

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Natalii Szczotkarz

**pt.: „ANALIZA PARAMETRÓW TWORZENIA MEDIUM CZYNNEGO
W METODZIE ZMINIMALIZOWANEGO SMAROWANIA
Z NANOCZĄSTECZKAMI PODCZAS OBRÓBKI STOPU TYTANU Ti6Al4V”**

*Podstawą opracowania recenzji jest zlecenie Dyrektora Instytutu Inżynierii Mechanicznej
Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego dr hab. inż. Justyny
Patalas-Maliszewskiej, prof. UZ (pismo IM-D.511.3.2023.JG. z dnia 30 marca 2023 r.)*

1. Ocena doboru tematu rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Szczotkarz dotyczy analizy warunków kreacji strumienia czynnika chłodząco-smarującego podawanego ze zminimalizowanym wydatkiem i domieszkowanego nanocząsteczkami metalicznymi i ceramicznymi oraz jego wpływu na proces toczenia stopu tytanu Ti6Al4V. Zagadnienie to wpisuje się w aktualny trend badań światowych w zakresie zapewniania kontrolowanych warunków procesów obróbki wiórowej i ścierniej poprzez precyzyjne podawanie czynników o działaniu chłodzącym, smarnym i antyadhezyjnym w postaci cieczy, gazów oraz ciał stałych. Poszukiwanie możliwości uzyskiwania żądanych warunków procesu skrawania przy jednoczesnym dążeniu do ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne procesów obróbkowych doprowadziło do opracowania szeregu metod, w których minimalizuje się udział czynnika chłodząco-smarującego ze względu na obciążenie środowiska wywołane jego utylizacją. Najbardziej rozpowszechnione z nich to metoda smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego MQL (ang. *Minimum Quantity Lubrication*), chłodzenia ze zminimalizowanym wydatkiem płynu chłodząco-smarującego MQC (ang. *Minimum Quantity Cooling*) oraz zminimalizowanego wydatku płynu chłodząco-smarującego o obniżonej temperaturze MQCL (ang. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*). Metody te często zalicza się do tzw. metod hybrydowych ze względu na jednoczesne zastosowanie czynnika w stanie ciekłym (np. oleju lub emulsji olejowej) wraz z medium transportującym w formie sprężonego powietrza, czyli czynnika w stanie gazowym. Jednym z najnowszych kierunków badań w zakresie rozwoju tych metod jest dodatkowe domieszkowanie płynu cząsteczkami ciał stałych zazwyczaj o nanometrycznych wymiarach, m.in. w celu zwiększenia ich przewodności cieplnej i w efekcie poprawy zdolności chłodzących.

Kolejnym aspektem świadczącym o aktualności podjętej problematyki badawczej jest skoncentrowanie uwagi na procesie toczenia stopu tytanu Ti6Al4V. Materiał ten jest zaliczany do grupy materiałów trudno skrawalnych ze względu na swoje powinowactwo chemiczne do materiałów narzędziowych i relatywnie dużej odporności na dekohezję w procesach obróbki mechanicznej skutkującej intensywnym zużyciem ściernym, adhezyjnym i dyfuzyjnym narzędzia oraz defektami

powierzchni obrabianej. Z tych względów intensywnie prowadzone są prace badawcze w zakresie możliwości przewyższania znanych ograniczeń procesów obróbki wiórowej materiałów trudno skrawalnych, w tym stopu tytanu Ti6Al4V stosowanego w przemyśle lotniczym i kosmicznym ze względu na jego relatywnie małą masę, dużą wytrzymałość i odporność termiczną.

W związku z powyższymi ocenami, że przekazana do recenzji praca doktorska mgr inż. Natalii Szczotkarz swoją tematyką wpisuje się bardzo dobrze w te dwa nowoczesne kierunki badań w zakresie obróbki wiórowej. Łączy ona badania eksperymentalne z nowoczesnymi technikami modelowania i symulacji komputerowej w celu określenia wpływu kluczowych parametrów strumienia czynnika chłodząco-smarującego na proces toczenia stopu tytanu Ti6Al4V. Dlatego też podjęta w rozprawie problematykę oceniam jako oryginalną i nowoczesną oraz mającą znaczący aspekt poznawczy i użyteczny.

2. Ocena celów, tezy, zakresu i problemów badawczych rozprawy

Autorka zdefiniowała w rozdziale 2. trzy główne cele: poznawczy, metodyczny i użyteczny. **Cel poznawczy** dotyczy poznania zjawisk podstawowych w strefie skrawania chłodzonej z użyciem metody MQL z dodatkiem nanocząsteczek przy zmiennych parametrach tworzenia aerozolu powietrzno-estrowego. **Cel metodyczny** odnosi się do opracowania założeń w zakresie doboru parametrów tworzenia medium czynnego stosowanego do chłodzenia i smarowania strefy toczenia i które modyfikowane jest nanocząsteczkami ciał stałych. Natomiast **celem użytecznym** pracy jest określenie wytycznych do zastosowania wyników prac badawczych w praktyce przemysłowej. Cele te zostały w pracy zdefiniowane jednoznacznie i precyzyjnie. Wynikają one bezpośrednio zarówno z tematu rozprawy, jak i z wniosków z analizy literatury. Jedynym niejasnym sformułowaniem jest w tym obszarze „mgła olejowa”. W mojej ocenie należy stosować pojęcie z zakresu fizyki, jakim jest „aerazol powietrzno-olejowy”, a ponieważ w recenzowanej pracy zastosowano ester polioliu, pojęcie to powinno przyjąć brzmienie „aerazol powietrzno-estrowy”.

W rozprawie zaproponowano dwie tezy. **Teza pierwsza** odnosi się do parametrów tworzenia medium czynnego i jest w mojej ocenie trywialna i oczywista w swoim brzmieniu. Upraszczając, można stwierdzić, że zawarte w pracy stwierdzenie oznacza, że istnieją parametry tworzenia medium, które wpływają na badany proces obróbkowy. Wiedza taka jest oczywista i nie wymagała realizacji ocenianej pracy doktorskiej. **Teza druga** opisuje związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy parametrami medium czynnego a wybranymi wskaźnikami skrawalności, zakładając kierunki zmian ocenianych parametrów procesu toczenia. Jest ona w mojej ocenie poprawna, nieoczywista i wystarczająco szczegółowa. Ponadto określa zakres zagadnień rozpatrywanych w recenzowanej rozprawie doktorskiej i wskazuje na spodziewane pozytywne rezultaty podjętych prac badawczych.

W podrozdziale 2.3. opisano bardzo szczegółowo szeroki **zakres** zadań koniecznych do realizacji w celu osiągnięcia założonych celów oraz potwierdzenia postawionych tezy. Bardzo pozytywnie oceniam graficzną prezentację zakresu pracy w formie swego rodzaju mapy myśli, którą Autorka zamieściła na rysunku 2.1. Przyjęty zakres pracy jest adekwatny do tematu, celów oraz przyjętych tezy pracy.

W pracy zdefiniowano również szczegółowo osiem **problemów badawczych**. Poprawnie zapisano je w formie pytań, na które odpowiedzi uzyskać można w wyniku prowadzenia badań symulacyjnych oraz doświadczalnych. Problemy są spójne z wcześniej zdefiniowanymi elementami metodycznymi dysertacji, czyli celami, tezami oraz przyjętym zakresem prac.

3. Charakterystyka i ocena struktury rozprawy

Autorka na początku obszernego (258-stronicowego) dokumentu zamieszcza spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz krótkie – nieco ponaddwustronicowe wprowadzenie do prezentowanych zagadnień. W szczegółowym wykazie skrótów i akronimów wątpliwość moją wzbudziło przyporządkowanie wielkiej litery P do natężenia przepływu objętościowego powietrza wyrażonego w l/min. Uważam, że należy unikać stosowania symboli przypisanych innym wielkościom fizycznym i powszechnie stosowanym (w tym przypadku jako symbol mocy) przy nadawaniu oznaczeń mniej znanych wielkości. Ponadto wydaje się korzystniejsze byłoby zastosowanie w tym przypadku wielkiej litery Q stosowanej w termodynamice w odniesieniu do objętościowego natężenia przepływu.

Pierwszy numerowany rozdział zawiera opisaną na 50 stronach analizę literatury obejmującą najważniejsze hasła związane z tematyką dysertacji: znaczenie i podział płynów chłodząco-smarujących (niewłaściwie moim zdaniem nazywanych tu obróbkowymi), charakterystykę metody zminimalizowanego chłodzenia i smarowania strefy skrawania oraz opis dodatków poprawiających właściwości płynów chłodząco-smarujących, ze szczególnym uwzględnieniem dodatków w postaci nanocząsteczek. Analiza ta poprawnie kończy się wnioskami wskazującymi lukę badawczą i pozwalającymi na zdefiniowanie celów, tez i problemów badawczych pracy. Moje uwagi do tej części dotyczą pominięcia w analizie charakterystyki stopu tytanu Ti6Al4V wyróżnionego w tytule rozprawy, a także pominięto charakterystykę trudności związanych z prowadzeniem obróbki skrawaniem tego materiału zaliczanego do grupy trudno skrawalnych (ang. *hard-to-cut*). Podkreślam również, że w mojej ocenie użyte w tytule podrozdziału 1.3. pojęcie „płynu obróbkowego” nie definiuje poprawnie czynnika o działaniu chłodzącym, smarującym i antyadhezyjnym w stanie płynnym i może sugerować płyn stosowany do obróbki np. skoncentrowanym strumieniem wody lub w obróbkach hybrydowych, jak np. obróbce elektrochemicznej.

Rozdział 2. zawiera elementy metodyczne dysertacji, takie jak cel poznawczy, metodyczny i utylitarny, tezy, zakres i problemy badawcze pracy. Pozytywnie oceniam umiejscowienie tej części rozprawy za wnioskami z analizy literatury, ponieważ dzięki temu możliwe jest bezpośrednie odniesienie elementów metodycznych do stanu wiedzy i techniki w zakresie wyznaczonym tematem pracy.

Rozdział 3. przedstawia 10-stronicową charakterystykę metody zminimalizowanego smarowania strefy skrawania przy zastosowaniu płynu chłodząco-smarującego wzbogaconego nanocząsteczkami. Zamieszczono w nim opis istoty tej metody, charakterystykę zastosowanych nanocząsteczek oraz warunki tworzenia medium chłodząco-smarującego z użyciem opisanej metody wraz z charakterystyką zastosowanego urządzenia Lubrimat L60. Rozdział ten stanowi swego rodzaju wprowadzenie do kolejnych dwóch części dysertacji zawierających opis przeprowadzonych badań symulacyjnych (rozdział 4.) i doświadczalnych (rozdział 5.) odnoszących się do informacji zawartych w tej części pracy. Oceniam to bardzo pozytywnie, ponieważ przyjęty podział treści ułatwia czytelnikowi analizę treści zawartych w dwóch kolejnych rozdziałach badawczych.

Jak już wspomiano, rozdział 4. zawiera szczegółowy opis badań symulacyjnych odnoszących się do parametrów medium czynnego zastosowanego w metodzie zminimalizowanego smarowania. Na 30 stronach dokumentu zamieszczono w nim cel badań symulacyjnych, charakterystykę stanowiska badawczego, założenia i uproszczenia przyjęte w metodzie obliczeniowej mechaniki płynów CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*), opis modelu geometrycznego, podziału na elementy skończone, warunków symulacji, a także jej wyniki wraz z wnioskami. Analiza struktury tego rozdziału budzi wątpliwości dotyczące nomenklatury. Tytuł podrozdziału 4.7.1. określono jako „Wielkość kropelek i kąt strugi na wyjściu z dyszy”. W formalnym języku technicznym (jakim

powinna być redagowana dysertacja) nie należy stosować zdrobnień, dlatego za niewłaściwe uważam wprowadzenie pojęcia „kropelek”. Nie wiadomo bowiem po przekroczeniu jakiej wartości i jakiego parametru kropla staje się kropelką. Co więcej nie ma potrzeby wprowadzać takiego klasyfikatora. Wystarczy stosować pojęcie kropli, a jeżeli Autorce zależy na podkreśleniu jej relatywnie niewielkich wymiarów może do nazwy dodać przedrostek związany z przedrostkami miar (np. mikrokrople). Podobne zabiegi językowe stosuje się powszechnie w języku technicznym, np. w obróbce ścierniej opisane zostały submikrokryształiczne ziarna ściernie korundu spiekanego, a ich nazwa odnosi się do wielkości pojedynczych krystalitów, których wymiar charakterystyczny jest mniejszy niż 1 μm .

W rozdziale 5. opisano na 120 stronach cel, metodykę, analizę wyników oraz wnioski z badań doświadczalnych. Do podziału treści w tym rozdziale mam dwie uwagi. Po pierwsze jego tytuł nie oddaje w mojej ocenie poprawnie treści. Sformułowanie „Badania doświadczalne procesu toczenia z zastosowaniem nanocząsteczek w metodzie zminimalizowanego smarowania” lepiej byłoby zastąpić frazą „Badania doświadczalne procesu toczenia z zastosowaniem metody zminimalizowanego smarowania strefy obróbki medium domieszkowanym nanocząsteczkami”. Druga uwaga dotyczy tytułu podrozdziału 5.2., który brzmi „Planowanie badań”, a zawiera znacznie szerszy zbiór informacji o przebiegu i warunkach badań oraz zastosowanych stanowiskach badawczych i pomiarowych. Wydaje się zatem, że należałoby go zatytułować „Metodyka badań doświadczalnych”, co odpowiadałoby przyjętej dobrej praktyce prac badawczych. Ponadto tytułowy plan badań w podrozdziale 5.2. zamieszczono na jego pierwszych dwóch stronach, po czym na kolejnych 22 opisano elementy niezwiązane bezpośrednio z planowaniem badań.

Ostatnią numerowaną część pracy stanowi rozdział 6. zawierający na 8 stronach krótkie podsumowanie i rozbudowane wnioski. Zredagowane w nim wnioski podzielono (poprawnie metodycznie) na wnioski odnoszące się do podanych w rozdziale 2. celów, tj.: wnioski poznawcze, wnioski metodyczne i wnioski utylitarne. Ponadto Autorka podała wnioski do dalszych prac badawczych oraz ostatecznie w podrozdziale 6.5. zamieszcza pięć wniosków nazwanych końcowymi.

Pracę wieńczy wykaz 204 użytych źródeł literaturowych uporządkowanych w kolejności odwołania do nich w tekście pracy. Po nim zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim.

Strukturę pracy doktorskiej oceniam jako prawidłową i zgodną z przyjętą dobrą praktyką akademicką w tym zakresie. Poza kilkoma wymienionymi uwagami podział treści, objętość poszczególnych rozdziałów oraz ich kolejność oceniam bardzo dobrze. Na podkreślenie zasługuje konsekwentne wnioskowanie na zakończenie najważniejszych części pracy (rozdział 1., 4. i 5.) oraz obszernie sformułowane wnioski w rozdziale 6. dysertacji. Świadczy to bardzo dobrze o dążeniu Autorki do porządkowania wiedzy i próbie jej syntezy na zakończenie opisu kolejnych etapów analiz składających na całość rozprawy.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Ocena merytoryczna pracy doktorskiej przekazanej do recenzji opracowana została w odniesieniu do analizy literatury zawartej w rozdziale 1. oraz rozdziałów prezentujących wyniki własnych opracowań, badań i analiz Autorki, tj.:

- rozdziału 3. zatytułowanego „*Charakterystyka metody zminimalizowanego smarowania z udziałem nanocząstek zastosowanej w procesie toczenia*”;
- rozdziału 4. zatytułowanego „*Badania symulacyjne parametrów medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania*”;
- rozdziału 5. zatytułowanego „*Badania doświadczalne procesu toczenia z zastosowaniem nanocząstek w metodzie zminimalizowanego smarowania*”;

- oraz rozdziału 6. zatytułowanego „*Podsumowanie i wnioski*”.

Rozdział 1. dysertacji zatytułowano „*Analiza literatury w zakresie wytyczonym tematem pracy*”. Stanowi on obszerną analizę wiedzy i techniki w zakresie kluczowych zagadnień wynikających z tematyki rozprawy, z pominięciem charakterystyki zamieszczonego w tytule „*procesu obróbki*” oraz opisu właściwości podanego w temacie „*stopu tytanu Ti6Al4V*”. W mojej ocenie opis zawarty w tej części pracy zagadnień dotyczących pierwszych dwóch kluczowych haseł tematu pracy (jakimi są „*medium czynne*” oraz „*metoda zminimalizowanego smarowania z nanocząsteczkami*”) jest wystarczająco szczegółowy, bazuje na aktualnych publikacjach wiodących ośrodków naukowych z tego zakresu oraz zakończony jest wnioskowaniem mającym na celu sprecyzowanie zakresu i problemów badawczych pracy. Niemniej jednak największy zarzut do tej części rozprawy wiąże się z niesymetrycznym potraktowaniem kluczowych zagadnień określonych w temacie pracy, przez co Autorka nie odniosła się do problematyki obróbki wiórowej stopów trudno skrawalnych na bazie tytanu oraz właściwości fizycznych i chemicznych, oraz wynikającej z nich skrawalności stopu Ti6Al4V. Korzystniej byłoby także zredagować wnioski z tej części pracy jako numerowane zdania twierdzące zamiast rozbudowanych opisów łączących powtórne przytaczanie informacji z literatury z wnioskami. Taki zapis powoduje, że czytelnik z trudem odnajduje w treści dwustronicowego podsumowania najistotniejsze wnioski wskazujące lukę badawczą uzasadniającą podjęcie tematyki rozprawy. Analiza tej części pracy w połączeniu z wykazem użytych w pracy źródeł wykazała, niewłaściwe w mojej ocenie, całkowite pominięcie odwołań do norm branżowych, zarówno w odniesieniu do norm materiałowych, norm z zakresu obróbki wiórowej, jak również norm dotyczących zastosowanych w dalszych częściach pracy metod pomiarowych.

Rozdział 3. pracy zatytułowano „*Charakterystyka metody zminimalizowanego smarowania z udziałem nanocząstek zastosowanej w procesie toczenia*”. Zawiera on szczegółowy opis metody chłodzenia i smarowania strefy skrawania będącej przedmiotem analiz w recenzowanej rozprawie podzielony na charakterystykę istoty metody, uzasadnienie wyboru dwóch typów nanocząstek domieszkujących ester stosowany w metodzie MQL oraz opis urządzenia zastosowanego do tworzenia aerozolu powietrzno-estrowego wraz z dyszami i opisem przeprowadzonej procedury wzorcowania. W tej części pracy zabrakło mi informacji o parametrach sprężonego powietrza zasilającego urządzenie Lubrimat L60 oraz o rodzaju i specyfikacji zastosowanego medium czynnego. Autorka posługuje się w tym rozdziale pojęciem „*mgła olejowa*” i dopiero lektura podrozdziału 5.2.1. ujawnia, że w badaniach nie stosowano oleju. Również opis użytych nanocząstek domieszkowanych do płynu chłodząco-smarującego zawarty w podrozdziale 3.2. w mojej ocenie powinien zawierać obrazy mikroskopowe zastosowanych proszków ilustrujące ich faktyczną wielkość i jednorodność ziaren – zamiast tego przytoczono obrazy z literatury na rysunku 3.1. Natomiast w podrozdziale 3.3. zatytułowanym „*Parametry tworzenia medium czynnego w metodzie MQL*” zabrakło, w mojej ocenie, zamieszczenia tabeli z wykazem wartości kluczowych parametrów związanych z tytułowym zagadnieniem wraz z przyjętym zakresem ich zmienności. Podsumowując, rozdział ten stanowi w pierwszej części rozszerzenie i podsumowanie analizy literatury w odniesieniu do charakteryzowanej metody, uzasadniające przyjęte założenia, a w drugiej niekompletny opis użytego systemu podawania aerozolu powietrzno-estrowego do strefy obróbki ze szczegółową charakterystyką procedury wzorcowania. Ta ostatnia zasługuje na pochwałę ze względu na jej zakres i rzetelność przeprowadzonych pomiarów. Szkoda jedynie, że nie sformułowano na tej podstawie syntetycznych wniosków, które posłużyłyby do projektowania planu eksperymentu w badaniach doświadczalnych.

Rozdział 4. nosi tytuł „*Badania symulacyjne parametrów medium czynnego w metodzie zminimalizowanego smarowania*” i zawiera cel badań, charakterystykę stanowiska badawczego, założenia, uproszenia i warunki symulacji, opis modelu geometrycznego wraz z procedurą

dyskretyzacji oraz analizę uzyskanych wyników eksperymentów symulacyjnych zakończoną wnioskami. Zastanawia fakt, że Autorka nigdzie w pracy nie wymienia nazwy metody obliczeniowej zastosowanej do przeprowadzenia symulacji (np. metodę objętości skończonych, elementów skończonych czy też różnic skończonych) oraz nie podaje postaci modeli matematycznych zastosowanych do symulowania zjawiska przepływu turbulentnego w fazie ciągłej i rozproszonej. Poza wskazanymi brakami zawartość tego rozdziału oceniam bardzo dobrze. Autorka przeprowadziła szeroki zbiór doświadczeń symulacyjnych na opracowanym przez siebie modelu numerycznym. Dokonała analizy uzyskanych wyników oraz wykazała się umiejętnością poprawnego wnioskowania na ich podstawie. Co ważne, przytoczona analiza zawiera zarówno opis wyników, jak również odpowiedzi na pytania dotyczące przyczyn ujawnionych zależności. W zredagowanych wnioskach brakuje jednak odwołania do konkretnych wartości liczbowych stanowiących wyniki badań zarówno w formie wartości bezwzględnej, jak również miar względnych pozwalających na precyzyjną ocenę istotności analizowanych czynników. Zamiast tego Autorka posługuje się bardzo nieprecyzyjnymi sformułowaniami typu „*przy większych wartościach przepływu objętościowego powietrza... różnice wielkości kropelek nie są tak znaczne...*”, których należy unikać przy formułowaniu wniosków ze względu na ich niejednoznaczność i brak cech oceny ilościowej. Jest to częsty błąd w pracach badawczych, którego niestety Autorka się nie ustrzegła w opisywanej części dysertacji. Symulacja nie uwzględnia udziału trzeciej fazy istotnej dla ocenianej pracy – ciał stałych w postaci nanocząstek oraz nie odnosi się do zagadnienia przepływu ciepła, koncentrując swoją uwagę na cechach geometrycznych i dynamicznych strumienia aerozolu powietrzno-estrowego. Niemniej jednak w opracowanej formie jest zgodna z przyjętymi celami i zakresem pracy oraz pozwala na sformułowanie odpowiedzi na zdefiniowane problemy badawcze. Podsumowując, przeprowadzone badania symulacyjne oceniam wysoko ze względu na ich szeroki zakres i złożoność modelowanego zagadnienia przepływu wielofazowego w stanie ustalonym. Dowodzą one docieklivosti naukowej Autorki, umiejętności stosowania nowoczesnych technik modelowania i symulacji komputerowej oraz krytycznej analizy zawierającej wskazanie przyczyn uzyskanych wyników badań. Uważna lektura tej części pracy nasuwa wątpliwości sformułowane w postaci poniższych pytań.

1. Dlaczego w badaniach symulacyjnych przyjęto olej (o charakterystyce podanej w tabeli 4.6), a w kolejnej części prac doświadczalnych stosowano ester polioliu, czyli ester alkoholu wielowodorotlenowego – skąd ta niespójność?
2. Jakie są różnice we właściwościach fizycznych i reologicznych oleju przyjętego w badaniach symulacyjnych i estru polioliu zastosowanego w badaniach doświadczalnych?
3. Uwzględniając wykazaną niespójność pomiędzy badaniami symulacyjnymi i doświadczalnymi, jak Doktorantka uzasadni możliwość ekstrapolacji uzyskanych wyników badań symulacyjnych na założenia do badań doświadczalnych?

Najważniejszą część dysertacji stanowi bardzo obszerny **rozdział 5.** zatytułowany „*Badania doświadczalne procesu toczenia z zastosowaniem nanocząstek w metodzie zminimalizowanego smarowania*”. Opisano w nim metodykę badań doświadczalnych wraz z charakterystyką zastosowanych stanowisk badawczych i pomiarowych oraz przedstawiono analizę uzyskanych wyników badań z podziałem na pięć głównych aspektów: „*stabilność*” nanopłynów, drgania narzędzia, składowe siły skrawania, topografię powierzchni obrobionej oraz zużycie narzędzia. Rozdział kończy podsumowanie wraz z 25 wnioskami szczegółowymi z badań doświadczalnych.

W **podrozdziale 5.1.** podano cel badań doświadczalnych. Cel ten wykazuje brak spójności w odniesieniu do badania wpływu nanocząstek Cu i Al₂O₃ – w pierwszym przypadku (Cu) badano wpływ rozmiaru nanocząstek, a w drugim (Al₂O₃) wpływ udziału masowego. Niespójność ta nie została wystarczająco wyjaśniona w tekście pracy. W pracy nie zawarto planu badań przedstawiają-

cego wykaz wielkości wejściowych wraz z zakresami ich zmienności, wykaz wielkości wynikowych oraz czynników stałych i zakłóceń. Stanowi to odstępstwo od dobrej praktyki stosowanej w pracach badawczych.

Podrozdział 5.2. zawiera opis planu badań oraz stanowisk badawczych i pomiarowych. Opisując w podrozdziale 5.2.1. sposób i warunki przeprowadzenia badań doświadczalnych, Autorka, podając po raz pierwszy na stronie 113, że do tworzenia medium czynnego zastosowano ester polioliu nie przytoczyła jego właściwości fizycznych i reologicznych. Informacje te w ograniczonej formie zawarto w jednym z kolejnych podrozdziałów (tabela 5.5., podrozdział 5.2.3.), nazywając ten związek chemiczny olejem. Przytoczone w kolejnych podrozdziałach opisy stanowisk badawczych i zastosowanych systemów pomiarowych nie budzą wątpliwości. Szkoda jedynie, że Autorka w opisach nie przytacza tabel z wykazem parametrów technicznych stanowisk, ograniczając się do przedstawienia ich widoków ogólnych. Oceniając tę część opisu badań doświadczalnych należy podkreślić, że zastosowane w pracy stanowiska badawcze i pomiarowe są nowoczesne i dobre adekwatnie do przyjętego zakresu badań.

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych wraz z ich analizą zamieszczono w **podrozdziale 5.3.** Do analizy większości z etapów badań zastosowano zawansowane narzędzia przetwarzania sygnałów, które stanowiły podstawę dla standaryzowanej oceny efektów metodą Pareto. Dodatkowo stosowano wykresy powierzchniowe (nie podając jednak wzoru funkcji ani miary dopasowania) oraz wykresy przedstawiające porównanie wyników z użyciem wartości względnych (procentowych) opisujących zmiany względem wartości referencyjnej – obróbki na sucho. Na pochwałę zasługuje rozbudowana i wielostronna analiza wyników eksperymentów. Niestety, sposób opisu osi na wielu wykresach (np. wykresach Pareto efektów standaryzowanych) znacząco utrudnia jednoznaczną identyfikację zawartych na nich informacji. Po części opisującej wpływ wybranych czynników wejściowych na oceniane parametry technologiczne procesu toczenia stopu tytanu Ti6Al4V (drżania, składowe siły, strukturę geometryczną powierzchni obrobionej) zamieszczono rozbudowaną analizę dotyczącą wpływu składu czynnika chłodząco-smarującego na zużycie narzędzia. Badania te przeprowadzono przy parametrach tworzenia aerozolu powietrzno-estrowego, dla których uzyskano najkorzystniejsze parametry struktury geometrycznej powierzchni obrobionej, bez uwzględnienia wyników pomiarów drgań oraz składowych siły skrawania. Wydaje się jednak, że to właśnie kompleksowa analiza zjawisk elementarnych wywołujących mierzalne efekty zużycia płytek skrawających stanowi najbardziej wartościową część recenzowanej dysertacji. Pomiarów podstawowych wielkości opisujących zużycie narzędzi uzupełniono analizami obserwacji makro- i mikroskopowych z użyciem technik mikroskopii optycznej oraz skaningowej mikroskopii elektronicznej oraz analizami składu pierwiastkowego i mapowaniem występowania pierwiastków w ocenianym obszarze ostrza, przeprowadzonymi z zastosowaniem metody dyspersji promieniowania rentgenowskiego. Uważam, że ze względu na bardzo rozbudowany zakres badań doświadczalnych korzystnie byłoby w pracy zamieścić podrozdział syntetycznie zestawiający wyniki poszczególnych etapów badań w celu uporządkowania wiedzy i jednoznacznego wskazania trafności 25 wniosków szczegółowych sformułowanych w **podrozdziale 5.4.** Lektura rozdziału 5. nasuwa poniższe pytania.

1. W opisie planu badań na stronie 111 zabrakło informacji o liczbie powtórzeń w poszczególnych punktach planu opracowanego metodą PSI (ang. *Parameter Space Investigation*). W dalszym opisie podano różne wartości powtórzeń w zależności od badanego czynnika wynikowego planu (powtórzenia trzy- lub pięciokrotne). Bardzo proszę o podanie uzasadnienia przyjętej w pracy liczby powtórzeń oraz zróżnicowania tej wartości.

2. W badaniach doświadczalnych procesu toczenia stopu tytanu Ti6Al4V przyjęto stałe parametry technologiczne (strona 115). Bardzo proszę o uzasadnienie przyjętych wartości tych parametrów.
3. W rozdziale 3. opisującym zastosowaną metodę zminimalizowanego chłodzenia i smarowania nie podano informacji o składzie płynu chłodząco-smarującego. W rozdziale 4. dotyczącym symulacji pisano o oleju, a dopiero w rozdziale 5. podano, że do tworzenia aerozolu zastosowano ester polioliu. W pracy zabrakło uzasadnienia takiego wyboru. Dlaczego Doktorantka zdecydowała się w badaniach zastosować ester polioliu, a nie inny związek chemiczny (glikol, olej, alkohol) i jakie cechy technologiczne odróżniają ten związek od dotychczas stosowanych w metodzie MQL?
4. Dlaczego dla nanocząstek Cu przyjęto zmienność średnic (22 nm, 35 nm, 65 nm i 80 nm) a dla nanocząstek Al₂O₃ nie – wynosiła ona 15 nm?
5. W pracy uzasadniono brak zmienności udziału masowego nanocząstek Cu wynoszącego 0,5% wynikami badań wstępnych nieopisanych w pracy. Natomiast do programu badawczego włączono zmienne udziały masowe nanocząstek Al₂O₃ wynoszące 0,25%, 0,50%, 0,75% i 1,00%. Skąd ta niespójność? Dlaczego w przypadku nanocząstek Al₂O₃ nie przeprowadzono analogicznych badań wstępnych?
6. Z lektury rozprawy nie wynika jednoznacznie, jaki skład miał aerozol zastosowany w metodzie MQL bez domieszkowania nanocząstek. Autorka użyła pojęcia „płyn bazowy” dając do zrozumienia, że był nim ten sam ester polioliu, jednak w dalszej treści pracy konsekwentnie stosuje pojęcie „mgła olejowa” sugerując użycie oleju. Bardzo proszę wyjaśnić tę nieścisłość.
7. W treści pracy nie podano, do czego Autorka zastosowała równanie 5.2 zamieszczone na stronie 133 w podrozdziale zatytułowanym „Analiza drgań narzędzia”?
8. Dlaczego w pracy dotyczącej metody chłodzenia strefy obróbki pominięto zagadnienia związane z wymianą ciepła? Zagadnienia te pominięto zarówno przy badaniach symulacyjnych, jak i doświadczalnych. Jakie zna Doktorantka możliwości pomiaru temperatury w strefie skrawania, które mogłyby uzupełnić zbiór wyników badań i umożliwić wnioskowanie o skuteczności chłodzenia zastosowanej metody?
9. O szeroko rozumianej jakości technologicznej elementów kształtowanych w procesach obróbki ubytkowej decyduje między innymi stan warstwy wierzchniej, na który znaczący wpływ mają warunki termiczne w strefie skrawania. Ponieważ w recenzowanej pracy nie opisano wyników pomiarów naprężeń w warstwie wierzchniej, bardzo proszę o wyjaśnienie, jakie defekty cieplne mogą wystąpić w procesie toczenia stopu tytanu Ti6Al4V w przypadku niewystarczającego spełnienia funkcji chłodzącej przez podawane medium?

Rozdział 6. zawiera 10 wniosków poznawczych, 4 wnioski metodyczne, 5 wniosków użytkowych, 4 wnioski do dalszych prac oraz na zakończenie 5 wniosków końcowych. Wnioski sformułowano poprawnie i wynikają one z przeprowadzonych badań symulacyjnych i doświadczalnych, lecz zbyt często pomijają podanie konkretnych wartości wyników badań i analiz. Razi to szczególnie we wnioskach końcowych, w których nie określono parametrycznie wpływu żadnego z badanych czynników wejściowych na przyjęty zbiór wielkości badanych. We wnioskach nie odniesiono się również do wymogów stawianych powierzchniom po toczeniu elementów ze stopu

tytanu Ti6Al4V. W związku z powyższym proszę o odpowiedź na poniższe pytania nasuwające się po lekturze tego rozdziału pracy.

1. Zdaniem Autorki, domieszkowanie aerozolu powietrzno-estrowego którym z badanych nanoproszków pozwala na uzyskanie korzystniejszych wyników w procesie toczenia stopu tytanu Ti6Al4V i dlaczego?
2. Jakie konkretne parametry tworzenia aerozolu powietrzno-estrowego domieszkowanego nanoproszkiem pozwalają, zdaniem Autorki, na uzyskanie najkorzystniejszych wyników obróbki dla nanocząsteczek Cu oraz w przypadku zastosowania nanocząsteczek Al_2O_3 ? Czy są to te same wartości, a jeżeli nie, to z czego wynikają różnice?
3. Jak ocenia Autorka spełnienie wymogów jakościowych stawianych wyrobom ze stopu tytanu Ti6Al4V kształtowanym w procesie toczenia w przypadku zastosowania badanej metody chłodzenia i smarowania strefy obróbki?
4. Jakie są najważniejsze korzyści i ograniczenia wdrożenia badanego sposobu chłodzenia i smarowania strefy skrawania w aspekcie aplikacyjnym?

5. Ocena poziomu naukowego rozprawy

Pod względem poziomu naukowego, pracę mgr inż. Natalii Szczotkarz oceniam bardzo dobrze. Na pozytywną ocenę zasługują przede wszystkim oryginalne osiągnięcia w zakresie rozwoju metody zminimalizowanego chłodzenia i smarowania strefy skrawania w procesie toczenia materiałów trudno skrawalnych. Jako najważniejsze osiągnięcia podane w pracy, zaliczam:

- analizę stanu wiedzy i techniki w zakresie metod chłodzenia i smarowania strefy obróbki ze zminimalizowanym wydatkiem czynnika oraz dodatków wpływających korzystnie na właściwości robocze płynów chłodząco-smarujących podawanych w procesach obróbki skrawaniem tymi metodami;
- ocenę wpływu podstawowych parametrów tworzenia medium chłodząco-smarującego podawanego metodą MQL na parametry geometryczne i dynamiczne generowanej strugi na podstawie badań symulacyjnych;
- określenie na drodze badań doświadczalnych wpływu zmian parametrów generowania oraz składu aerozolu powietrzno-estrowego domieszkowanego nanocząsteczkami Cu i Al_2O_3 na drgania narzędzia, wartości składowych siły skrawania, wybrane parametry i funkcje topografii powierzchni obrobionej oraz zużycie narzędzia w procesie toczenia stopu tytanu Ti6Al4V;
- rozszerzenie zakresu wiedzy teoretycznej i doświadczalnej o stosowaniu metod hybrydowych chłodzenia i smarowania strefy obróbki łączących jednocześnie użycie czynnika w stanie gazowym (sprężone powietrze), ciekłym (ester poliolu) i stałym (nanoproszek Cu i Al_2O_3) oraz o ich wpływie na wybrane wskaźniki technologiczne procesu toczenia stopu tytanu Ti6Al4V.

Przeprowadzone w bardzo szerokim zakresie badania symulacyjne i doświadczalne umożliwiły rozszerzenie zakresu wiedzy o kształtowaniu jakości technologicznej elementów wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V kształtowanych w procesie toczenia przy zastosowaniu innowacyjnej metody chłodzenia i smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem aerozolu powietrzno-estrowego domieszkowanego nanocząsteczkami Cu i Al_2O_3 . Wymienione osiągnięcia świadczą o dociekliwości naukowej Autorki oraz o konsekwentnym dążeniu do rozwiązania zdefiniowanych problemów naukowych tez i celów pracy, w zakresie wyznaczonym tematem recenzowanej dysertacji.

6. Ocena poziomu redakcyjnego rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Natalii Szczotkarz została napisana bardzo starannie, dobrym stylem i zazwyczaj wolna jest od typowych błędów językowych i redakcyjnych pojawiających się w opracowaniach naukowych. Zawarte w niej rysunki zostały opracowane z dużą starannością i z nielicznymi wyjątkami są bardzo czytelne. Uważna lektura tego bardzo obszernego dokumentu ujawniła jednak kilka odstępstw od obowiązujących norm w tym zakresie, do których jako najważniejsze należy zaliczyć:

- niepoprawny zapis zakresu wartości z użyciem symbolu dzielenia (np. str. 112);
- niewyjaśnione akronimy przy pierwszym użyciu w tekście (np. DPM na str. 84);
- na rysunkach zapis symboli czcionką regularną zamiast kursywą (np. rys. 5.47);
- wnioski powinny być zapisane jako numerowane zdania twierdzące, najlepiej z przywołaniem wartości liczbowych – tej zasady nie zastosowano np. we wnioskach z analizy literatury zawartych w podrozdziale 1.4.;
- błędny zapis wzorów chemicznych bez zastosowania indeksu dolnego (np. Al_2O_3 na rys. 5.22);
- niepoprawny zapis wartości i jej jednostki bez rozdzielenia spacją (np. w podpisie rysunku 5.30).

Wymienione błędy nie wpływają jednak negatywnie na ogólnie bardzo dobrą czytelność przekazywanych treści oraz na wysoką ocenę poziomu redakcyjnego rozprawy.

7. Wniosek końcowy

Po wnikliwej analizie przedłożonej do recenzji dysertacji mgr inż. Natalii Szczotkarz, stwierdzam, że Autorka:

- wybrała nowoczesną tematykę pracy, istotną w kontekście rozwoju procesów toczenia materiałów trudno skrawalnych;
- w sposób oryginalny rozwiązała zdefiniowany problem naukowy dotyczący określenia podstaw teoretycznych i wytycznych do praktycznego zastosowania metody chłodzenia i smarowania ze zminimalizowanym wydatkiem aerozolu powietrzno-estrowego domieszkowanego nanocząsteczkami Cu i Al_3O_3 w procesie toczenia stopu tytanu Ti6Al4V;
- wykazała się umiejętnościami w zakresie planowania i prowadzenia badań naukowych oraz obiektywnością naukową w ocenie uzyskanych wyników własnych badań symulacyjnych i doświadczalnych;
- w prawidłowy i metodyczny sposób przeprowadziła proces dowodzenia tez naukowych ocenianej rozprawy doktorskiej.

Pozwala to na stwierdzenie, że rozprawa doktorska będąca przedmiotem oceny spełnia wymagania stawiane w artykułe 187. *Ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 roku i może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie *Nauki Inżynieryjno-Techniczne* w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna*. Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr inż. Natalii Szczotkarz do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.


.....
prof. dr hab. inż. Krzysztof Nadolny