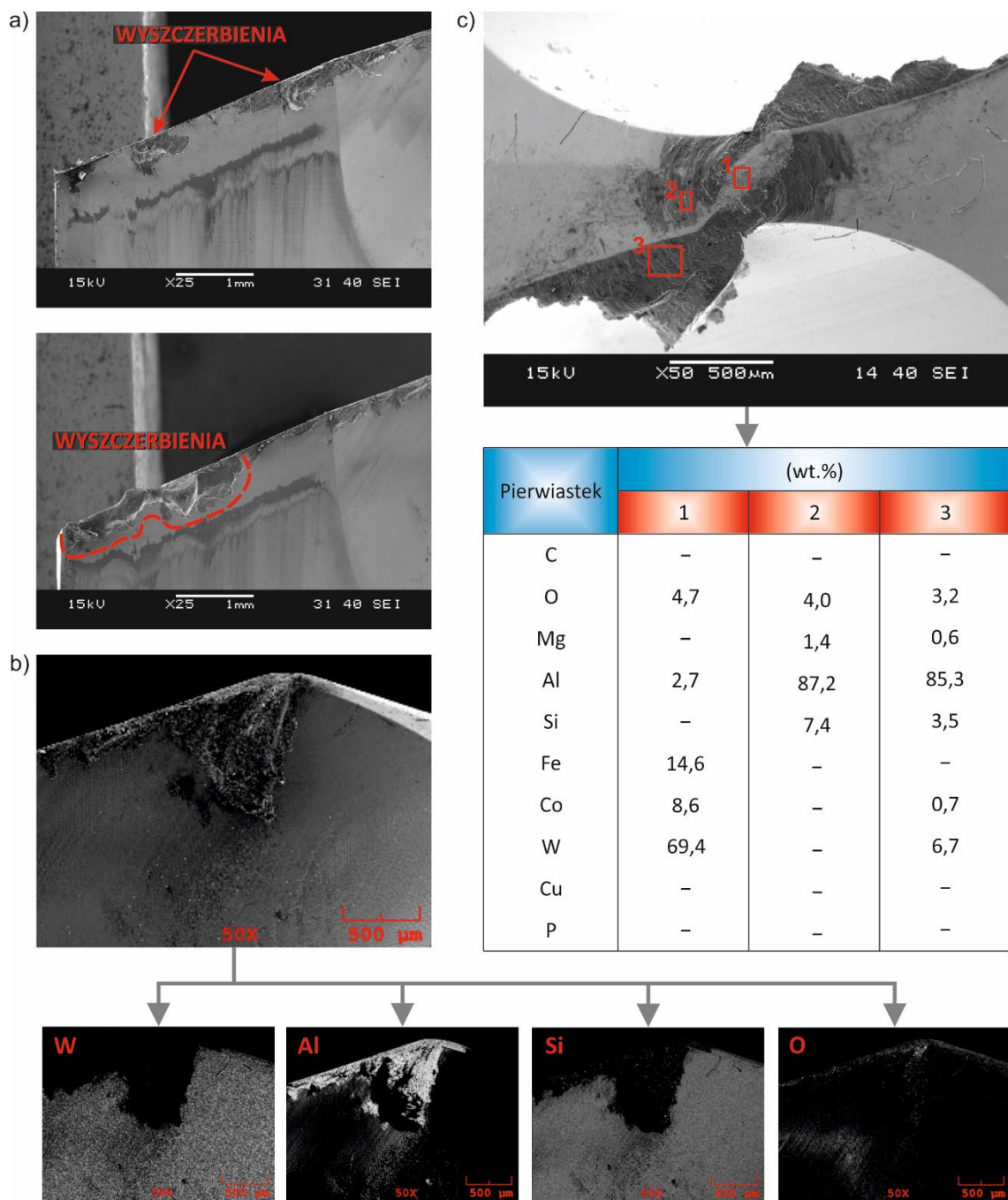
Rys. 5.53. Ostrze skrawające po wykonaniu 3000 otworów w stopie aluminium AlSi10Mg(Cu) przy chłodzeniu metodą MQL z  $P = 80$  l/min,  $E = 60$  ml/h i  $n = 7000$  obr./min: a) obrazy SEM powierzchni natarcia; b) jakościowa i ilościowa analiza składu chemicznego wierzchołka wiertła z mikroobszarów 1, 2, i 3; c) mapa rozkładu pierwiastków



Rys. 5.54. Ostrze skrawające po wykonaniu 3000 otworów w stopie aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy obróbce na sucho dla  $n = 7000$  obr./min: a) obrazy SEM powierzchni natarcia; b) jakościowa i ilościowa analiza składu chemicznego wierzchołka wiertła z mikroobszarów 1, 2, i 3; c) mapa rozkładu pierwiastków

Dla wiertła, które pracowało w warunkach chłodzenia metodą MQL z natężeniem przepływu powietrza 60 l/min nie stwierdzono żadnych wyszczerbień na powierzchni natarcia (rys. 5.52a). Brak uszkodzenia krawędzi skrawających jest spowodowane korzystniejszym rozchodzeniem się strugi aerozolu w strefie skrawania przy prędkości

obrotowej  $n = 7000$  obr./min (rys. 3.15b). Analizując narost, który tworzy się od strony wierzchołka wiertła (rys. 5.52c) stwierdzono najmniejsze jego występowanie w porównaniu do pozostałych wiertel. Zmniejszenie zarówno zużycia jak i występowania narostu jest wynikiem mniejszych kropel, które są dostarczane do strefy skrawania a tym samym powstawaniem warstewki tribofilmu, który powoduje zmniejszenie tarcia [45] w strefie styku ostrze skrawające–materiał obrabiany. W mikroobszarze 3 (rys. 5.52c) stwierdzono występowanie węgla w 16,2% i fosforu 0,8%, co jest największą wartością w porównaniu do występowania tych pierwiastków przy zastosowaniu metody zminimalizowanego smarowania w porównaniu do pozostałych przepływów natężenia powietrza ( $P = 40$  l/min – rys. 5.51c oraz  $P = 80$  l/min – rys. 5.53c). Wiertło pracujące przy chłodzeniu metodą zminimalizowanego smarowania z wydatkiem powietrza  $P = 80$  l/min (rys. 5.53) wykazało kilka wyszczerbień i nalepień na powierzchni natarcia. Jest to spowodowane większą turbulencją dostarczanych kropel do strefy skrawania w wyniku większego natężenia przepływu powietrza, a tym samym pogorszeniem warunków tworzenia tribofilmu na krawędziach skrawających. Przy obróbce na sucho (rys. 5.54c) zauważono największy obszar tworzącego się narostu oraz wyszczerbień na powierzchni natarcia (rys. 5.54a). W mikroobszarach 1–3 (rys. 5.54c) zaobserwowano też zwiększoną zawartość tlenu, co może świadczyć o zużyciu chemicznym i wytwarzaniu się tlenków w wyniku większych temperatur w strefie skrawania [115]. Zastosowanie sprężonego chłodzenia z wydatkiem 60 l/min (rys. 5.55) spowodowało zmniejszenie tworzenia się narostu na narzędziu (rys. 5.55c) w porównaniu do wiertła pracującego w warunkach obróbki na sucho jak również mniejszą liczbę wyszczerbień w pobliżu krawędzi skrawających.



Rys. 5.55. Ostrze skrawające po wykonaniu 3000 otworów w stopie aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$  przy chłodzeniu sprężonym powietrzem z  $P = 60 \text{ l/min}$  i  $n = 7000 \text{ obr./min}$ : a) obrazy SEM powierzchni natarcia; b) jakościowa i ilościowa analiza składu chemicznego wierzchołka wiertła z mikroobszarów 1, 2, i 3; c) mapa rozkładu pierwiastków

## 5.5. Wnioski z badań doświadczalnych

Badania doświadczalne przeprowadzone w przedsiębiorstwie Volkswagen Motor Polska S.A. z siedzibą w Polkowicach pozwoliły na określenie wpływu prędkości obrotowej narzędzia oraz parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania na wybrane wskaźniki skrawalności podczas wiercenia stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$ . W trakcie badań monitorowano drgania narzędzia, topografię powierzchni obrobionej, dokładność wykonania otworów oraz zużycie ostrza skrawającego. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Największy statystyczny wpływ dla wszystkich badanych kierunków wartości RMS przyspieszeń drgań ma prędkość obrotowa. Najmniejsze wartości drgań zaobserwowano podczas wiercenia z najmniejszą prędkością obrotową 6000 obr./min. Najmniejszą wartość wypadkową przyspieszeń drgań stwierdzono dla natężenia przepływu płynu syntetycznego  $E = 40$  ml/h. Metoda MQL z wydatkiem na poziomie 40 ml/h powoduje zmniejszenie rozpatrywanego parametru od 6,96% do 22,58% w porównaniu do chłodzenia sprężonym powietrzem oraz od 7,65% do 15,73% w porównaniu do obróbki na sucho w zależności od zastosowanej prędkości obrotowej narzędzia.

2. Zastosowanie zwiększonego przepływu płynu syntetycznego ( $E = 75$  ml/h) dla mniejszych prędkości obrotowych wiertła ( $\leq 7000$  obr./min) powoduje uzyskanie wartości wypadkowych przyspieszenia drgań porównywalnych do wygenerowanych podczas obróbki na sucho lub chłodzenia sprężonym powietrzem. Może to być spowodowane występowaniem zjawiska łączenia się kropeł podczas ich zderzeń, a tym samym formowaniem filmu olejowego na wewnętrznych ściankach kanalików, przez co płyn syntetyczny w mniejszym stopniu dociera do krawędzi skrawających wiertła.

3. W trakcie wykonania otworu stwierdzono zwiększoną chwilową amplitudę przyspieszeń drgań podczas obróbki na sucho i z zastosowaniem chłodzenia sprężonym powietrzem w porównaniu do efektów po wierceniu z zastosowaniem metody MQL. Wyjątek stanowił maksymalny wydatek płynu syntetycznego o wartości 75 ml/h. Zmniejszenie amplitudy przyspieszeń drgań przy zastosowaniu wydatku  $E = 15 - 45$  ml/h w metodzie zminimalizowanego smarowania wywołane jest zmniejszeniem nacisku na dno otworu w wyniku tworzenia się tribofilmu na ostrzu skrawającym a tym samym powoduje zmniejszenie sił skrawania powstałych podczas formowania otworu.

4. Analizując parametr amplitudowy  $S_q$  powierzchni obrobionej stwierdzono, że najmniejsze wartości uzyskano przy natężeniu przepływu powietrza od 60 l/min do

70 l/min i natężenia przepływu płynu syntetycznego około 45 ml/h dla prędkości obrotowej wiertła od 7000 obr./min. Tylko dla najmniejszej prędkości obrotowej ( $n = 6000$  obr./min) najmniejsze wartości średniej kwadratowej wysokości nierówności powierzchni zaobserwowano dla maksymalnej wartości wydatku  $P$ .

5. Największe wartości parametru  $Sz$  dla zmiennych warunków tworzenia się aerozolu zauważono od  $E \geq 45$  ml/h i większych wartości  $P \geq 65$  l/min dla prędkości obrotowych narzędzia nie przekraczających 7000 obr./min. Natomiast dla maksymalnej  $n$  najmniejsze wartości największej wysokości profilu chropowatości uzyskano dla  $P = 60$  l/min i  $E \geq 45$  ml/h.

6. Najwięcej wartości współczynnika asymetrii powierzchni  $Ssk$  w pobliżu wartości zero zauważono dla powierzchni obrobionej z prędkością obrotową 7000 obr./min oraz natężeniem przepływu płynu syntetycznego równego 40 ml/h, co świadczy o symetrycznym rozkładzie rzędnych. Największą asymetrią powierzchni ( $Ssk > 0,2$ ) charakteryzowała się powierzchnia wytworzona przy prędkości obrotowej 6000 obr./min oraz natężeniem przepływu powietrza  $P = 60$  l/min jak również dla maksymalnego i minimalnego natężenia przepływu płynu syntetycznego. Powierzchnia taka charakteryzuje się przewagą wysokich szczytów, co z punktu widzenia dalszej eksploatacji takiej powierzchni nie jest korzystne, ponieważ ostre wierzchołki zostaną zniszczone z powodu dekohezji. Natomiast powierzchnia, która charakteryzowała się przewagą dołów uzyskano również przy prędkości obrotowej narzędzia 6000 obr./min z natężeniem przepływu płynu syntetycznego 40 ml/h oraz natężeniem przepływu powietrza 40 l/min i 60 l/min.

7. Powierzchnię z rozkładem wierzchołków zbliżonych do rozkładu mezkurtycznego ( $Sku = 3$ ) zaobserwowano przy zastosowaniu prędkości obrotowej wiertła 7000 obr./min. Zastosowanie przepływu powietrza  $P = 40$  l/min dla  $n = 7000$  obr./min dla wszystkich zmiennych wartości  $E$  nie spowodowało przekroczenia wartości  $Sku$  powyżej 3,5. Największym leptokurtycznym rozkładem charakteryzowała się powierzchnia obrobiona w warunkach tworzenia aerozolu:  $P = 40$  l/min i  $E = 75$  ml/h dla  $n = 6000$  obr./min.

8. Największe wartości parametrów  $Sku$  i  $Ssk$  zaobserwowano przy chłodzeniu sprężonym powietrzem i obróbce na sucho z maksymalną prędkością obrotową.

9. Największe wartości parametrów objętościowych powierzchni obrobionej dla wszystkich prędkości obrotowych zaobserwowano przy obróbce na sucho. Zastosowanie metody MQL podczas obróbki stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) spowodował zmniejszenie w szczególności parametru  $V_{vv}$ , który jest odpowiedzialny za zatrzymanie brudów



i smarów w dołach. Powierzchnia obrobiona w warunkach obróbki na sucho charakteryzowała się również wysokimi szczytami oraz najbardziej nierównomiernym rozłożeniem dołów i szczytów. Topografia powierzchni obrobionej w warunkach chłodzenia sprężonym powietrzem charakteryzowała się natomiast występowaniem głębokich dołów.

10. Dokładność wykonania otworu nieprzekraczającą wartości 0,1 mm stwierdzono zarówno dla otworów wykonanych przy prędkości obrotowej wiertła 6000 obr./min jak również 7000 obr./min w warunkach zastosowania metody zminimalizowanego smarowania. Dla  $n = 6000$  obr./min dokładność wykonania wszystkich otworów mieści się w zakładanej tolerancji dla parametrów tworzenia aerozolu równego  $P = 60$  l/min oraz  $E = 25$  ml/h i 40 ml/h oraz dla  $n = 7000$  obr./min dla  $P = 60$  l/min i 80 l/min oraz  $E = 25$  ml/h i 40 ml/h. Wszystkie otwory wykonane zarówno przy obróbce na sucho jak i chłodzeniu sprężonym powietrzem przekraczały dopuszczalną tolerancję wykonania.

11. Najmniejsze zużycie powierzchni natarcia stwierdzono dla wiertła pracującego z prędkością obrotową 7000 obr./min oraz z natężeniem przepływu płynu syntetycznego 40 ml/h i natężeniem przepływu powietrza 60 l/min. Zastosowanie metody MQL z wyżej wymienionymi parametrami tworzenia aerozolu spowodowało zmniejszenie  $KB$  o około 44% w porównaniu do obróbki na sucho i około 26% w porównaniu do chłodzenia sprężonym powietrzem.

12. Analiza skaningowa SEM potwierdziła tworzenie się tribofilmu na powierzchniach wiertła, o czym świadczy zawartość fosforu i węgla jako składników płynu syntetycznego. Na wiertle pracującym w warunkach obróbki na sucho zauważono największe obszary z narostem oraz wyszczerbieniami na krawędziach skrawających. Na powierzchni natarcia wiertła skrawającego stop aluminium AlSi10Mg(Cu) nie stwierdzono żadnych obszarów z wyszczerbieniami, co potwierdza najlepsze warunki do smarowania krawędzi skrawających wiertła przy zastosowaniu natężenia przepływu powietrza 60 l/min.



## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzenie różnorodnych badań symulacyjnych i eksperymentalnych w szerokim spektrum pozwoliło na identyfikację korelacji między parametrami wejściowymi w procesie tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania (MQL) oraz prędkości obrotowej narzędzia podczas wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu). Zauważono istotny wpływ modyfikacji parametrów generowania medium czynnego, które podawane było do strefy skrawania na właściwości tworzącego się aerozolu, a także znaczenie zmiany prędkości obrotowej narzędzia ze względu na wybrane wskaźniki skrawalności. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów wypracowano wnioski o charakterze poznawczym, praktycznym i dotyczącym dalszych potencjalnych badań w tym obszarze.

### 6.1. Wnioski poznawcze

W badaniach podjęto próbę analizy fundamentalnych zjawisk i procesów zachodzących w obszarze skrawania podczas wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu), wykorzystując zarówno metodę zminimalizowanego smarowania, chłodzenie sprężonym powietrzem, obróbkę na sucho, jak i rozpatrując zjawiska związane z przepływem medium czynnego przez wewnętrzne kanały narzędzia zastosowane w metodzie MQL. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pozwoliły na sformułowanie poniższych wniosków poznawczych:

1. Analiza wyników badań symulacyjnych umożliwiła wizualizację dwufazowego przepływu płynu syntetycznego w układzie odśrodkowym, gdzie aerozol jest dostarczany do obszaru skrawania przy wykorzystaniu wewnętrznych kanałów wiertła. To istotne osiągnięcie z punktu widzenia poznawczego, które otwiera nowe perspektywy dla dalszych badań nad optymalizacją parametrów generowania medium czynnego w postaci aerozolu w tego rodzaju skomplikowanych przepływach wielofazowych.
2. Modyfikacja zmiennych parametrów tworzenia aktywnego medium w zależności od prędkości obrotowej wiertła spowodowały zmiany wybranych wskaźników skrawalności.

3. Badania symulacyjne ujawniły ważność ich przeprowadzenia ze względu na turbulencję kropeł zachodzących w strudze aerozolu podawanych przez wewnętrzne kanały narzędzia jak również rozkładu linii prądowych strugi i ich prędkości rozchodzenia przy krawędziach skrawających. Wpływ na dostarczanie aerozolu do strefy styku ostrze skrawające–materiał obrabiany ma zarówno pochylenie kanałów wewnętrznych przy wylocie wiertła jak również natężenie przepływu powietrza i natężenie przepływu płynu syntetycznego. Zaobserwowano, że najkorzystniejsze warunki podawania medium czynnego ze względu na obszar zwilżalności krawędzi skrawających oraz uzyskanie mniejszych średnic kropeł stwierdzono dla wiertła bez pochylenia kanałów wiertła oraz natężenia przepływu płynu syntetycznego 40 ml/h, natężenia przepływu powietrza 60 l/min oraz prędkości wiertła 7000 obr./min, co świadczy o najmniejszych zawirowaniach i turbulencjach zachodzących się w strudze aerozolu.
4. Znaczenie średnic kropeł w strudze aerozolu oraz rozchodzenia się linii prądowych strugi w strefie skrawania zostały potwierdzone w większości badań doświadczalnych, gdzie wartości zmiennych parametrów tworzenia aerozolu w metodzie MQL jak również prędkość obrotowa wiertła mają wpływ na drgania narzędzia, topografię powierzchni obrobionej, dokładności wykonania otworów oraz zużycie narzędzia.
5. Analiza drgań narzędzia zarówno ze względu na wartości średniokwadratowe RMS przyspieszenia drgań jak również wypadkowych przyspieszeń drgań w trzech rozpatrywanych kierunkach wykazała znaczenie zmiany prędkości obrotowej wiertła i natężenia przepływu płynu syntetycznego. Chwilowa amplituda drgań potwierdziła, że zastosowanie metody MQL powoduje zmniejszenie drgań narzędzia, co przyczynia się do zmniejszenia obciążeń podczas wyjścia wiertła z materiału obrabianego w wyniku ich prawidłowego smarowania. Podczas wiercenia na sucho i z zastosowaniem sprężonego powietrza chwilowe amplitudy przyspieszeń drgań były w tym etapie pracy narzędzia nawet około 3,5 razy większe od amplitud zarejestrowanych podczas etapu wiercenia w warunkach zastosowania metody MQL.
6. Analiza topografii powierzchni obrobionej i dokładności wykonania otworów potwierdziła znaczenie doboru parametrów tworzenia aerozolu i prędkości obrotowej wiertła. Zastosowanie metody zminimalizowanego smarowania pozwala

na zwiększenie prędkości obrotowej wiertła do 7000 obr./min ze względu na nieprzekroczenie dopuszczalnej tolerancji otworu wyznaczonej na 0,1 mm. W celu uzyskania jak najbardziej równomiernego rozłożenia szczytów i dołów a tym samym jak najmniejszej wielkości parametrów objętościowych topografii powierzchni, które mają bardzo duże znaczenie ze względu na właściwości tribologiczne, zaleca się obróbkę z prędkością obrotową do 7000 obr./min oraz wartościami natężenia przepływu płynu syntetycznego od 25 ml/h do 40 ml/h i natężenia przepływu powietrza równego 60 l/min.

7. Analiza zużycia ostrza wiertła po badaniach doświadczalnych wiercenia miękkiego stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) umożliwiła wykazanie pozytywnego wpływu zastosowania metody MQL. Zwrócono również uwagę na wpływ natężenia przepływu powietrza, gdzie dla wartości  $P = 60$  l/min zauważono brak jakichkolwiek wyszczerbień w pobliżu krawędzi skrawających narzędzia oraz najmniejszą wartość szerokości żłobka, co udowadnia, że w tych warunkach uzyskano najbardziej korzystne zwilżanie i smarowanie narzędzia przez strugę aerozolu.

## 6.2. Wnioski uytylitarne

W nawiązaniu do aspektów uytylitarnych niniejszej rozprawy doktorskiej dotyczącej skutecznego zastosowania metody zminimalizowanego smarowania przy zmianie warunków tworzenia aerozolu podczas wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) sformułowano następujące wnioski:

1. Najkorzystniejszą zwilżalność krawędzi skrawających oraz najmniejsze zawirowania strugi aerozolu podczas zastosowania metody zminimalizowanego smarowania stwierdzono w trakcie badań symulacyjnych dla wiertła bez pochylenia kanałów doprowadzających medium czynne oraz prędkości obrotowej wiertła 7000 obr./min i natężenia przepływu powietrza 60 l/min.
2. Najmniejsze średnice kropeł w aerozolu uzyskano dla natężenia przepływu płynu syntetycznego w przedziale od 25 ml/h do 40 ml/h i pracującego z prędkościami obrotowymi wiertła do 7000 obr./min. W celu uzyskania mniejszych średnic kropeł, które lepiej penetrują strefę skrawania zaleca się stosowanie natężenia przepływów powietrza o wartości około 60 l/min.

3. Przy obróbce stopu aluminium AlSi10Mg(Cu) zaleca się wykorzystywać metodę zminimalizowanego smarowania, podczas zastosowania której zaobserwowano zmniejszenie zużycia i drgań narzędzia, lepszą jakość powierzchni, zwiększoną dokładność wykonania otworów w porównaniu do obróbki na sucho i chłodzenia sprężonym powietrzem. Stosując wiertło pełnowęglkowe nie należy przekraczać prędkości obrotowej 7000 obr./min, ponieważ nawet przy zastosowaniu metody MQL wszystkie otwory wykonywane powyżej tej prędkości obrotowej narzędzia przekraczały dopuszczalną odchyłkę wymiarową 0,1 mm. Praca z prędkością obrotową narzędzia powyżej 7000 obr./min charakteryzowała się również zwiększoną wartością średniokwadratową wypadkowych przyspieszeń drgań.
4. Ze względu na topografię powierzchni obrobionej zaleca się stosowanie wartości parametrów tworzenia aerozolu:  $P = 60$  l/min oraz  $E = 40$  ml/h. Dla tych warunków podawania medium czynnego stwierdzono powierzchnię charakteryzującą się najbardziej równomiernym rozłożeniem wierzchołków i dołów, rozkładem najbardziej zbliżonym do mezokurtycznego oraz najmniejszą wartością parametrów objętościowych oraz wybranych parametrów wysokościowych  $Sq$  i  $Sz$ . Zaleca się również stosowanie prędkości obrotowej większej lub równej wartości 7000 obr./min.
5. Najmniejsze zużycie ostrza ze względu na szerokość żłobka oraz brak wyszczerbień krawędzi skrawających zauważono w warunkach zastosowania metody MQL z natężeniem przepływu powietrza 60 l/min.

***Wyniki przeprowadzonych badań oraz wnioski zawarte w poprzednich rozdziałach potwierdzają postawioną w pracy hipotezę.***

### **6.3. Wnioski do dalszych badań**

Po przeanalizowaniu rezultatów badawczych i zakresu prac zawartych w niniejszej rozprawie doktorskiej, wyciągnięto wnioski dotyczące perspektyw dalszych badań:

1. Wykonanie badań doświadczalnych dotyczących rozkładu temperatur na krawędziach skrawających wiertła przy użyciu pirometru ogólnego przeznaczenia, których wyniki pozwolą na szerszą analizę zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących w strefie skrawania.

2. Ustalenie efektywnej oceny wykorzystania metody MQL poprzez pomiary poboru mocy w zależności od zmian parametrów tworzenia aerozolu i zmiany parametrów skrawania.
3. Zastosowanie olejów biodegradowalnych jako cieczy chłodząco-smarującej w metodzie MQL, które mają pozytywny wpływ na środowisko.







## LITERATURA

- [1] F. Pusavec, D. Kraman, J. Kopac, Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies, *Journal of Cleaner Production*. 18 (2010) 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108631>.
- [2] K.H. Park, J. Olortegui-Yume, M.C. Yoon, P. Kwon, A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 50 (2010) 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.05.001>.
- [3] K. Jemielniak, Obróbka na sucho i z minimalnym smarowaniem, w: *Innowacyjne technologie w budowie maszyn*, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.644>.
- [4] M. Al Bashir, M. Mia, N.R. Dhar, Investigations on Surface Milling of Hardened AISI 4140 Steel with Pulse Jet MQL Applicator, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 99 (2018) 301–314. <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0277-2>.
- [5] R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, S. Wojciechowski, B. Powalka, S. Klos, N. Szczotkarz, M. Matuszak, N. Khanna, Evaluation of turning with different cooling-lubricating techniques in terms of surface integrity and tribologic properties, *Tribology International*. 148 (2020) 106334. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106334>.
- [6] K. Jemielniak, Obróbka skrawaniem. Podstawy, dynamika, diagnostyka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117847>.
- [7] K. Venkatesan, A.T. Mathew, S. Devendiran, N.M. Ghazaly, S. Sanjith, R. Raghul, Machinability study and multi-response optimization of cutting force, Surface roughness and tool wear on CNC turned Inconel 617 superalloy using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids in Coconut oil, *Procedia Manufacturing*. 30 (2019) 396–403. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.055>.
- [8] C. Cai, H. Geng, Z. Zhang, Temperature-dependent cyclic response and microstructure of AlSi10Mg(Cu) alloy, *Materials Characterization*. 141 (2018) 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.04.042>.
- [9] P. Huter, P. Renhart, S. Oberfrank, M. Schwab, F. Grün, B. Stauder, High- ad low-

- cycle fatigue influence of silicon, copper, strontium and iron on hypo-eutectic Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys used in cylinder heads, *International Journal of Fatigue*. 82 (2016) 588–601. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.015>.
- [10] M. Javidani, D. Larouche, Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components, *International Materials Reviews*. 59 (2014) 132–158. <https://doi.org/10.1179/1743280413Y.00000000027>.
- [11] J. Świerczyński, Wpływ zastosowania schłodzonego strumienia powietrza jako dodatkowego czynnika chłodzącego na jakość powierzchni uzyskanej po procesie szlifowania, *Mechanik*. 9 (2014) 319–322.
- [12] R. Sankaranarayanan, N. Rajesh Jesudoss Hynes, J. Senthil Kumar, G.M. Krolczyk, A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges, *Journal of Manufacturing Processes*. 67 (2021) 286–313. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.002>.
- [13] M. Sarikaya, M.K. Gupta, I. Tomaz, M. Danish, M. Mia, S. Rubaiee, M. Jamil, D.Y. Pimenov, N. Khanna, Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of light-weight alloys: A state-of-the-art review, *Journal of Manufacturing Processes*. 62 (2021) 179–201. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.013>.
- [14] T. Paulsen, O. Pecat, E. Brinksmeier, Influence of Different Machining Conditions on the Subsurface Properties of Drilled TiAl6V4, *Procedia CIRP*. 46 (2016) 472–475. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.047>.
- [15] M. Mosleh, M. Ghaderi, K.A. Shirvani, J. Belk, D.J. Grzina, Performance of cutting nanofluids in tribological testing and conventional drilling, *Journal of Manufacturing Processes*. 25 (2017) 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.001>.
- [16] C.M. Taylor, S.G.A. Hernandez, M. Marshall, M. Broderick, Cutting fluid application for titanium alloys Ti-6Al-4V and Ti-10V-2Fe-3Al in a finish turning process, *Procedia CIRP*. 77 (2018) 441–444. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.279>.
- [17] P.J. Liew, A. Shaaroni, N.A.C. Sidik, J. Yan, An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 114 (2017) 380–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.077>.
- [18] C.Y. Chan, W.B. Lee, H. Wang, Enhancement of surface finish using water-miscible

- nano-cutting fluid in ultra-precision turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 73 (2013) 62–70.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.06.006>.
- [19] B.S. Kumar, G. Padmanabhan, P.V. Krishna, Multi response optimization for turning AISI 1040 steel with extreme pressure additive included vegetable oil based cutting fluids using grey relational analysis, *Journal of Advanced Research in Materials Science*. 23 (2016) 1–14.
- [20] S. Anton, S. Andreas, B. Friedrich, Heat dissipation in turning operations by means of internal cooling, *Procedia Engineering*. 100 (2015) 1116–1123.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.474>.
- [21] M. Broderick, S. Turner, K. Ridgway, Correlation between tool life and cutting force coefficient as the basis for a novel method in accelerated MWF performance assessment, *Procedia CIRP*. 101 (2021) 366–369.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.153>.
- [22] H. Słupik, *Obróbka skrawaniem. Podstawy teoretyczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
- [23] S. Basten, B. Kirsch, W. Ankener, M. Smaga, T. Beck, J. Uebel, J. Seewig, J.C. Aurich, Influence of different cooling strategies during hard turning of AISI 52100 - Part I: Thermo-mechanical load, tool wear, surface topography and manufacturing accuracy, *Procedia CIRP*. 87 (2020) 77–82.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.085>.
- [24] R. Deepak Joel Johnson, K.L.D. Wins, A. Raj, B.A. Beatrice, Optimization of cutting parameters and fluid application parameters during turning of OHNS steel, *Procedia Engineering*. 97 (2014) 172–177.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.239>.
- [25] R.W. Maruda, *Wybrane aspekty procesu skrawania i kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej po toczeniu wykończeniowym w warunkach chłodzenia MQCL*, Oficyna Wy, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2017.
- [26] R. Singh, V. Bajpai, *Coolant and Lubrication in Machining*, w: A. Nee (Red.), *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer, London, 2014: ss. 981–1018. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4>.
- [27] E. Brinksmeier, D. Meyer, A.G. Huesmann-Cordes, C. Herrmann, Metalworking fluids - Mechanisms and performance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.

- 64 (2015) 605–628. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.003>.
- [28] M. Osama, A. Singh, R. Walvekar, M. Khalid, T.C.S.M. Gupta, W.W. Yin, Recent developments and performance review of metal working fluids, *Tribology International*. 114 (2017) 389–401. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.050>.
- [29] B. Seidel, C. Heinzl, D. Meyer, P. Geilert, B. Karpuschewski, Sustainable machining by energy- and resource-efficient application of metalworking fluids, *Procedia Manufacturing*. 43 (2020) 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.129>.
- [30] A. Cambiella, J.M. Benito, C. Pazos, J. Coca, A. Hernández, J.E. Fernández, Formulation of emulsifiable cutting fluids and extreme pressure behaviour, *Journal of Materials Processing Technology*. 184 (2007) 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.014>.
- [31] A. Rabenstein, T. Koch, M. Remesch, E. Brinksmeier, J. Kuever, Microbial degradation of water miscible metal working fluids, *International Biodeterioration and Biodegradation*. 63 (2009) 1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.07.005>.
- [32] Y. Yang, S. Guo, L. Si, T. Liu, Y. Dai, C. Yan, C. Zhang, Investigation of a new water-based cutting fluid for machining of titanium alloys, *Journal of Manufacturing Processes*. 71 (2021) 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.046>.
- [33] B. Seidel, D. Meyer, Influence of artificial aging on the lubricating ability of water miscible metalworking fluids, *Production Engineering*. 13 (2019) 425–435. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00891-6>.
- [34] J.R. Anglin, *Metalworking Lubricants*, w: Q.J. Wang, Y. Chung (Red.), *Encyclopedia of Tribology*, Springer, Boston, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5>.
- [35] C.P. Khunt, M.A. Makhesana, K.M. Patel, B.K. Mawandiya, Performance assessment of vegetable oil-based minimum quantity lubrication (MQL) in drilling, *Materials Today: Proceedings*. 44 (2021) 341–345. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.741>.
- [36] B.K. Mawandiya, H.V. Patel, M.A. Makhesana, K.M. Patel, Machinability investigation of AISI 4340 steel with biodegradable oil-based MQL system, *Materials Today: Proceedings*. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.199>.
- [37] W. Grzesik, *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.

- [38] T. Mang, W. Dresel, *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*, second ed. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co, Weinheim, Germany, 2007.
- [39] R. Heinemann, S. Hinduja, G. Barrow, G. Petuelli, Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 46 (2006) 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.003>.
- [40] W. Xuedong, W. Dapu, Y. Shengrong, X. Qunji, Tribochemical investigation of tungsten carbide/titanium alloy tribo-couples under aqueous lubrication, *Wear*. 237 (2000) 28–32. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00288-4).
- [41] J.C.J. Bart, E. Gucciardi, S. Cavallaro, Formulating lubricating oils, *Biolubricants*. (2013) 351–395. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.351>.
- [42] R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, E. Feldshtein, P. Nieslony, B. Tyliczszak, F. Pusavec, Tool wear characterizations in finish turning of AISI 1045 carbon steel for MQCL conditions, *Wear*. 372–373 (2017) 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.006>.
- [43] R.W. Maruda, E.E. Feldshtein, S. Legutko, G.M. Królczyk, Improving the efficiency of running-in for a bronze–stainless steel friction pair, *Journal of Friction and Wear*. 36 (2015) 548–553. <https://doi.org/10.3103/S1068366615060082>.
- [44] B. Vengudusamy, A. Grafl, F. Novotny-Farkas, T. Schimmel, K. Adam, Tribological behaviour of antiwear additives used in hydraulic applications: Synergistic or antagonistic with other surface-active additives?, *Tribology International*. 67 (2013) 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.07.016>.
- [45] R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, E. Feldshtein, F. Pusavec, M. Szydlowski, S. Legutko, A. Sobczak-Kupiec, A study on droplets sizes, their distribution and heat exchange for minimum quantity cooling lubrication (MQCL), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 100 (2016) 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.008>.
- [46] Y. Zheng, A. Amiri, A.A. Polycarpou, Enhancements in the tribological performance of environmentally friendly water-based drilling fluids using additives, *Applied Surface Science*. 527 (2020) 146822. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146822>.
- [47] K. Adameczuk, G. Królczyk, S. Wojciechowski, K. Łozicki, The influence of cooling method on cutting power during turning of 316L austenitic steel, *Mechanik*. (2016) 1184–1185. <https://doi.org/10.17814/mechanik.2016.8-9.309>.
- [48] R.W. Maruda, S. Legutko, G.M. Krolczyk, S. Hloch, M. Michalski, An influence of

- active additives on the formation of selected indicators of the condition of the X10CrNi18-8 stainless steel surface layer in MQCL conditions, *International Journal of Surface Science and Engineering*. 9 (2015) 452–465. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2015.072069>.
- [49] R.W. Maruda, S. Legutko, J.B. Krolczyk, S. Wojciechowski, W. Kot, The influence of the application of EP additive in the minimum quantity cooling lubrication method on the tool wear and surface roughness in the process of turning 316L steel, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (2019) 254–263. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99353-9\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99353-9_28).
- [50] R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, P. Nieslony, S. Wojciechowski, M. Michalski, S. Legutko, The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism, *Journal of Manufacturing Processes*. 24 (2016) 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.08.006>.
- [51] D. Biermann, F. Bleicher, U. Heisel, F. Klocke, H.C. Möhring, A. Shih, Deep hole drilling, *CIRP Annals*. 67 (2018) 673–694. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.007>.
- [52] S. Basten, B. Kirsch, H. Hasse, J.C. Aurich, Formulation of sub-zero metalworking fluids for cutting processes: Influence of additives, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 31 (2020) 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.006>.
- [53] J.C.J. Bart, E. Gucciardi, S. Cavallaro, Lubricants: properties and characteristics, *Biolubricants*. (2013) 24–73. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.24>.
- [54] R.W. Maruda, S. Wojciechowski, G.M. Krolczyk, D.Y. Pimenov, S. Legutko, The influence of EP/AW addition in the MQL method on the parameters of surface geometrical structure in the process of turning 316L steel, Springer International Publishing, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99353-9\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99353-9_37).
- [55] R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, P. Nieslony, J.B. Krolczyk, S. Legutko, Chip formation zone analysis during the turning of austenitic stainless steel 316L under MQCL cooling condition, *Procedia Engineering*. 149 (2016) 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.670>.
- [56] J. Yan, X. Zeng, E. Van Der Heide, T. Ren, The tribological performance and tribochemical analysis of novel borate esters as lubricant additives in rapeseed oil, *Tribology International*. 71 (2014) 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.10.009>.

- [57] R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, S. Wojciechowski, K. Zak, W. Habrat, P. Nieslony, Effects of extreme pressure and anti-wear additives on surface topography and tool wear during MQCL turning of AISI 1045 steel, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 32 (2018) 1585–1591. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0313-7>.
- [58] R.W. Maruda, S. Wojciechowski, N. Szczotkarz, S. Legutko, M. Mia, M.K. Gupta, P. Nieslony, G.M. Krolczyk, Metrological analysis of surface quality aspects in minimum quantity cooling lubrication, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 171 (2021) 108847. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108847>.
- [59] Y. Su, L. Gong, B. Li, Z. Liu, D. Chen, Performance evaluation of nanofluid MQL with vegetable-based oil and ester oil as base fluids in turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 83 (2016) 2083–2089. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7730-x>.
- [60] Y. Zhang, C. Li, D. Jia, B. Li, Y. Wang, M. Yang, Y. Hou, X. Zhang, Experimental study on the effect of nanoparticle concentration on the lubricating property of nanofluids for MQL grinding of Ni-based alloy, *Journal of Materials Processing Technology*. 232 (2016) 100–115. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.031>.
- [61] H. Hegab, B. Darras, H.A. Kishawy, Sustainability Assessment of Machining with Nano-Cutting Fluids, *Procedia Manufacturing*. 26 (2018) 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.033>.
- [62] U. Sridharan, S. Malkin, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) with nanofluids on grinding behavior and thermal distortion, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*. 37 (2009) 629–636.
- [63] Y. Wang, C. Li, Y. Zhang, B. Li, M. Yang, X. Zhang, S. Guo, G. Liu, Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with different nanofluids, *Tribology International*. 99 (2016) 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.023>.
- [64] M.P. Suarez, A. Marques, D. Boing, F.L. Amorim, Á.R. Machado, MoS<sub>2</sub> solid lubricant application in turning of AISI D6 hardened steel with PCBN tools, *Journal of Manufacturing Processes*. 47 (2019) 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.001>.
- [65] J.S. Nam, P.H. Lee, S.W. Lee, Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 51 (2011) 649–652.



<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.04.005>.

- [66] J. Nam, J.W. Kim, J.S. Kim, J. Lee, S.W. Lee, Parametric analysis and optimization of nanofluid minimum quantity lubrication micro-drilling process for titanium alloy (Ti-6Al-4V) using response surface methodology and desirability function, *Procedia Manufacturing*. 26 (2018) 403–414. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.048>.
- [67] M. Naresh Babu, V. Anandan, N. Muthukrishnan, A.A. Arivalagar, M. Dinesh Babu, Evaluation of graphene based nano fluids with minimum quantity lubrication in turning of AISI D3 steel, *SN Applied Sciences*. 1 (2019) 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1182-0>.
- [68] Ş. Şirin, T. Kıvak, Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy, *Tribology International*. 137 (2019) 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.04.042>.
- [69] H. Singh, V.S. Sharma, S. Singh, M. Dogra, Nanofluids assisted environmental friendly lubricating strategies for the surface grinding of titanium alloy: Ti6Al4V-ELI, *Journal of Manufacturing Processes*. 39 (2019) 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.004>.
- [70] O. Gutnichenko, V. Bushlya, S. Bihagen, J.E. Ståhl, Influence of GnP additive to vegetable oil on machining performance when MQL-assisted turning Alloy 718, *Procedia Manufacturing*. 25 (2018) 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.091>.
- [71] A.K. Sharma, A.K. Tiwari, R.K. Singh, A.R. Dixit, Tribological Investigation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL), *Materials Today: Proceedings*. 3 (2016) 2155–2162. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.121>.
- [72] M. Ukamanal, P. Chandra Mishra, A. Kumar Sahoo, Temperature distribution during AISI 316 steel turning under TiO<sub>2</sub>-water based nanofluid spray environments, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 20741–20749. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.459>.
- [73] A.K. Sharma, R.K. Singh, A.R. Dixit, A.K. Tiwari, Characterization and experimental investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL), *Materials Today: Proceedings*. 3 (2016) 1899–1906. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.090>.
- [74] D. Setti, M.K. Sinha, S. Ghosh, P. Venkateswara Rao, Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the

- influence of nanofluids, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 88 (2015) 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.005>.
- [75] Chetan, B.C. Behera, S. Ghosh, P. V. Rao, Application of nanofluids during minimum quantity lubrication: A case study in turning process, *Tribology International*. 101 (2016) 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.04.019>.
- [76] K.A. Sharma, A.K. Tiwari, A.R. Dixit, Mechanism of Nanoparticles functioning and Effects in Machining Processes: A review, *Materials Today: Proceedings*. 2 (2015) 3539–3544. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.331>.
- [77] D. Setti, S. Ghosh, V.R. Paruchuri, Influence of nanofluid application on wheel wear, coefficient of friction and redeposition phenomenon in surface grinding of Ti-6Al-4V, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 232 (2018) 128–140. <https://doi.org/10.1177/0954405416636039>.
- [78] P. Kalita, A.P. Malshe, K.P. Rajurkar, Study of tribo-chemical lubricant film formation during application of nanolubricants in minimum quantity lubrication (MQL) grinding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 61 (2012) 327–330. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.031>.
- [79] K. Khanafer, A. Eltaggaz, I. Deiab, H. Agarwal, A. Abdul-latif, Toward sustainable micro-drilling of Inconel 718 superalloy using MQL-Nanofluid, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 107 (2020) 3459–3469. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05112-4>.
- [80] J. Nam, S.W. Lee, Machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V) in environmentally-friendly micro-drilling process with nanofluid minimum quantity lubrication using nanodiamond particles, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*. 5 (2018) 29–35. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0003-z>.
- [81] R. Rosnan, M.N. Murad, A.I. Azmi, I. Shyha, Effects of minimal quantity lubricants reinforced with nano-particles on the performance of carbide drills for drilling nickel-titanium alloys, *Tribology International*. 136 (2019) 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.029>.
- [82] A. Pal, S.S. Chatha, H.S. Sidhu, Performance evaluation of the minimum quantity lubrication with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- mixed vegetable-oil-based cutting fluid in drilling of AISI 321 stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*. 66 (2021) 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.024>.

- [83] H. Salimi-Yasar, S. Zeinali Heris, M. Shanbedi, A. Amiri, A. Kameli, Experimental investigation of thermal properties of cutting fluid using soluble oil-based TiO<sub>2</sub> nanofluid, *Powder Technology*. 310 (2017) 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.078>.
- [84] F. Hipler, R.A. Fischer, S. Gil Girol, C. Wöll, Chemie gegen Reibung und Verschleiß: Untersuchung molekularer Wirkungsmechanismen von Schmierstoffadditiven, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 31 (2000) 872–877. [https://doi.org/10.1002/1521-4052\(200009\)31:9<872::aid-mawe872>3.3.co;2-o](https://doi.org/10.1002/1521-4052(200009)31:9<872::aid-mawe872>3.3.co;2-o).
- [85] E. Brinksmeier, A. Walter, Generation of reaction layers on machined surfaces, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 49 (2000) 435–438. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62983-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62983-7).
- [86] J.R. Dąbrowski, A. Firkowski, M. Girzyńska-Dolna, *Ciecze obróbkowe do skrawania metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1988. <https://doi.org/10.1074/jbc.AW119.008141>.
- [87] K. Jemielniak, *Obróbka skrawaniem. Podstawy, dynamika, diagnostyka*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2018.
- [88] K. Jemielniak, *Obróbka skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
- [89] W. Grzesik, *Podstawy skrawania materiałów metalowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-60984-5.00062-7>.
- [90] W. Grzesik, *Podstawy Skrawania Materialow Konstrukcyjnych*, w: Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, 2010. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1578-0>.
- [91] W. El-Bouri, I. Deiab, K. Khanafer, E. Wahba, Numerical and experimental analysis of turbulent flow and heat transfer of minimum quantity lubrication in a turning process using discrete phase model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 104 (2019) 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.02.012>.
- [92] T. Obikawa, Y. Asano, Y. Kamata, Computer fluid dynamics analysis for efficient spraying of oil mist in finish-turning of Inconel 718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49 (2009) 971–978. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.002>.
- [93] N. Beer, E. Özkaya, D. Biermann, New production technologies in aerospace

- industry - 5th machining innovations conference (MIC 2014) drilling of inconel 718 with geometry-modified twist drills, *Procedia CIRP*. 24 (2014) 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.124>.
- [94] E. Oezkaya, N. Beer, D. Biermann, Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 108 (2016) 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.06.003>.
- [95] K. Park, J. Olortegui-Yume, M.-C. Yoon, P. Kwon, A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 50 (2010) 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.05.001>.
- [96] E.A. Rahim, H. Dorairaju, Evaluation of mist flow characteristic and performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 123 (2018) 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.015>.
- [97] Y. Iskandar, A. Tendolkar, M.H. Attia, P. Hendrick, A. Damir, C. Diakodimitris, Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 63 (2014) 77–80. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.078>.
- [98] A. Damir, B. Shi, M.H. Attia, Flow characteristics of optimized hybrid cryogenic-minimum quantity lubrication cooling in machining of aerospace materials, *CIRP Annals*. 68 (2019) 77–80. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.047>.
- [99] P.A. Jadhav, R. Deivanathan, Numerical analysis of the effect of air pressure and oil flow rate on droplet size and tool temperature in MQL machining, *Materials Today: Proceedings*. 38 (2020) 2499–2505. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.518>.
- [100] R.P. Zeilmann, W.L. Weingaertner, Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant, *Journal of Materials Processing Technology*. 179 (2006) 124–127. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.077>.
- [101] F. Berzosa, B. De Agustina, E.M. Rubio, Tool Selection in Drilling of Magnesium UNSM11917 Pieces under Dry and MQL Conditions Based on Surface Roughness, *Procedia Engineering*. 184 (2017) 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.076>.
- [102] S. Amini, I. Alinaghian, M. Lotfi, R. Teimouri, M. Alinaghian, Modified drilling process of AISI 1045 steel: A hybrid optimization, *Engineering Science and*

- Technology, an International Journal. 20 (2017) 1653–1661. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.11.005>.
- [103] R. Teimouri, S. Amini, M. Lotfi, M. Alinaghian, Sustainable drilling process of 1045 steel plates regarding minimum energy consumption and desired work quality, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2 (2019) 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.04.011>.
- [104] S. Nandgaonkar, T.V.K. Gupta, S. Joshi, Effect of Water Oil Mist Spray (WOMS) Cooling on Drilling of Ti6Al4V Alloy Using Ester Oil Based Cutting Fluid, *Procedia Manufacturing*. 6 (2016) 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.010>.
- [105] M. Girinon, H. Karaouni, U. Masciantonio, F. Lefebvre, E. Jourden, F. Valiorgue, J. Rech, E. Feulvarch, Risks related to the lack of lubrication on surface integrity in drilling, *Heliyon*. 5 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01138>.
- [106] W.T. Huang, D.H. Wu, J.T. Chen, Robust design of using nanofluid/MQL in micro-drilling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 85 (2016) 2155–2161. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7382-x>.
- [107] M. Perçin, K. Aslantas, I. Uçun, Y. Kaynak, A. Çicek, Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating, *Precision Engineering*. 45 (2016) 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.02.015>.
- [108] A. Meena, M. El Mansori, Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications, *Wear*. 271 (2011) 2412–2416. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.022>.
- [109] S. Bhowmick, A.T. Alpas, The role of diamond-like carbon coated drills on minimum quantity lubrication drilling of magnesium alloys, *Surface and Coatings Technology*. 205 (2011) 5302–5311. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.037>.
- [110] K. Giasin, S. Ayvar-Soberanis, A. Hodzic, The effects of minimum quantity lubrication and cryogenic liquid nitrogen cooling on drilled hole quality in GLARE fibre metal laminates, *Materials and Design*. 89 (2016) 996–1006. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.049>.
- [111] S. Bhowmick, A.T. Alpas, Minimum quantity lubrication drilling of aluminium-silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48 (2008) 1429–1443. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.04.010>.
- [112] L.C. Brandao, R.T. Coelho, C.H. Lauro, Contribution to dynamic characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow,

- Applied Thermal Engineering. 31 (2011) 3806–3813.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.024>.
- [113] M. Girinon, F. Dumont, F. Valiorgue, J. Rech, E. Feulvarch, F. Lefebvre, H. Karaouni, E. Jourden, Influence of lubrication modes on residual stresses generation in drilling of 316L, 15-5PH and Inconel 718 alloys, *Procedia CIRP*. 71 (2018) 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.020>.
- [114] J. Xu, M. Ji, J. Paulo Davim, M. Chen, M. El Mansori, V. Krishnaraj, Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills, *Composite Structures*. 234 (2020) 111727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>.
- [115] Z. Zhu, B. He, J. Chen, Evaluation of tool temperature distribution in MQL drilling of aluminum 2024-T351, *Journal of Manufacturing Processes*. 56 (2020) 757–765. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.029>.
- [116] A. Nagaraj, A. Uysal, I.S. Jawahir, An Investigation of Process Performance when Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite under Dry, Cryogenic and MQL Environments, *Procedia Manufacturing*. 43 (2020) 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.165>.
- [117] A.T. Kuzu, W. Wu, D.A. Stephenson, M. Bakkal, J. Hong, A.J. Shih, High-throughput Dry and Minimum Quantity Lubrication Drilling of Compacted Graphite Iron, *Procedia CIRP*. 46 (2016) 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.191>.
- [118] B. Tasdelen, T. Wikblom, S. Ekered, Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling, *Journal of Materials Processing Technology*. 200 (2008) 339–346. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.064>.
- [119] S. Yi, G. Li, S. Ding, J. Mo, Performance and mechanisms of graphene oxide suspended cutting fluid in the drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V, *Journal of Manufacturing Processes*. 29 (2017) 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.07.027>.
- [120] A. Duchosal, S. Werda, R. Serra, C. Courbon, R. Leroy, Experimental method to analyze the oil mist impingement over an insert used in MQL milling process, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 86 (2016) 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.010>.
- [121] Y. Iskandar, A. Tendolkar, M.H. Attia, P. Hendrick, A. Damir, C. Diakodimitris, Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 63 (2014) 77–80.

- <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.078>.
- [122] C. Yan, Y. Zhang, C. Liu, Z. Wang, Q. Zhang, Study on the dynamic characteristics of spray droplet in air environment under inclined condition, *Nuclear Engineering and Design*. 369 (2020) 110832. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110832>.
  - [123] A. Duchosal, R. Leroy, L. Vecellio, C. Louste, N. Ranganathan, An experimental investigation on oil mist characterization used in MQL milling process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 66 (2013) 1003–1014. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4384-9>.
  - [124] H. Ye, An overview of the development of Al-Si-alloy based material for engine applications, *Journal of Materials Engineering and Performance*. 12 (2003) 288–297. <https://doi.org/10.1361/105994903770343132>.
  - [125] M. Girinon, H. Karaouni, U. Masciantonio, F. Lefebvre, E. Feulvarch, E. Jourden, Risks related to the lack of lubrication on surface integrity in drilling, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01138>.
  - [126] G. Zhu, S. Yuan, X. Kong, C. Zhang, B. Chen, Experimental observation of oil mist penetration ability in minimum quantity lubrication (MQL) spray, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 34 (2020) 3217–3225. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-0713-3>.
  - [127] G.M. Krolczyk, R.W. Maruda, J.B. Krolczyk, P. Nieslony, S. Wojciechowski, S. Legutko, Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting conditions, *Measurement*. 121 (2018) 225–239. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.052>.
  - [128] M. Niemczewska-Wójcik, The influence of the surface geometric structure on the functionality of implants, *Wear*. 271 (2011) 596–603. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.06.013>.
  - [129] D.A. Stephenson, E. Hughey, A.A. Hasham, Air flow and chip removal in minimum quantity lubrication drilling, *Procedia Manufacturing*. 34 (2019) 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.171>.
  - [130] S. Świrad, D. Wydrzynski, P. Nieslony, G.M. Krolczyk, Influence of hydrostatic burnishing strategy on the surface topography of martensitic steel, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 138 (2019) 590–601. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.081>.
  - [131] E.A. Rahim, H. Dorairaju, Evaluation of mist flow characteristic and performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining, *Measurement*. 123 (2018)



- 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.015>.
- [132] Y. Su, D. Zhang, B. Wang, Z. Chu, Z. Liu, Numerical analysis of droplet transport process in composite electrostatic spraying (CES) milling, *Journal of Manufacturing Processes*. 76 (2022) 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.003>.
- [133] N. Khanna, P. Shah, Chetan, Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO<sub>2</sub> techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy, *Tribology International*. 146 (2020) 106196. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106196>.



## STRESZCZENIE

### WYBRANE ZAGADNIENIA PROCESU WIERCENIA OTWORÓW W STOPIE ALUMINIUM $AlSi10Mg(Cu)$ W WARUNKACH ZMINIMALIZOWANEGO SMAROWANIA Z SYSTEMEM DWUKANAŁOWYM WIERTEL PEŁNOWĘGLIKOWYCH

W pracy doktorskiej przedstawiono analizę wpływu parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania i zmiany prędkości obrotowej wiertła na wybrane wskaźniki skrawalności podczas wiercenia stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$ . Badania wykonano również w warunkach obróbki na sucho i chłodzenia sprężonym powietrzem.

Niniejsza dysertacja składa się z sześciu głównych rozdziałów, podzielona na dwie główne części dotyczące analizy stanu wiedzy oraz wszystkich informacji związanych z przeprowadzeniem poszczególnych eksperymentów.

W rozdziale pierwszym zaprezentowano najważniejsze informacje dotyczące zastosowania cieczy chłodząco-smarującej podczas wytwarzania detali obróbką skrawaniem. Przedstawiono szczegółowe informacje wykorzystania ekologicznej metody chłodzenia jaką jest metoda zminimalizowanego smarowania oraz jej znaczenie podczas obróbki otworów. Szczegółowa analiza literatury wykazała luki badawcze dotyczące zastosowania metody MQL podczas wiercenia stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$ , w szczególności dotyczące parametrów tworzenia aerozolu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy określono zarówno poznawczy jak również użytkowy cel pracy, zakres pracy i sformułowano hipotezę: *„Dobór odpowiednich parametrów tworzenia aerozolu w metodzie zminimalizowanego smarowania wpłynie korzystnie na zachowanie strugi i zmniejszenie turbulencji podczas wiercenia z dużymi prędkościami obrotowymi podczas obróbki stopu aluminium  $AlSi10Mg(Cu)$ , umożliwiając poprawę wskaźników skrawalności wyrażonych topografią powierzchni obrabianej, dokładnością wymiarową otworu oraz zużyciem i drganiem narzędzia”*.

Rozdział trzeci poświęcony został badaniom symulacyjnym dotyczącym wpływu zmiany natężenia przepływu objętościowego płynu syntetycznego i natężenia przepływu objętościowego powietrza jak również zmiany prędkości obrotowej wiertła i pochylenia kanałów na wyjściu narzędzia doprowadzających medium czynne w metodzie MQL. Wyniki tych badań pozwoliły na ustalenie wpływu zmiany wartości ww. parametrów

tworzenia aerozolu oraz konstrukcji kanałów wewnątrz wiertła na średnicę kropel, zawirowania strugi oraz obszar chłodzenia i smarowania w strefie skrawania.

Metodyka i warunki przeprowadzonych badań doświadczalnych przedstawiono w rozdziale czwartym. Podano najważniejsze wartości parametrów skrawania, informacje dotyczące cieczy chłodząco-smarującej, narzędzia i materiału obrabianego oraz scharakteryzowano stanowisko badawcze, urządzenie do tworzenia aerozolu i stanowiska pomiarowe.

Wyniki badań doświadczalnych dotyczących drgań i zużycia narzędzia, topografii powierzchni obrobionej oraz dokładności wykonania otworów zaprezentowano w rozdziale piątym. Wyznaczono parametry tworzenia aerozolu oraz prędkości obrotowej narzędzia przy których stwierdzono zmniejszenie zużycia i wartości średniokwadratowe przyspieszeń drgań w trzech rozpatrywanych kierunkach. Ustalono, że dokładność otworu uzależniona jest od drgań powstałych podczas wiercenia i nie powinno stosować się prędkości obrotowych większych niż 7000 obr./min, ponieważ tolerancja przekracza wartość 0,1 mm. Ze względu na topografię powierzchni zaleca się stosowanie wartości natężenia przepływu objętościowego powietrza na poziomie 60 l/min oraz natężenia objętościowego płynu syntetycznego od 25 ml/h do 40 ml/h. Dla tych parametrów tworzenia medium czynnego w metodzie MQL stwierdzono największą jakość powierzchni obrobionej ze względu na parametry wysokościowe, amplitudowe i objętościowe.

W wyniku analizy zarówno badań symulacyjnych, jak i eksperymentalnych, zostały wypracowane wnioski dotyczące przyszłych kierunków badawczych. W rozdziale szóstym przedstawiono również wnioski obejmujące aspekty poznawcze oraz praktyczne, które dostarczają wskazówek w zakresie ustawień parametrów tworzenia medium czynnego, prędkości obrotowej w kontekście procesu wiercenia stopu aluminium AlSi10Mg(Cu).

## **ABSTRACT**

### **SELECTED ISSUES OF THE HOLE DRILLING PROCESS IN AlSi10Mg(Cu) ALUMINIUM ALLOY UNDER MINIMUM QUANTITY LUBRICATION CONDITIONS WITH A TWO-CHANNEL SYSTEM OF CARBIDE DRILLS**

The dissertation presents an analysis of the influence of aerosol formation parameters in the minimum quantity lubrication method and the variable rotational speed of the drill on selected machinability indicators during turning of AlSi10Mg(Cu) aluminium alloy. The studies were also conducted under dry cutting and compressed air cooling conditions.

This dissertation consists of six main chapters, divided into two main sections on the analysis of the state of the art and all the information related to the execution of the different experiments.

The most important aspects of the use of cutting fluids in machining are presented in Chapter 1. Detailed environmental information on the eco-friendly minimum quantity lubrication cooling method and its importance in the machining of holes is discussed. A detailed analysis of the literature revealed research gaps in the application of the MQL method in drilling of the AlSi10Mg(Cu) aluminium alloy, particularly with regard to aerosol formation parameters.

Based on the analysis, the cognitive and utilitarian aim of the dissertation, as well as the scope of the work, were defined and the following hypothesis was formulated: "The selection of proper aerosol formation parameters in the minimum quantity lubrication method will positively influence the jet behaviour and turbulence reduction during high-speed drilling when machining of AlSi10Mg(Cu) aluminium alloy, enabling the improvement of machinability indicators represented by the topography of the machined surface, the dimensional accuracy of the hole and the wear and vibration of the tool."

Chapter 3 focuses on simulation studies of the effects of the variable volume flow rates of both synthetic fluid and air, as well as varying rotational speed of the drill and the inclination of the channels at the tool outlet, which supply the active medium in the MQL method. The results of these tests enabled the determination of the influence of the variable aerosol formation parameter values and the design of the channels inside the drill on droplet diameter, jet turbulence and the area of cooling and lubrication in the cutting zone.

Methodology and conditions of the experimental studies carried out are presented in Chapter 4. The most relevant values of the cutting parameters, information on the cutting

fluid, tool and workpiece material are given, and the test stand, aerosol forming device and measuring apparatus are characterised.

The results of the experimental studies on tool vibration and wear, topography of the machined surface and hole accuracy are presented in Chapter 5. The aerosol formation and tool speed parameters, at which a reduction in wear was found, and the mean-square values of vibration accelerations in the three considered directions were determined. It was found that the accuracy of the hole depends on the vibrations generated during drilling and that rotational speeds higher than 7000 rpm should not be used, as the tolerance exceeds 0.1 mm. According to the surface topography, air volume flow rate of 60 l/min and synthetic fluid volume flow rates of 25 ml/h up to 40 ml/h are recommended. For these active medium formation parameters in the MQL method, the highest quality of the machined surface was found in terms of the height, amplitude and volume parameters.

As a result of the analysis of both simulation and experimental studies, conclusions for further research directions have been developed. Chapter 6 also presents conclusions regarding cognitive and practical aspects, which provide guidance on the settings of the active medium formation parameters, rotational speed in the context of the drilling process of AlSi10Mg(Cu) aluminium alloy.