

P. Stehlik

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. Ignacego Łukasiewicza

WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA

Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji

dr hab. inż. Witold HABRAT prof. PRzprofesor 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, 11.08.2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Czyżyckiego pt.

„Analiza odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania stopu aluminium EN AW-7075”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP, z dnia 26.06.2025 r. (DIM.075.189.2025).

1 Charakterystyka podjętej tematyki badawczej oraz celu i zakresu pracy

Tematyka podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr. inż. Jakuba Czyżyckiego koncentruje się na analizie odkształceń elementów cienkościennych wykonywanych ze stopu aluminium EN AW-7075 podczas frezowania w warunkach obróbki konwencjonalnej oraz high-speed machining (HSM). Cienkościenne komponenty, powszechnie stosowane w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym czy kosmicznym, cechuje określony stosunek sztywności do masy. Przekłada się to na podatność na deformacje spowodowane oddziaływaniami mechanicznymi i cieplnymi z procesu obróbki skrawaniem, co stanowi wyzwanie technologiczne w efektywnej produkcji. Zakres merytoryczny pracy wpisuje się ściśle w dyscyplinę inżynierii mechanicznej, z uwzględnieniem aktualnych wyzwań technologicznych przemysłu. Badania w tym obszarze mają duży potencjał zastosowania w przemyśle a opracowane wytyczne mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie w produkcji,

przyczyniając się do poprawy jakości wyrobów i redukcji kosztów. Wpisują się w obecny trend lekkich konstrukcji monolitycznych i dążenie do zwiększania dokładności oraz efektywności procesów wytwórczych.

Odkształcenia cienkościennych komponentów generują bezpośrednie straty w postaci braków oraz skutkują wydłużeniem czasu obróbki wskutek konieczności korekt i zaawansowanej kontroli jakości. Wyniki badań mogą więc stanowić bazę do optymalizacji strategii obróbkowych i projektowania oprzyrządowania w nowoczesnych gałęziach przemysłu, wymagających wysokiej wydajności i powtarzalności przy wąskich tolerancjach wykonania.

Stop aluminium EN AW-7075 wybrany do badań należy do grupy stopów wysokowytrzymałych, szeroko wykorzystywanych w monolitycznych konstrukcjach lotniczych ze względu na bardzo korzystny stosunek wytrzymałości do masy. Obróbka tych materiałów wymaga jednak szczególnie dobrze zaprojektowanej technologii, ponieważ nawet niewielkie zmiany parametrów (posuw, prędkość skrawania, strategia frezowania) mogą istotnie wpływać na poziom uzyskiwanych odkształceń i rozkład naprężeń szczątkowych. Analiza zawarta w rozprawie uwzględnia również aspekty cieplne (rozszerzalność cieplna), które przy wysokich prędkościach skrawania HSM odgrywają istotną rolę w zmianach geometrii elementu w czasie skrawania i po jego zakończeniu. W tym kontekście **zakres merytoryczny recenzowanej pracy doktorskiej należy ocenić jako istotny. Potwierdza to trafność i sensowność podjętej tematyki badawczej**, która wpisuje się w aktualny zakres badań naukowych w obszarze inżynierii mechanicznej. Uzyskane wyniki pracy mają istotne znaczenie nie tylko naukowe ale również aplikacyjne, co przekłada się na potencjał wdrożeniowy chociażby w przemyśle lotniczym.

Tytuł pracy jest zgodny z podjętą tematyką badawczą oraz treścią pracy. Odpowiada przedstawionemu zagadnieniu naukowemu i odzwierciedla główny przedmiot badawczy. **Cel pracy** szczegółowo opisany w rozdziale 3, **jest jasno sformułowany** i dotyczy analizy mechanizmów odkształceń cienkościennych elementów ze stopu EN AW-7075 podczas frezowania, klasyfikacji powstających odkształceń, oceny ich wpływu na dokładność wykonania części oraz porównania efektów obróbki konwencjonalnej i HSM. Zakres badań obejmuje pomiar i analizę zjawisk towarzyszących frezowaniu cienkościennych komponentów oraz weryfikację wpływu parametrów technologicznych, kształtu elementów i wybranych strategii frezowania na poziom odkształceń oraz dokładność wykonania.

Szkoda, że Doktorant nie formułuje bezpośrednio hipotezy. W tym kontekście, na podstawie rozdz. 3 można jednak wywnioskować, że właściwy dobór technologii obróbki skrawaniem (w tym strategii frezowania, parametrów skrawania z uwzględnieniem geometrii elementu – zwłaszcza współczynnika H/L), zarówno w warunkach tzw. frezowania konwencjonalnego jak i HSM, pozwala istotnie ograniczyć odkształcenia cienkościennych elementów aluminiowych, a tym samym

zwiększyć dokładność wymiarowo-kształtową obrabianej części z cechami cienkościennymi.

Nie do końca poprawny jest podział na zakres, metodykę i warunki badań zawarty w rozdz. 3. Autor łączy zakres z warunkami a następnie podaje metodykę. Zasadniczo zakres badań określa ramy badań, metodyka stanowi o ogólnym zarysie z podziałem na metody, techniki i narzędzia, a warunki doprecyzowują już konkretne rozwiązania w obszarze metodyki. Pomimo tej drobnej kwestii można jednak stwierdzić, że nie wpływa to **zasadniczo na spójność pracy, a analiza wyników jest dosyć intuicyjna i logiczna.**

2 Zakres i ocena poszczególnych części realizowanej pracy

Dysertacja została zrealizowana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, której pracownicy znani są m.in. ze znaczącego dorobku naukowego w zakresie zaawansowanych technik obróbki ubytkowej. **Strukturę rozprawy** stanowi 7 numerowanych rozdziałów, w tym wprowadzenie oraz wnioski i plan dalszych badań. Ponadto praca zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Układ pracy jest zasadniczo prawidłowy, choć mam pewne uwagi co do włączenia podrozdziału „3.1. Cel pracy” w rozdział „3. Opis badań”. W mojej opinii cel i zakres pracy powinny stanowić główną nazwę rozdziału, gdyż sam opis badań jest swego rodzaju środkiem prowadzącym do celu, a nie odwrotnie.

We wprowadzeniu do pracy (rozdział pierwszy) Autor wskazał przede wszystkim **tło i uzasadnienie podjęcia badań**. Zwrócił uwagę na dynamiczny rozwój lotnictwa, motoryzacji i przemysłu kosmicznego, który determinuje zapotrzebowanie na monolityczne elementy konstrukcyjne o małej masie i wysokiej sztywności. Podkreślił, że obróbka elementów cienkościennych wiąże się z trudnościami w uzyskaniu wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej z powodu odkształceń powstających w trakcie i po procesie, a także ze względu na negatywny wpływ drgań (w tym samowzbudnych) na jakość powierzchni. Autor krótko uzasadnił również wybór metodyki badań i scharakteryzował zawartość poszczególnych rozdziałów.

W rozdziale drugim Autor przedstawił aktualny stan zagadnienia dotyczący definicji elementów cienkościennych, charakterystyki stopów aluminium oraz strategii obróbki elementów cienkościennych i wynikających z tego odkształceń. Omówił zjawiska wpływające na dokładność wymiarową i kształtową, takie jak obniżona sztywność, drgania, odkształcenia sprężyste, plastyczne i termiczne oraz naprężenia szczątkowe. Zaprezentował on również wybrane wyniki w zakresie metod numerycznych, symulacji i badań eksperymentalnych, służące przewidywaniu odkształceń i optymalizacji parametrów procesu. Generalnie na podstawie rozdz. 2 można stwierdzić, że Autor stworzył kompleksowe **teoretyczne i literaturowe tło**

badan, określając istniejący stan wiedzy, luki badawcze oraz problemy praktyczne, które stały się podstawą do sformułowania celu i zakresu jego pracy. Choć są one dosyć syntetyczne to zapewniają kompleksową wiedzę, potrzebną do analizy dalszych wyników badań. Uwagi do rozdz. 2:

- Na rys. 2.1 – co oznacza „stężenie składnika B [%]”? , czy nie można podać wartości temperatur i zakresu procentowego na osiach?
- Na rys. 2.28 - co reprezentuje opis „chłodzenie” i jak ono jest realizowane?

W rozdziale trzecim „Opis badań” został określony m.in. cel pracy i jej zakres z podziałem na obszar obróbki konwencjonalnej oraz HSM. Ocenę tej części przedstawiono we wcześniejszym punkcie recenzji. Dodatkowo rozdział ten zawiera metodykę i warunki badań. Są one szczegółowo opisane i dobrze wyjaśniają podejście Autora do rozwiązania problemu badawczego. Pozostaje jednak kilka kwestii do doprecyzowania i uzupełnienia:

- Czy w przypadku próbki przedstawionej na rys. 3.1 nie można również uwzględnić parametru długości?
- Czy w tabeli 3.1 nie powinno być „Zakładana (lub nominalna) grubość po obróbce L”, gdyż w przypadku „grubości po obróbce” należałoby uwzględnić również tolerancję wykonania.
- Na str. 46 Autor pisze: „Dla badań w zakresie obróbki konwencjonalnej naddatek na obróbkę zgrubną wynosił 0,2 mm.” Czy nie chodziło w tym przypadku o obróbkę wykończeniową?
- Proszę wyjaśnić zdanie ze str. 47 „Próbki wykonano w wariacie obróbki dokładnej zrealizowanej w dwóch przejściach oraz jednym przejściu”.
- W tabeli 3.9 zamiast posuwu 0,1 mm/ostrze powinno być 0,01 mm/ostrze.

Czwarty rozdział pracy dotyczy wyników i analizy pomiarów wykonanych podczas frezowania elementów cienkościennych ze stopu EN AW-7075 w warunkach obróbki konwencjonalnej ($v_c = 450$ m/min). Autor przedstawił analizę składowych siły całkowitej, która wykazała m.in. tendencję spadku wartości RMS sił wraz ze wzrostem współczynnika H/L, co wynikało z większych ugięć ścianek i tym samym skrawania mniejszej warstwy materiału niż założona. Dokonano również analizy drgań i odkształceń. W obróbce konwencjonalnej dominowały odkształcenia sprężyste, silnie skorelowane z błędami płaskości. Odkształcenia plastyczne i termiczne były niewielkie. Autor określił również wpływ sposobu frezowania na odkształcenia. Wykazał, że frezowanie przeciwbieżne skutkowało nieznacznie mniejszymi odkształceniami, ale pogarszało jakość powierzchni. W ramach tego rozdziału Autor określił również wpływ kształtu elementu cienkościennego na odkształcenia podczas obróbki. Wartościowych wyników dostarczyła również analiza porównawcza ze

stopem tytanu Ti-6Al-4V, która wykazała różnice w przebiegu przemieszczeń, a co za tym idzie analizie odkształceń elementów cienkościennych. Uwagi do rozdz. 4:

- Proszę o uzasadnienie umiejscowienia linii odniesienia (czerwonej przerywanej linii) na rys. 4.30b. Czy nie powinna ona rozpoczynać się w punkcie określonym zakresem 3,6 s?
- Pewne zastrzeżenia budzi sposób pomiaru temperatury, gdyż mierząc z przeciwnej strony obróbki (przy uwzględnieniu oporu cieplnego) pojawia się zmienna w postaci zmniejszania odległości pomiędzy punktem pomiaru a źródłem ciepła, w wyniku zmniejszenia grubości ścianki dla większego stosunku H/L.

Rozdział czwarty kończy się krótkim podsumowaniem, które ma uzasadnienie w wynikach. Analiza jest poprawna i logiczna.

W **rozdziale piątym** Autor przedstawił badania w zakresie obróbki HSM, przy wysokiej prędkości skrawania $v_c = 1400$ m/min. Zakres tych badań obejmuje analizę składowych siły skrawania, pomiary drgań, przemieszczenia i odkształcenia oraz pomiary parametrów chropowatość powierzchni. Pomimo oczekiwanej poprawy, parametry Rz i Rt dla dużych H/L wzrosły wskutek defektów. Pojawiły się również drgania samowzbudne, szczególnie dla większych H/L. Powodowały one charakterystyczne fale i bruzdy na powierzchni oraz wskazane powyżej lokalne pogorszenie chropowatości. Przedstawiono również korelację przebiegów drgań, sił i przemieszczeń z powstawaniem defektów powierzchni.

Zawartość ocenianego rozdziału jest logiczna i prezentuje bardzo dobry poziom merytoryczny. Pozostają jednak pewne kwestie dyskusyjne:

- Zaprezentowane na rys. 5.2 zestawienie wyników RMS składowych siły całkowitej oraz wnioski z niego wynikające, nie są do końca uprawnione ze względu na dodatkowe zmienne (oprócz prędkości skrawania) występujące w zakresie warunków skrawania (prędkość posuwu i geometria narzędzia).
- Na rys. 5.8 – w podpisie występuje zakres 450-1400 m/min. Powinny być wskazane tylko trzy konkretne wartości prędkości dla których opracowano wykres.
- Czy na wykresach np. 5.8-5.10 czas można zastąpić pozycją w osi X?

Dysertacja kończy się **wnioskami**, w których można znaleźć zarówno wnioski poznawcze, utylitarne, jak i wnioski do dalszych badań. Autor stwierdził, że w obróbce konwencjonalnej największy wpływ na dokładność wykonania mają odkształcenia sprężyste spowodowane siłami skrawania, których wartość rośnie wraz ze smukłością elementu. Wykazał, że kształt elementu obrabianego oraz materiał znacząco zmieniają charakter i skalę odkształceń, a w przypadku stopu tytanu istotną rolę odgrywają deformacje termiczne. W obróbce HSM pojawiały się drgania samowzbudne, lokalnie pogarszające jakość powierzchni. Badania wykazały

skuteczność opracowanej metodyki i stanowisk pomiarowych oraz konieczność oceny jakości elementów cienkościennych po obróbce nie tylko na podstawie chropowatości, ale też błędów wymiarowo-kształtowych. Wnioski sformułowane w **rozdziale szóstym** pracy są uzasadnione przeprowadzonymi badaniami i mają istotne znaczenie praktyczne.

W rozdziale siódmym (który w mojej ocenie powinien być włączony do rozdziału szóstego) Autor przedstawił plan dalszych badań obejmujący m.in. eliminacją drgań, rozszerzenie metod pomiarów przemieszczeń i temperatur oraz uwzględnienie pomiaru stanu naprężeń po obróbce.

Literatura zamieszczona w pracy jest aktualna i obszerna. Doktorant odwołuje się do 146 pozycji, w tym 5 współautorskich.

Praca jest staranna i na bardzo dobrym poziomie. Autor dobrze syntetyzuje wiedzę i prezentuje wyniki. Występują drobne błędy o charakterze stylistycznym i redakcyjnym, które jednak swoją liczbą nie odbiegają od średniej tego rodzaju opracowań i nie wpływają na ogólną ocenę pracy, przykładowo:

- str. 41 – niefortunne zdania: „Opracowaniu niestety brakuje szerszego spojrzenia na dorobek naukowy poza nasz kraj”, „Dobrym przykładem w jaki powinno być wykonanie takie (...)”,

- str. 44 – niefortunne zdanie „Warianty próbek będących zakresem badań (...)”,

- tab. 3.3 – brak indeksu górnego/dolnego w wybranych parametrach i jednostkach,

- rys. 4.3 – oznaczenia na osi Y nie do końca zgadzają się z oznaczeniami w legendzie,

- str. 63 – niefortunny zwrot „w niewielkim stopniu mniejszymi drganiami”,

- rys. 4.21 – zamiast „chropowatość” powinno być „parametr chropowatości”,

- choć sformułowanie „błąd płaskości” jest poprawne merytorycznie, jednak z perspektywy ścisłego nazewnictwa technicznego, właściwszym i bardziej precyzyjnym terminem jest „odchyłka płaskości”.

3 Ogólna ocena pracy

Doktorant podjął się istotnego zagadnienia analizy mechanizmów odkształceń cienkościennych elementów ze stopu EN AW-7075. Należy zaznaczyć, że **cel rozprawy został osiągnięty**, a merytoryczna część pracy jest na bardzo dobrym poziomie.

Pod względem edytorskim praca napisana jest poprawnym językiem a sformułowane zdania nie stwarzają problemów z płynnością czytania i analizy. Zamieszczone w pracy rysunki wykonane są z właściwą starannością i mają swoje uzasadnienie w tekście. Pewne drobne błędy stylistyczne, literowe czy redakcyjne nie umniejszają jakości dysertacji, nie mogą więc stanowić podstawy do kwestionowania wartości pracy. Pod względem metodologii prowadzenia badań rozprawa jest

poprawna. Literatura jest aktualna i dobrana zgodnie z tematem pracy. Układ rozprawy i podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest zasadniczo logiczny. Autor posługuje się właściwymi pojęciami.

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

4 Wniosek końcowy

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska **przyczynia się do poszerzenia wiedzy w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna**, a przede wszystkim w zakresie obróbki elementów cienkościennych z uwzględnieniem analizy odkształceń.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Czyżyckiego pt. „Analiza odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania stopu aluminium EN AW-7075”, **spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. Nr 2018 poz. 1668 z późn. zm.) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce**, 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 **wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony**. Biorąc jednocześnie pod uwagę szeroki zakres, kompleksowość, oryginalność i metodyczne dopracowane badania nad mechanizmami odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania, które łączy analizę teoretyczną z szerokim zakresem pomiarów eksperymentalnych **wnioskuję jednocześnie o wyróżnienie pracy**. Autor opracował i zastosował autorskie stanowiska badawcze pozwalające jednocześnie monitorować siły, drgania, przemieszczenia, temperaturę oraz dokładność geometryczną, co daje pełny obraz zjawisk zachodzących w procesie. Wyniki mają wysoką wartość naukową i praktyczną, wskazując konkretne rozwiązania technologiczne możliwe do wdrożenia w przemyśle, a poziom merytoryczny i staranność pracy wykraczają poza standardowy zakres dysertacji doktorskiej.



