



**POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. Ignacego Łukasiewicza**  
**WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA**  
**Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji**

**dr hab. inż. Witold HABRAT prof. PRz**  
profesor uczelni w grupie pracowników badawczo-  
dydaktycznych

al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów  
tel. (17) 865 14 91  
e mail: witekhab@prz.edu.pl

Rzeszów, 04.01.2022 r.

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Znojkiwicz pt.

### **„Modelowanie chropowatości powierzchni po frezowaniu kompozytu aluminiowo-ceramicznego”**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. Politechniki Poznańskiej z dnia 30.11.2021 r. (znak pisma DIM.075.245.2021). Ocena rozprawy została opracowana w oparciu o art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1669), zgodnie z wymogami określonymi w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki.

#### **1 Charakterystyka podjętej tematyki badawczej oraz celu i zakresu pracy**

Obróbka skrawaniem materiałów kompozytowych jest w ostatnich latach przedmiotem szczególnego zainteresowania naukowców na całym świecie ze względu na coraz szersze wykorzystanie tego typu materiałów. Oczywiście rozwój w tym zakresie uwarunkowany jest postępem w obszarze inżynierii materiałowej, gdzie opracowywane materiały kompozytowe mają często dużo lepsze właściwości mechaniczne i fizyczne niż stosowane obecnie tzw. konwencjonalne materiały konstrukcyjne. Jest to szczególnie widoczne w takich gałęziach przemysłu, jak

lotnictwo i kosmonautyka czy motoryzacja. Ponieważ pojęcie kompozytów odnosi się do szerokiej grupy materiałów, są one klasyfikowane według różnych kryteriów. Tego typu podejście pozwala uogólniać wyniki badań do określonych grup cechujących się podobieństwem w zakresie określonych właściwości. Powszechnie stosuje się podział materiałów kompozytowych ze względu na zastosowaną osnowę, wśród których kompozyty o osnowie metalowej zbrojone cząstkami ceramicznymi wykazują znaczący potencjał zastosowania ze względu na wskaźniki konstrukcyjne i eksploatacyjne. Cechują się one m.in. korzystnym współczynnikiem gęstości do wytrzymałości, odpornością na zużycie oraz sztywnością.

Efektywne kształtowanie tego rodzaju materiałów konstrukcyjnych jest istotnym elementem zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw przy uwzględnieniu aspektów ekonomicznych, społecznych i ekologicznych. Zagadnienie kształtowania materiałów kompozytowych jest złożone ze względu na ich niejednorodność wynikającą z obecności dwóch lub więcej odrębnych faz, z których jedna zawiera twarde cząstki we wzmocnieniu. Skrawalność tej grupy materiałów zależy od właściwości mechanicznych i chemicznych materiałów składowych oraz właściwości strukturalnych kompozytu, w tym od wiązania międzyfazowego, które może znacząco wpłynąć na jakość obróbki pod względem chropowatości powierzchni i uszkodzenia materiału. Siła wiązania międzyfazowego zależy zarówno od charakteru zbrojenia, jak i składu osnowy. Właściwości kompozytów, które decydują o ich funkcjonalności i korzyściach eksploatacyjnych, ograniczają jednocześnie możliwość efektywnego ich kształtowania. W obszarze wytwarzania części o dużych wymaganiach jakościowych w zakresie dokładności wymiarowo-kształtowej i topografii powierzchni dominującą rolę odgrywa obróbka skrawaniem.

Badania wskaźników skrawalności określających cechy technologiczne materiałów kompozytowych są podstawowym kierunkiem zwiększenia efektywności obróbki skrawaniem tej grupy materiałów. W tym zakresie można wyróżnić badania ukierunkowane na modelowanie stanu technologicznej warstwy wierzchniej ze szczególnym uwzględnieniem kształtowania topografii powierzchni. Topografia powierzchni oraz parametry chropowatości stanowią nie tylko istotne wskaźniki do oceny jakości procesu obróbki, ale również decydują o właściwościach użytkowych wytwarzanych wyrobów. Modelowanie parametrów chropowatości powierzchni obrobionej jest procesem złożonym, wymagającym uwzględnienia różnych czynników, ze względu na zależność zarówno od kinematyczno-geometrycznego odwzorowania krawędzi skrawającej narzędzia jak i intensywności zjawisk fizycznych zachodzących podczas skrawania przy jednoczesnym uwzględnieniu specyficznych właściwości strukturalnych kompozytów.

Przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej było modelowanie parametrów chropowatości powierzchni po frezowaniu kompozytu aluminiowo-ceramicznego MMC typu DURALCAN F3S.10S na osnowie stopu aluminium, zbrojonego cząstkami



SiC. W tym kontekście zakres merytoryczny recenzowanej pracy doktorskiej należy ocenić jako **niezwykle istotny**. Potwierdza to trafność i sensowność podjętej **tematyki badawczej**, która doskonale wpisuje się w aktualny obszar ogólnoswiatowych badań naukowych. Uzyskane wyniki pracy mogą mieć istotne znaczenie naukowe i użytkowe, zarówno w zakresie badań kształtowania topografii powierzchni, jak również w zakresie efektywnej produkcji wyrobów z kompozytów aluminiowo-ceramicznych.

**Tytuł pracy jest zgodny z podjętą tematyką badawczą oraz treścią pracy.** Cel pracy podany na str. 49, odnoszący się do opracowania modeli chropowatości powierzchni obrabianej po frezowaniu w różnych warunkach kompozytu aluminiowo-ceramicznego, a także ich weryfikacji w warunkach doświadczalnych, należy uznać za **trafny i w miarę jasno sprecyzowany**. Niestety Doktorantka nie sformułowała tezy pracy.

W podrozdziale 3.1 zatytułowanym cel i zakres badań nie wyodrębniono w sposób czytelny zakresu pracy. Co prawda po analizie podrozdziałów 3.1 i 3.2 oraz spisu treści można wywnioskować jaka jest struktura badań, jednak w tego rodzaju pracach powinno się w sposób przejrzysty określić zakres pracy ze strukturą blokową, gdyż to uporządkowałoby dalszą analizę. Na podstawie wskazanych powyżej podrozdziałów można jednak uznać, że przyjęty **zakres pracy jest spójny i powiązany z tematem dysertacji**. Niestety nie został przedstawiony w sposób czytelny w formie opisu jak i schematu graficznego. Na podkreślenie zasługuje jednak logiczny podział badań w zakresie parametrów chropowatości 2D i 3D.

## **2 Zakres i ocena poszczególnych części realizowanej pracy**

Dysertacja została zrealizowana w Zakładzie Obróbki Skrawaniem Politechniki Poznańskiej w Instytucie Technologii Mechanicznej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej, pod opieką naukową prof. PP Pawła Twardowskiego. Pracownicy tego Zakładu znani są ze znaczącego dorobku o zasięgu międzynarodowym w zakresie badań procesów obróbki skrawaniem. **Strukturę rozprawy** stanowi wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, wprowadzenie, pięć numerowanych rozdziałów, oraz podsumowanie, wnioski końcowe i bibliografia. W pracy zawarto również streszczenie w języku polskim i angielskim. Układ pracy jest prawidłowy - typowy dla tego typu prac eksperymentalnych.

Niestety praca jest trochę niestaranna pod względem błędów maszynopisu. Już w tytule dysertacji występuje tego rodzaju błąd: zamiast „...ALUMIONIOWO-...” powinno być „...ALUMINIOWO-...”. W dalszej ocenie poszczególnych części pracy wskażę inne wybrane przykłady tego rodzaju błędów z prośbą, aby Doktorantka

w przyszłych publikacjach bardziej starannie podchodziła do korekty, gdyż psuje to ogólny odbiór istotnych i wartościowych elementów pracy.

**W wykazie ważniejszych oznaczeń** niefortunnie przyjęto oznaczenie CVD jako węgiel spiekany z powłoką diamentową (?). Powszechnie oznaczenie CVD funkcjonuje jako metoda chemicznego wydzielenia warstw pokrywających narzędzi skrawających z fazy gazowej w wysokich temperaturach. Ponadto oznaczenia parametrów chropowatości powinny być zgodnie z normą, bez zastosowania indeksu dolnego np. *R<sub>a</sub>*, *R<sub>t</sub>* itd. W dalszej części pracy są one pisane różnie.

**We wstępie** do pracy Autorka uzasadniła podjętą tematykę badawczą w kontekście zastosowania materiałów kompozytowych w obszarze inżynierii mechanicznej i w sposób przystępny scharakteryzowała kolejność badań w ramach dysertacji. W tym miejscu chciałbym jedynie zasugerować Doktorantce, aby starała się unikać akapitów jednozdaniowych.

**W rozdziale 2** Autorka przedstawiła aktualny stan wiedzy na temat zastosowania kompozytów metalowo-ceramicznych, ich skrawalności oraz modelowania chropowatości powierzchni obrobionej po skrawaniu materiałów kompozytowych. Przedstawiona analiza jest w miarę wnikliwa i odnosi się do aktualnych źródeł literaturowych. Wydaje się stanowić podstawę do określenia obszaru badań własnych. Sformułowano w niej podsumowanie odnoszące się zasadniczo do modelowania mikronierówności powierzchni. W tej części występuje kilka drobnych błędów o charakterze redakcyjnym:

- str. 13 - Autorka napisała „[6, 7, 8, 9]” - powinno być „[6-9],
- str. 14 - Autorka napisała „Al2O3” - powinno być „Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”,
- str. 17 - rys. 2.3 - zła jakość - w oryginale referencyjnej publikacji jakość jest dużo lepsza,
- str. 20 - niefortunny zwrot „... pojęcie obrabialności (...)” przy akapicie dotyczącym definicji skrawalności,
- str. 25 - niefortunny zwrot „... chropowatość (...) była doskonała ...”,
- str. 25 - niefortunny zwrot „Siły skrawania były raczej stałe...”,
- str. 25 - niefortunny zwrot „... wytwarza on największą chropowatość powierzchni.”,
- str. 27 - zamiast „worzenia” powinno być „tworzenia”,
- str. 27 - niefortunny zwrot „... podpowierzchni materiału,...” - tutaj chodzi raczej o technologiczną warstwę wierzchnią,
- str. 27 - niefortunny zwrot „... a oraz że ...”,
- str. 27 - niefortunny zwrot „... w różnych procentach wagowych ...” - powinno być „... w różnych procentowych udziałach wagowych...”,



- str. 29 – zamiast „ $Ra=1,43\text{ mm}$ ” powinno być „ $Ra=1,43\text{ }\mu\text{m}$ ”,
- str. 30 – rys. 2.12 powinno być „prędkość skrawania”,
- str. 31 – niefortunny zwrot „... ułamka objętościowego cząstek.”
- str. 34 – zamiast „Jedna ...” powinno być „Jednak ...”,
- str. 34 – Tab. 2.1. powinna zostać przetłumaczona,
- str. 37 – wzór (7) – oznaczenie „ $V$  – prędkość obrotowa wrzeciona” – powinno być „ $n$ ”,
- str. 38 – zamiast „... mechanizmy deformacji usuwania materiału,...” powinno raczej być „... mechanizmy dekohezji materiału,...”,
- str. 47 – zamiast „...uwzględnia się chropowatość...” powinno być „...uwzględnia się kształtowanie chropowatości...”.

Ponadto występują błędy interpunkcyjne i pewna niekonsekwencja w zapisie określeń materiałów kompozytowych. Opisy osi na rysunkach cytowanych są z jednej strony zmieniane na język polski a z drugiej pozostają w języku angielskim. Wszystkie rysunki cytowane powinny być pozostawione w oryginale i mieć zgodę autora na publikację, a rysunki zmieniane powinny uwzględniać odniesienie, na podstawie jakiej publikacji zostały opracowane. Są to błędy, których należy unikać w przyszłych pracach.

Zawartość merytoryczna rozdziału jest zasadniczo logiczna, choć mam drobne uwagi szczegółowe:

- Proszę o wyjaśnienie co przedstawiono na rys. 2.8 – co oznacza „Różnice w amplitudach siły skrawania. Dlaczego w opisie jest 11- i 22, podczas gdy na wykresie  $F_{11}$  i  $F_{22}$ ?
- Do jakiej składowej siły całkowitej odnoszą się „Siły skrawania [N]” na rys. 2.9?
- Rys. 2.15-2.20 – czy opracowano na podstawie badań własnych – dlaczego opisy są w języku angielskim?
- Błędne stwierdzenia „postać iloczynowa” dla funkcji potęgowej (równanie (9) i (10)) oraz „suma z odpowiednimi współczynnikami” dla równań (11) i (12). Proszę o wyjaśnienie, co dokładnie oznacza strategia  $E[Ra\_fz]$ , jaką informację w jej wyniku uzyskamy.
- Na str. 45 jest stwierdzenie „Ugięcie frezu następuje pod wpływem siły promieniowej (posuwowej) ...”. Proszę określić czy składowa promieniowa i posuwowa siły całkowitej to jest to samo?
- Co oznacza zawarte na str. 46 stwierdzenie „...szybkiego frezowania czołowego.”?

W rozdziale trzecim został określony cel, zakres oraz metodyka badań. Ocenę celu i zakresu pracy przedstawiono we wcześniejszym punkcie recenzji. W tym zakresie odniosę się tylko do metodyki badań. Dużym mankamentem w tym zakresie jest brak pełnych oznaczeń i specyfikacji zastosowanych narzędzi skrawających, która

uwzględniałyby różnice w geometrii. Trudno się zatem odnieść do poprawności zwrotów użytych do ich określenia.

- *Proszę o przedstawienie pełnej specyfikacji użytych narzędzi. Jakie były wybrane kąty w układzie narzędzia?*
- *Proszę o wyjaśnienie czy poprawne jest określenie frezu firmy Fraisa jako frezu z powłoką ceramiczną TiCN – gdzie i w jakiej postaci występuje tutaj ceramika?*
- *Z czego wynika inna wielkość składników morfologii mikrostruktury na rys. 3.5 i 3.6?*
- *Proszę o doprecyzowanie czym różnią się pomiary parametrów chropowatości powierzchni 2D, 3D i topografii powierzchni?*
- *Na str. 54 podano informację o zmechanizowanym opuszczaniu i podnoszeniu sondy badawczej. Powinno raczej być użyte pojęcie „głowica pomiarowa”.*
- *W metodyce badań należałoby podać kinematykę analizowanego procesu frezowania.*

W **rozdziale czwartym** przedstawiono badania wstępne, w których porównano chropowatość powierzchni obrobionej dla różnych rodzajów frezów przy zmiennym posuwie i prędkości skrawania. Badania te pozwoliły na wykazanie, że zarówno posuw jak i prędkość skrawania odgrywają istotną rolę w kształtowaniu mikronierówności powierzchni obrobionej po frezowaniu kompozytu aluminiowo-ceramicznego. Trudno się jednak zgodzić jednoznacznie ze stwierdzeniem, że w zależności od zastosowanego materiału narzędziowego, wpływ prędkości skrawania nie jest jednoznaczny. O ile sformułowane wnioski są zasadniczo poprawne, to jednak zależność dotyczy nie tylko zastosowanego materiału narzędziowego, ale również geometrii narzędzia. Zgodzić się jednak należy z wnioskiem, że celowe jest opracowanie modelu chropowatości powierzchni po frezowaniu kompozytów aluminiowo-ceramicznych uwzględniającego nie tylko posuw ale również prędkość skrawania. W tej części nie uniknięto również drobnych błędów o charakterze redakcyjnym, przykładowo zamiast znaku dziesiętnego „.” w opracowaniach polskojęzycznych stosujemy „,”. Jest też stwierdzenie „... Wartość ta wynika z doświadczeń autorów pracy ...”, które wydaje się być efektem skopiowania zwrotu z wcześniejszej publikacji współautorskiej.

W zakresie merytorycznym występują błędy w określeniu liczby ostrzy i posuwu na ostrze dla poszczególnych narzędzi. Przykładowo w tabeli 4.7. występuje  $z=6$  dla narzędzia CVD i  $z=2$  dla narzędzia CBN, a poniżej jest podany ten sam posuw  $f_z$  przy jednakowym posuwie na obrót. W tabeli 4.8. powinno być  $z=4$ . Oprócz wskazanych błędów proszę o odniesienie się do następujących kwestii:



- Na jakiej podstawie określono prędkości skrawania dla poszczególnych narzędzi. Dlaczego w przypadku frezu firmy Fraisa zastosowano dokładność do dwóch miejsc po przecinku?
- Proszę o wyjaśnienie modeli w opisie rysunki 4.5 – w jakim celu je wstawiono?
- Czy badanie trwałości przedstawione na rys. 4.27 było wykonane dla materiału i narzędzia z zakresu pracy?
- Proszę o wyjaśnienie współczynników statystycznych podanych na rys. 4.28. Czy są na akceptowalnym poziomie?
- Jak mierzono wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej?

Badania zasadnicze odnoszące się do tematu pracy zostały zawarte w **rozdziale 5**. Doktorantka przedstawiła rozszerzoną analizę parametrów chropowatości powierzchni obrobionej przy zmiennych parametrach frezowania, wyznaczając dodatkowo parametry chropowatości powierzchni 3D oraz odnosząc się do uzyskanych topografii powierzchni po frezowaniu. Ponadto, opracowany został własny model chropowatości uwzględniający człon analityczny modelu Brammertz'a oraz człon doświadczalny. W mojej ocenie jest to najważniejsze oryginalne osiągnięcie w pracy, ściśle odnoszące się do określonego celu. W celu weryfikacji opracowanego modelu hybrydowego przeprowadzono analizę zmian chropowatości powierzchni w funkcji prędkości skrawania i posuwu na obrót. Rozdział ten zawiera szeroką analizę wyników prowadzącą zasadniczo do właściwych wniosków, choć w niektórych przypadkach wydają się one zbyt uogólnione. Niestety nie uniknięto również w tym rozdziale drobnych błędów i niezbyt precyzyjnych podpisów rysunków np.:

- zamiast „Wykres 3D chropowatości ...” powinno być raczej „Widok izometryczny mikrogeometrii powierzchni po frezowaniu ...”,

- Rys. 5.2 i tab. 5.6 – powinny dotyczyć narzędzia oznaczonego CVD (6-ostrzowego),

- w tab. 5.11 błędnie podano  $z=4$ ,

- w tab. 5.10 i 5.11 błędnie określono posuw w [m/min],

- str. 88 – niewłaściwy styl zdania – „W przypadku parametru  $S_a$  wartości te są porównywalne, co wynika z definicji tego parametru, czyli wartością średnią.”,

Pozostaje również kilka uwag oraz kwestii merytorycznych do uzupełnienia i wyjaśnienia:

- Ekstrapolacja funkcji poza obszar badawczy jest niewłaściwa ponieważ prowadzi do wniosku, że dla wartości zerowych czynników wejściowych uzyskujemy niezerowe wartości chropowatości powierzchni.
- Co oznacza zmienna  $E$  w modelach przedstawionych na rys. 5.14-5.16?,

- W tabelach i modelach w rozdz. 5 występują parametry chropowatości 2D i 3D – przykładowo model (15) dotyczy  $R_{z_t}$  a w tabeli 5.20 jest  $Sz_t$ . Podobnie w tabelach 5.21 i 5.22 porównuje się  $R_z$  i  $Sz$ .
- Proszę o uzupełnienie informacji w jaki sposób matematycznie wyznaczono współczynniki modelu (15) podane na kolejnej stronie.

Dysertacja kończy się **podsumowaniem** zawierającym ogóle uwagi wynikające z pracy i **wnioskami końcowymi**, podzielonymi na poznawcze, utylitarne oraz do dalszych badań. Generalnie wnioski są poprawne oraz przedstawiają zalecenia dotyczące warunków frezowania kompozytów aluminiowo-ceramicznych ze względu na chropowatość powierzchni. Wnioski mają uzasadnienie w przeprowadzonych badaniach i mają znaczenie praktyczne. Sugeruję, aby w przyszłości Autorka skupiła się na lepszym fizycznym uzasadnieniu trendów pojawiających się w wynikach.

**Bibliografia** zamieszczona w pracy jest w miarę aktualna. Doktoranta odwołuje się do 103 pozycji, z których w jednej jest współautorem. Szkoda, że Autorka nie odniosła się do innych swoich prac odnoszących się chociażby pośrednio do tematyki doktoratu: np. N. Znojkiwicz, M. Madajewski, P. Twardowski, S. Wojciechowski „Analiza sił oraz drgań podczas frezowania kompozytu metalowo-ceramicznego”, *Mechanik* nr 08/09/2018. Są to wartościowe publikacje potwierdzające doświadczenie badawcze Autorki w obszarze tematyki rozprawy.

### 3 Ogólna ocena pracy

Doktorantka podjęła się interesującego i aktualnego zagadnienia modelowania chropowatości powierzchni po frezowaniu kompozytu aluminiowo-ceramicznego.

Należy zaznaczyć, że **cel rozprawy został zasadniczo osiągnięty** a merytoryczna część pracy jest na akceptowalnym poziomie.

Pod względem edytorskim praca napisana jest niestarannie. Co prawda sformułowane zdania nie stwarzają problemów z płynnością czytania, jednak pewne niekonsekwencje w opisie i pomijanie oraz błędy w oznaczeniach nie ułatwiają analizy. Zamieszczone w pracy rysunki wykonane są z właściwą starannością i mają swoje uzasadnienie w tekście. Błędy te obniżają odbiór pracy, jednak nie mogą kwestionować jej wartości. Pod względem metodologii prowadzenia badań rozprawa jest zasadniczo poprawna, choć lepszy opis lub schemat ułatwiłyby recenzję. Literatura jest w miarę aktualna i dobrana zgodnie z tematem pracy. Układ rozprawy i podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest zasadniczo logiczny. Autorka zasadniczo posługuje się właściwymi pojęciami.



Z przedstawionej powyżej oceny poszczególnych części dysertacji wynika, że praca jest oryginalna, logiczna i w miarę spójna merytorycznie. Doktorantka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną i umiejętnościami w prowadzeniu badań naukowych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Przedstawiona powyżej ocena potwierdza oryginalność przedstawionego w pracy zagadnienia naukowego.

#### 4 Wniosek końcowy

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska, **przyczynia się do poszerzenia wiedzy w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna**. Stwierdzam tym samym, działając w oparciu o art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1669), że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Natalii Znojkiwicz pt. „Modelowanie chropowatości powierzchni po frezowaniu kompozytu aluminiowo-ceramicznego”, **spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki**, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria mechaniczna wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 lipca 2018 r. W związku z tym **wniosuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Znojkiwicz i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

