

Dr hab. inż. Janusz Śliwka, prof. PŚ
Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Budowy Maszyn

Gliwice, 31.07.2025



Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Czyżyckiego
pt. **Analiza odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania stopu
aluminium EN AW-7075**

Podstawa prawna oceny:

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 25 czerwca 2025 nr 2/III/06/2025 przedstawiona w piśmie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP z dnia 26.06.2025 (DIM.075.189.2025).

1. Uwagi ogólne

Praca doktorska mgr inż. Jakuba Czyżyckiego została wykonana pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Pawła Twardowskiego, prof. PP. Praca zawiera 105 stron ze spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem oznaczeń, siedmioma głównymi rozdziałami oraz spisem literatury zawierającym 146 pozycji.

Praca poświęcona jest ważnej, z praktycznego punktu widzenia, tematyce dokładności obróbki frezowaniem elementów cienkościennych. Obróbka elementów cienkościennych stanowi jedno z kluczowych zagadnień współczesnej technologii obróbki skrawaniem. W dobie dynamicznego rozwoju przemysłu, miniaturyzacji oraz dążenia do optymalizacji masy i wytrzymałości konstrukcji, rośnie zapotrzebowanie na precyzyjne i efektywne metody obróbki detali o cienkich ściankach. Znaczenie tego tematu wynika zarówno z wyzwań technologicznych, jak i z rosnących wymagań jakościowych i ekonomicznych. Elementy cienkościenne są powszechnie stosowane w branżach takich jak lotnictwo, motoryzacja, kosmonautyka, medycyna czy elektronika. Ich główną zaletą jest niska masa przy zachowaniu odpowiednich właściwości mechanicznych. Jednakże obróbka takich detali wiąże się

z wieloma trudnościami, m.in. podatnością na drgania, odkształcenia sprężyste i plastyczne, a przede wszystkim problemami z uzyskaniem wymaganej dokładności wymiarowej i jakości powierzchni. Wymusza to stosowanie zaawansowanych strategii frezowania, odpowiedniego doboru parametrów skrawania, narzędzi oraz systemów mocowania. W kontekście Przemysłu 4.0 frezowanie cienkościennych elementów staje się również polem intensywnych badań nad cyfrowym modelowaniem procesów, symulacjami MES, adaptacyjnym sterowaniem obrabiarkami CNC oraz integracją systemów monitorowania w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwe jest nie tylko zwiększenie efektywności produkcji, ale także minimalizacja strat materiałowych i energetycznych. Warto również podkreślić, stale nabierający znaczenia, aspekt ekologiczny – lżejsze komponenty przyczyniają się do zmniejszenia zużycia paliwa i emisji CO₂, co jest istotne w kontekście zrównoważonego rozwoju. Wszystko to sprawia, że tematyka frezowania elementów cienkościennych pozostaje aktualna i niezwykle istotna zarówno z punktu widzenia nauki, jak i praktyki przemysłowej.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Czyżyckiego stwierdzam, że jej tematyka i zakres kwalifikują ją do dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której Wydział Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej ma uprawnienia do nadawania stopnia doktora nauk technicznych.

2. Charakterystyka i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska rozpoczyna się syntetycznym wprowadzeniem zawartym w pierwszym rozdziale, w którym Autor precyzyjnie definiuje przedmiot badań, osadza go w kontekście naukowym oraz przedstawia logiczną strukturę pracy, opartą na przejrzystym podziale treści na kolejne rozdziały.

W rozdziale drugim, który stanowi przegląd stanu wiedzy, bardzo szczegółowo omówiono zagadnienia związane z obróbką elementów cienkościennych, poczynając od definicji elementu cienkościennego poprzez charakterystykę i skrawalność stopów aluminium do strategii frezowania i predykcji dokładności obróbki tego typu elementów. W podsumowaniu tego rozdziału Autor zauważa, że „**W literaturze można wskazać braki lub niejednoznaczne wyjaśnienia które z punktu poznawczego są ważnymi aspektami:**

- niewystarczająca analiza procesu skrawania elementów cienkościennych. Wiele badań skupia się tylko na osiągnięciu wymaganych dokładności,
- brak wyczerpujących informacji w temacie odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania,
- zagadnienie temperatury elementów cienkościennych traktowane jest marginalnie,
- brak analizy związków przyczynowo skutkowych wyjaśniających mechanizmy odkształceń,
- zbyt wąski zakres oceny dokładności wykonania np. tylko na podstawie wskaźników w chropowatości powierzchni.”

Należy w pełni zgodzić się z tymi stwierdzeniami. Rozdział, liczący trzydzieści stron, został podzielony na podrozdziały, a omawiane zagadnienia zilustrowano odpowiednimi rysunkami, co z pewnością ułatwia przyswajanie zagadnień związanych z tematem pracy.

W rozdziale 3. przedstawiono opis planowanych do wykonania badań z podziałem na badania podczas obróbki konwencjonalnej i badania podczas obróbki High Speed Machining (HSM). Rozdział ten rozpoczyna się bardzo istotnym z punktu widzenia pracy podrozdziałem dotyczącym celu pracy. Cel pracy został sformułowany następująco: „...**celem pracy jest analiza mechanizmów odkształceń cienkościennych przedmiotów ze stopu EN AW-7075 podczas frezowania w warunkach obróbki dokładnej**” Dla realizacji głównego celu pracy przyjęto cele szczegółowe:

- klasyfikację odkształceń powstających podczas frezowania elementów cienkościennych w zakresie obróbki dokładnej,
- pomiar oraz analizę zjawisk towarzyszących frezowaniu tego typu elementów oraz ich wpływ na dokładność wykonania,
- badania w zakresie obróbki konwencjonalnej oraz HSM,
- analizę wpływu współczynnika H/L elementu cienkościennego na jego dokładność wykonania.

Główny cel pracy, cele szczegółowe oraz opisane w niniejszym rozdziale podejście badawcze wraz z zakresem planowanych badań pozostają w zgodzie z charakterem poruszanych zagadnień, wykazując spójność oraz adekwatność względem przyjętej tematyki.

Rozdział czwarty opisuje badania przeprowadzone w zakresie obróbki konwencjonalnej elementów cienkościennych. Został on podzielony na podrozdziały dotyczące analiz sił i drgań, klasyfikacji odkształceń, sposobu frezowania, dokładności obróbki, wpływu kształtu elementu cienkościennego, wpływ materiału obrabianego oraz zagadnienie temperatury elementu obrabianego. Rozdział kończy się syntetycznym podsumowaniem zawierającym spostrzeżenia poczynione podczas przeprowadzonych badań.

W rozdziale piątym opisano badania przeprowadzone z podczas obróbki HSM elementów cienkościennych. Jego struktura nawiązuje do struktury rozdziału czwartego. Rozdział ten również zakończono zwięzłym podsumowaniem zawierającym spostrzeżenia poczynione podczas przeprowadzonych badań.

Rozdział szósty, pełniący funkcję podsumowania pracy, zawiera wnioski z przeprowadzonych badań, przedstawione w formie punktowej i podzielone na: wnioski poznawcze, użytkowe oraz dotyczące dalszych kierunków badań.

W ostatnim, siódmym rozdziale Autor przedstawia kierunki dalszych badań, koncentrując się na kolejnych możliwych do przeprowadzenia badaniach oraz możliwościach zastosowania nowych metod pomiarowych. W opinii recenzenta warto byłoby rozważyć uwzględnienie badań nad modelowaniem procesu obróbki elementów cienkościennych. Opracowanie wiarygodnych modeli numerycznych umożliwiłoby m.in. uogólnienie wniosków na inne materiały obrabiane, jak również oszacowanie procentowego wpływu podatności materiału oraz charakterystyki obrabiarki i narzędzia na wynikową dokładność obróbki.

3. Ocena redakcyjna

Opracowanie redakcyjne recenzowanej dysertacji jest na dobrym poziomie. Struktura pracy jest logiczna i dobrze przemyślana, a podział na rozdziały jest prawidłowy i wynika z naturalnego toku myślenia. Również szata graficzna jest przejrzysta i dopracowana, a zamieszczone wykresy są, poza małymi wyjątkami, czytelne i wyraźne. Jednakże, mimo tego, doktorant nie ustrzegł się kilku błędów związanych ze stroną redakcyjną pracy. Do najistotniejszych należy zaliczyć:

1. Różna szerokość akapitów występująca w pracy, a czasami nawet na jednej stronie np. na stronach 13 i 19.
2. Częste błędy interpunkcyjne, zwłaszcza brak przecinków np. strona 38 w zdaniu „Po zamocowaniu półfabrykatu pręty wspornikowe ustawiane są w miejscach podparcia a następnie materiał w którym są częściowo zanurzone jest schładzany usztywniając pręty.” brakuje pięciu przecinków, lub strona 40 w zdaniu „Pomiar temperatury zrealizowany szeregiem termopar porównano do wyników symulacyjnych z bardzo zadowalającym niewielkim błędem w zakresie 5-15%.” brakuje trzech przecinków. Przed kolejną publikacją wyników pracy proponuję skrupulatnie sprawdzić interpunkcję w tekście.
3. Błędy fleksyjne np. strona 13 „mała gęstością” powinno być „mała gęstość”, strona 24 „Jedną z metod pasywną jest zmiana tłumienia elementu cienkościennego...” powinno być: „Jedną z metod pasywnych jest zmiana tłumienia elementu cienkościennego...”, strona 27 „...a zamocowanie ich na elemencie obrabianym z może wpłynąć na wartość tłumienia...” powinno być: „...a zamocowanie ich na elemencie obrabianym może wpłynąć na wartość tłumienia...”, strona 30 „Modelowanie numeryczne wymaga analizowania zagadnień z wielu dziedzin co sprawia ich duże skomplikowanie.” powinno być: „Modelowanie numeryczne wymaga analizowania zagadnień z wielu dziedzin, co powoduje jego duże skomplikowanie.”, strona 38 „...efektem tego były mniejsze deformacji o 37,2%.” powinno być: „...efektem tego były deformacje mniejsze o 37,2%.”, strona 35 „Warstwę naddatku podzielili na wiele bloków...” powinno być: „Warstwę naddatku podzielono na wiele bloków...”, strona 49 „...zapewniał stałą odległość wiązki...” powinno być: „...zapewniał stałą odległość wiązki...” oraz ta sama strona „...opis każdego z przyrządu sporządzono...” powinno być: „...opis każdego z przyrządów sporządzono...”.
4. Niefortunne sformułowania np. strona 38 „Bardziej zaawansowanym sposobem podpierania elementu podatnego w konkretnych punktach są wyniki badań.” czy strona 43 „W celu udowodnienia zaproponowanego celu rozprawy...”.
5. Słabo czytelny rysunek nr 2.29 na stronie 39.

Przytoczone w recenzji uwagi redakcyjne, nie obniżają wysokiej ogólnej oceny całej pracy a mają jedynie charakter korektorski i mogą być przydatne Autorowi przy późniejszym publikowaniu wyników swoich badań.

4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Podczas lektury rozprawy nasuwają się wymienione poniżej uwagi i pytania dotyczące merytorycznej strony dysertacji. Pragnę zaznaczyć, że większość z nich ma charakter dyskusyjny.

1. Na stronie 41 zamieszczono rysunek nr 2.31. Z opisu wynika, że jest on propozycją Autora rozprawy wynikającą z analizy literatury. Jak w takim razie można wytłumaczyć mechanizm wpływu odkształceń termicznych na chropowatość powierzchni przedmiotu obrabianego?
2. W rozdziale 4.3. przeprowadzono klasyfikację odkształceń powstających w elementach cienkościennych podczas procesu frezowania. Zaobserwowano, że niektóre z tych odkształceń utrzymują się po zakończeniu obróbki i nie zanikają z upływem czasu (co jest ilustrowane na rysunku 4.11. jako odcinek CDE). Zjawisko to zidentyfikowano jako odkształcenia plastyczne. Powstaje zatem pytanie: jaki jest mechanizm leżący u podstaw powstawania tych odkształceń trwałych?
3. W obróbce elementów cienkościennych na dokładność wpływa nie tylko sztywność ścianek detalu, ale również sztywność narzędzia, uchwytu i w reszcie całej obrabiarki. Zazwyczaj sztywność obrabiarki i uchwytu jest na tyle duża, by pominąć ją w tego typu analizach bez popełniania znaczącego błędu. Rodzi się jednak pytanie: Czy uzasadnione jest pominięcie sztywności narzędzia przy ocenie wypadkowej dokładności frezowania takich elementów?
4. Na stronie 65, na rysunku nr 4.10, jak również na innych ilustracjach zawartych w pracy, przedstawiono układ współrzędnych odniesiony do przekroju przedmiotu obrabianego. Należy zwrócić uwagę na rozbieżność pomiędzy założonym zwrotem osi Y w układzie współrzędnych a wartościami przedstawionymi na przebiegu czasowym umieszczonym na tym samym wykresie. Wartości przypisane dodatniemu zwrotowi osi Y na przebiegu czasowym przyjmują wartości ujemne. Rodzi to wątpliwości co do poprawności przyjętej orientacji osi układu współrzędnych.
5. Na stronie 54 zaproponowano sposób określania odkształceń sprężystych. „Odczyt odkształceń sprężystych Δl_s został wykonany na podstawie średniej z pięciu maksymalnych wartości przemieszczenia w kierunku dodatnim osi Y względem wartości zerowej przemieszczenia.” Czy przyjęcie takiego sposobu wyznaczenia odkształceń nie spowoduje zawyżenia obliczonych wartości w stosunku do wartości rzeczywistych? Wybierając maksymalne/minimalne zarejestrowane wartości narażamy się na ryzyko, że wybrane piki są spowodowane drganiami albo zakłóceniami zarejestrowanymi w trakcie pomiaru. Dodatkowo na rysunku nr 3.18 ilustrującym wyznaczanie odkształceń wybrano wartości minimalne a nie maksymalne przemieszczeń w osi Y (co poruszono już w punkcie nr 4).
6. Czym Autor tłumaczy zależność błędów płaskości po obróbce zgrubnej od grubości ścianki (rysunek nr. 4.15)? Pomijając pomiar dla ścianki o grubości 1,7 mm zauważamy, że wraz ze zmniejszaniem się grubości ścianki maleje błąd płaskości. Dla ścianki 2,2 mm błąd ten

wynosi 0,02 mm a dla ścianki 0,7 mm jest o połowę mniejszy czyli wynosi 0,01 mm. Intuicyjnie wydaje się, że powinniśmy mieć do czynienia z zależnością odwrotną, tak jak to widać przy badaniach podczas obróbki dokładnej (rysunek nr 4.24.) i obróbki HSM (rysunek nr 5.11.).

7. W podrozdziale 4.5.1. Dokładność wykonania po obróbce zgrubnej, Autor podsumowując pisze: „Wskazuje to, że wskaźnik dokładności wykonania, jakim jest grubość ścianki po obróbce w dalszych badaniach nie może być brany pod uwagę z taką samą ważnością jak błędy płaskości i prostoliniowości.” Oczywiście Autor ma możliwość rozszerzenia badań o analizę obróbki zgrubnej, mimo że głównym celem pracy jest analiza obróbki dokładnej. Niemniej jednak, czy nie warto byłoby zapewnić bardziej przewidywalnych warunków dla zasadniczych dla realizacji celu pracy badań? Starannie przygotowane próbki przed etapem obróbki dokładnej pozwoliłyby precyzyjnie określić wpływ tej operacji na uzyskiwaną dokładność.
8. Autor pracy używa określenia „stan stabilny” w odniesieniu do odkształceń ścianki przedmiotu obrabianego podczas frezowania (np. na stronie 66). Termin „stabilność” zwykle odnosi się do układów automatyki, dlatego w tym kontekście bardziej precyzyjne będą określenia „stan początkowy” lub „stan wyjściowy”.
9. Na stronie 74 Autor pisze, odnosząc się do błędu grubości: „W tym przypadku grubość ścianki na szczycie jest ok. 3,5 razy większa od tej na dnie.” Czy chodzi tutaj o grubość ścianki, czy o błąd grubości ścianki?

5. Podsumowanie i ocena końcowa

W mojej ocenie recenzowana praca nie zawiera istotnych uchybień o charakterze merytorycznym. Zgłoszone uprzednio uwagi (opisane w punkcie 4.) mają raczej charakter uzupełniający i dyskusyjny niż krytyczny, i nie wpływają negatywnie na ogólną wartość naukową opracowania. Co istotne, nie podważają one faktu, iż Autor skutecznie zrealizował założony cel badawczy. Należy również zaznaczyć, że wskazane kwestie wynikają po części z wysokiego stopnia złożoności podjętej tematyki. Dysertacja porusza istotny i aktualny temat, wpisujący się w nurt współczesnych badań z zakresu technologii obróbki ubytkowej. Autor podjął się analizy zagadnień związanych z obróbką frezowaniem elementów cienkościennych, które ze względu na swoją strukturę stanowią wyzwanie technologiczne. Uzyskane wyniki badań nie tylko wnoszą wartość poznawczą, ale także posiadają wymiar aplikacyjny — mogą być wykorzystane jako solidna baza do dalszych, pogłębionych prac naukowych w tym budowy modeli numerycznych oraz praktycznych wdrożeń w zakresie optymalizacji procesów obróbki takich elementów. **Do oryginalnych i istotnych elementów pracy zaliczam:**

- opracowanie i budowę stanowiska badawczego służącego do pomiarów podczas obróbki elementów cienkościennych,
- analizę przemieszczeń elementów cienkościennych podczas obróbki pod kątem klasyfikacji powstających odkształceń,

- analizę dokładności wykonania (prostoliniowości, płaskości, grubości, chropowatości oraz topografii powierzchni) elementów cienkościennych.

Reasumując stwierdzam, że **rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Czyżyckiego, pt. „Analiza odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania stopu aluminium EN AW-7075” spełnia wymagania** Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2003r. Nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). Merytorycznie praca odpowiada standardom stawianym pracom doktorskim w naukach technicznych w dyscyplinie " Inżynieria mechaniczna" i na tej podstawie **stawiam wniosek o dopuszczenie przedmiotowej pracy do publicznej obrony.**

