

Dr hab. inż. Krzysztof Zak, prof. PO

Opole, dnia 12.08.2025

Wydział Mechaniczny  
Katedra Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa  
Politechnika Opolska



### Recenzja

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

Promotor: dr hab. inż. Paweł TWARDOWSKI, prof. PP

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP nr DIM.075.189.2025 z dnia 26.06.2025 r.

### 1. Tematyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Czyżyckiego jest ściśle związana z obszarem inżynierii mechanicznej, koncentrując się na analizie mechanizmów odkształceń cienkościennych elementów wykonanych ze stopu aluminium EN AW-7075 podczas procesu frezowania. Szczególną uwagę poświęcono warunkom obróbki konwencjonalnej oraz HSM (**High Speed Machining**).

Głównym celem pracy była klasyfikacja powstających odkształceń, a także pomiary i analiza zjawisk towarzyszących frezowaniu cienkościennych elementów w trakcie obróbki dokładnej. Przeanalizowano również wpływ współczynnika  $H/L$  na dokładność wykonania elementów po frezowaniu.

W obróbce skrawaniem kluczowe znaczenie ma znajomość złożonych oddziaływań mechanicznych, termicznych i geometrycznych, które bezpośrednio wpływają na dokładność i jakość finalnego wyrobu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku frezowania elementów cienkościennych, których grubość jest znacznie mniejsza w porównaniu z innymi wymiarami, takimi jak wysokość czy długość.

Na podstawie analizy literatury autor dysertacji wyróżnił trzy klasy grubości elementów cienkościennych w zależności od stosunku wysokości do grubości ścianek:

- niski stosunek  $H/L < 15:1$ ,
- umiarkowany stosunek  $H/L < 30:1$ ,
- wysoki stosunek  $H/L > 30:1$ .

W literaturze technicznej powszechnie stosuje się również tzw. zasadę 8:1, zgodnie z którą frezowanie ścianki o grubości 1 mm jest zalecane przy głębokości skrawania ( $a_p$ ) nieprzekraczającej 8 mm. W pracy omówiono także inne wytyczne technologiczne

mające na celu minimalizację odkształceń oraz zapewnienie wymaganych tolerancji wymiarowo-kształtowych.

Frezowanie elementów cienkościennych obejmuje m.in. obróbkę cienkich ścianek, kieszeni, żeberk wzmacniających, a także kanałów i szczelin przeznaczonych do prowadzenia przewodów, cieczy lub powietrza. Obróbka tego typu konstrukcji, odgrywa szczególną rolę w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i kosmicznym, umożliwiając redukcję masy przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wytrzymałości. Monolityczne wykonanie takich części eliminuje konieczność stosowania dodatkowych elementów montażowych, co ogranicza liczbę operacji technologicznych oraz obniża koszty produkcji.

Tematyka rozprawy ma istotne znaczenie zarówno z punktu widzenia badań podstawowych, jak i zastosowań praktycznych, zwłaszcza w branżach przemysłu wymagających wysokiej precyzji i niezawodności. Autor podjął się ambitnego i trafnie sformułowanego zadania badawczego, obejmującego identyfikację i klasyfikację mechanizmów odkształceń cienkościennych elementów w rzeczywistych warunkach technologicznych, co stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy z zakresu nowoczesnych metod obróbki skrawaniem.

Podsumowując, uznaję tematykę rozprawy za aktualną, ważną i posiadającą duży potencjał aplikacyjny. Praca mgr inż. Jakuba Czyżyckiego została przygotowana na wysokim poziomie merytorycznym i zasługuje na pozytywną ocenę.

## **2. Ogólna ocena treści, układu i zakresu rozprawy**

Rozprawa liczy 105 stron i składa się z 7 rozdziałów wraz z podrozdziałami, spisu treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu literatury obejmującego 146 pozycji.

Rozdział 1 **Wprowadzenie** do rozprawy doktorskiej, Autor wprowadza czytelnika w tematykę obróbki skrawaniem cienkościennych elementów wykonanych z aluminium EN AW-7075 w którym uzasadnia wybór tematu wraz z odwołaniem do realnych potrzeb przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego, charakteryzuje badany materiał dokonuje przeglądu problematyki deformacji powstających podczas frezowania oraz wskazuje główne cele rozprawy.

Rozdział 2 **Aktualny Stan Zagadnienia** zawiera cztery podrozdziały, w których Autor przedstawia obszerną i dobrze udokumentowaną analizę literaturową dotyczącą frezowania elementów cienkościennych, ze szczególnym uwzględnieniem stopu aluminium EN AW-7075. Treść została uporządkowana w sposób logiczny, z zachowaniem przejrzystej struktury tematycznej, co ułatwia odbiór oraz zrozumienie przedstawionych zagadnień.

Autor rozpoczyna od jednoznacznego zdefiniowania pojęcia elementów cienkościennych, wskazując różne kryteria klasyfikacyjne (np. stosunek wysokości do grubości ścianek), oraz prezentując ich zastosowanie w praktyce przemysłowej, zwłaszcza w lotnictwie, motoryzacji i przemyśle kosmicznym. Następnie dokonuje szczegółowej charakterystyki materiałów zwłaszcza stopów aluminium omawiając ich właściwości mechaniczne, strukturalne oraz wpływ dodatków stopowych na skrawalność i jakość powierzchni po obróbce.

W dalszej części rozdziału szczegółowo opisano problemy technologiczne związane z obróbką elementów cienkościennych, w tym zjawiska odkształceń (sprężystych i plastycznych), błędy wymiarowe, wpływ temperatury, a także kwestie związane z mocowaniem i sztywnością elementu podczas skrawania. Osobny, bogato rozwinięty fragment poświęcono drganiom (podrozdział 2.3.2) zarówno swobodnym, wymuszonym, jak i samowzbudnym które stanowią istotne wyzwanie podczas obróbki tego typu części. Przedstawione zostały także mechanizmy ich powstawania, modele analityczne oraz wybrane metody wykrywania i zapobiegania.

Na uwagę zasługuje również analiza strategii frezowania, autor przedstawia wpływ kierunku frezowania (współbieżne/przeciwbieżne), różnice między obróbką zgrubną i wykańczającą oraz znaczenie odpowiedniego planowania procesu w kontekście uzyskania wymaganej dokładności. W końcowej części rozdziału poruszono zagadnienie predykcji dokładności wykonania, wskazując na kierunki rozwoju modeli obliczeniowych i znaczenie danych geometrycznych oraz materiałowych w tego typu analizach.

Rozdział kończy się podsumowaniem przeglądu literatury, w którym autor trafnie identyfikuje istniejące luki badawcze w tym niedostateczne uwzględnienie wpływu temperatury w dotychczasowych pracach oraz powszechne stosowanie uproszczonych modeli geometrycznych, które mogą zniekształcać realne wyniki. Wskazane braki stanowią jednocześnie uzasadnienie dla celowości podjętych przez autora badań eksperymentalnych.

Pod względem merytorycznym rozdział prezentuje wysoki poziom, cechuje się szerokim zakresem tematycznym, aktualnością źródeł oraz umiejętnym ich wykorzystaniem. Praca dowodzi, że autor posiada dogłębną znajomość badanego zagadnienia oraz potrafi krytycznie analizować literaturę przedmiotu. Tym samym rozdział ten spełnia wszystkie wymagania stawiane części teoretycznej pracy doktorskiej i stanowi solidne podstawy do dalszej części rozprawy, obejmującej badania własne. Podsumowując, rozdział 2 został przedstawiony w sposób czytelny i kompletny, jasno określając cele i zakres badań.

W rozdziale 3 **Opis Badań** autor w sposób logiczny i przejrzysty wprowadza czytelnika w część empiryczną rozprawy. Tekst prowadzi od ogólnego celu badań,

przez szczegółowe warunki i metodykę, aż po opis przebiegu eksperymentów. Taki układ ułatwia zrozumienie, w jaki sposób poszczególne etapy prac odpowiadają na problemy badawcze sformułowane we wstępie. Opis podzielono na dwie części dotyczącą obróbki konwencjonalnej oraz obróbki HSM, co pozwala na czytelne rozróżnienie zakresów badań.

Na szczególną uwagę zasługuje precyzyjny opis warunków prowadzenia badań oraz szczegółowe parametry zastosowanych narzędzi i stanowisk pomiarowych. Dzięki temu rozdział spełnia kryteria transparentności i pozwala na powtórzenie eksperymentów w przyszłych pracach.

Mocną stroną jest także obszerne omówienie zmiennych i parametrów technologicznych, co pokazuje wysoki poziom świadomości metodycznej autora. Opis został wzbogacony o wystarczającą ilość szczegółów technicznych, aby czytelnik mógł w pełni zrozumieć logikę doboru metod.

Jednakże, mimo wysokiego poziomu merytorycznego, rozdział ma kilka słabszych stron. Brakuje większej liczby wizualizacji (tabel, schematów czy diagramów) syntetyzujących najważniejsze informacje, co mogłoby znacząco zwiększyć przystępność tekstu. Ponadto autor w niewielkim stopniu odnosi się do ograniczeń zastosowanych metod badawczych, potencjalnych źródeł błędów, wpływu czynników zakłócających czy ograniczeń w uogólnianiu wyników. Warto byłoby także mocniej zaakcentować ewentualny wpływ jednorodności próby badawczej na interpretację rezultatów.

Podsumowując, rozdział 3 jest solidną i rzetelną częścią metodologiczną pracy, która jasno dokumentuje sposób przeprowadzenia badań.

Rozdział 4 rozprawy przedstawia wyniki kompleksowych badań wpływu parametrów i strategii frezowania na odkształcenia oraz dokładność wykonania elementów cienkościennych dla obróbki konwencjonalnej. Analizowano składowe siły całkowitej, drgania, przemieszczenia, błędy kształtu (płaskość, prostoliniowość, grubość) oraz chropowatość powierzchni, a także wpływ kształtu elementu, rodzaju materiału i temperatury na proces obróbki.

Autor wykazał, że wzrost stosunku wysokości do grubości ścianki ( $H/L$ ) powoduje zwiększenie odkształceń sprężystych i podatności na drgania, co skutkuje skrawaniem cieńszej warstwy materiału niż zakładano oraz obniżeniem sił skrawania. Frezowanie przeciwbieżne daje nieco mniejsze odkształcenia (5–20%), co wykazał autor, lecz powoduje to pogorszenie jakości powierzchni, przez co frezowanie współbieżne jest korzystniejsze dla uzyskania niskiej chropowatości.

Zidentyfikowano i sklasyfikowano odkształcenia sprężyste ( $\Delta/s$ ), plastyczne ( $\Delta/p$ ) i termiczne ( $\Delta/T$ ). Autor wykazał, że na dokładność wykonania elementów mają wpływ odkształcenia sprężyste, które silnie korelują z błędami płaskości jak również odkształcenia termiczne są istotne zwłaszcza w przypadku stopu tytanu Ti6Al4V z

powodu jego niskiej przewodności cieplnej i długiego czasu wychładzania w porównaniu do aluminium EN AW-7075.

Badania potwierdziły, że kształt elementu ma znaczący wpływ na deformacje – ścianki swobodne ulegają znacznie większym odkształceniom niż złożone, a w pewnych warunkach może dojść do skrawania warstwy nadwymiarowej. Pomiaru temperatury i przemieszczeń pozwoliły ilościowo określić wpływ zjawisk cieplnych na proces frezowania.

**Należy jednak zauważyć, że w analizie wyników badań niektóre zjawiska i wnioski powtarzają się kilkakrotnie, co utrudnia szybkie wyodrębnienie najważniejszych informacji. Ponadto brakuje szerszych odniesień do kontekstu literaturowego, mimo że rozdział oparto na wcześniejszym przeglądzie literatury, w części wynikowej rzadko porównuje się uzyskane wyniki z danymi innych autorów, co mogłoby wzbogacić interpretację trendów i wartości pomiarowych.**

W podsumowaniu tego rozdziału doktorant trafnie zauważył, że dla elementów cienkościennych kluczowe dla jakości są odkształcenia sprężyste, a strategia obróbki powinna minimalizować ich wartość, uwzględniając jednocześnie ryzyko pogorszenia jakości powierzchni w przypadku frezowania przeciwbieżnego.

W rozdziale 5 doktorant omówił wyniki badań dotyczące wpływu obróbki HSM (*High Speed Machining*) na jakość wykonania elementów cienkościennych, w nawiązaniu do wcześniejszych analiz dla obróbki konwencjonalnej. Autor przeprowadził pomiary sił skrawania, drgań, przemieszczeń, błędów płaskości, błędów grubości oraz chropowatości powierzchni, stosując identyczne kryteria oceny jak w rozdziale 4, co umożliwiło bezpośrednie porównanie obu metod.

W dysertacji wskazano, że HSM pozwala na redukcję odkształceń sprężystych oraz błędów płaskości i grubości, szczególnie przy niższych wartościach stosunku wysokości do grubości ścianki ( $H/L$ ). Jednak przy większych wartościach  $H/L$  obróbka HSM jest bardziej podatna na drgania samowzbudne, co prowadzi do wzrostu chropowatości i pogorszenia jakości powierzchni. Analiza drgań wykazała ich istotny wpływ na dokładność wymiarową i stan powierzchni, a ich ograniczenie stanowi kluczowy warunek uzyskania wysokiej jakości w technologii HSM.

W rozdziale typ autor potwierdza, że dobór strategii HSM wymaga kompromisu między prędkością obróbki a stabilnością procesu, szczególnie w przypadku elementów cienkościennych. Autor podkreśla konieczność dalszych badań nad metodami redukcji drgań oraz optymalizacji parametrów skrawania w tym trybie.

**Należy jednak zauważyć, że podobnie jak w rozdziale 4 w niniejszym rozdziale niektóre fragmenty analiz są nadmiernie rozbudowane i powtarzają się. Ponadto analiza wniosków opiera się głównie na danych własnych, przy niewielkiej liczbie porównań z wynikami innych badaczy.**

Rozdziały 6 i 7 dysertacji stanowią podsumowanie przeprowadzonych badań oraz prezentację wniosków końcowych, które zostały sformułowane w sposób trafny i spójny z uzyskanymi wynikami. Przedstawiony w rozdziale 7 plan dalszych prac badawczych również należy uznać za zasadny, gdyż stwarza możliwość skuteczniejszej realizacji kolejnych etapów badań nad obróbką elementów cienkościennych metodą frezowania.

**Spis Literatury** obejmuje zestawienie łącznie 146 pozycji, zarówno książek, artykułów naukowych, rozpraw doktorskich oraz norm. **Dobór literatury uważam za poprawny i aktualny.** W przedstawionej literaturze można również znaleźć opracowania współautorskie mgr inż Jakuba Czyżyckiego.

Kompozycja rozprawy zasługuje na ocenę pozytywną. Autor poprawnie ustalił kolejność rozdziałów oraz w większości przypadków dokonał prawidłowego podziału treści. Styl pracy jest komunikatywny, choć miejscami brakuje porównań (co zostało już wcześniej zauważone). Praca zawiera liczne ilustracje, które wspierają przekaz. Pod względem edytorskim w niektórych miejscach brakowało precyzyjnego opisu wykresów (np. jednostek, legend).

Powyższe niedoskonałości mają jednak znaczenie drugorzędne i nie umniejszają znaczących walorów naukowych pracy.

Podsumowując, główną zaletą rozprawy jest jej **oryginalność**, która wynika z kompleksowego podejścia do problematyki **frezowania elementów cienkościennych**. Autor uwzględnił przy tym kluczowe aspekty, takie jak czynniki **geometryczne, materiałowe, dynamiczne i termiczne**, co stanowi o wartości naukowej pracy.

### 3. Pytania do rozprawy doktorskiej

W niniejszej części recenzji przedstawiam pytania skierowane do Doktoranta, które zdaniem recenzenta wymagają dodatkowych komentarzy i doprecyzowania ze strony Autora. W większości przypadków mają one na celu pogłębioną analizę treści rozprawy lub wyjaśnienie kwestii, które recenzent uznał za dyskusyjne. Nie należy ich traktować jako bezpośredniego wskazania niedociągnięć czy błędów, lecz raczej jako element konstruktywnej wymiany poglądów i uzupełnienia argumentacji.

**Pytanie 1.** W jaki sposób jednoczesne oddziaływanie sił skrawania, wzrostu temperatury oraz drgań samowzbudnych wpływa na całkowitą wartość odkształceń sprężystych i plastycznych w cienkościennych elementach?

**Pytanie 2.** Jak obecność drgań samowzbudnych w obróbce HSM oddziałuje jednocześnie na płaskość, prostoliniowość i chropowatość powierzchni cienkościennych elementów?

**Pytanie 3.** Jak wzrost temperatury obrabianego elementu wpływa na charakter drgań i tym samym na błędy geometryczne w obróbce konwencjonalnej i HSM?

**Pytanie 4.** Jak różnice w właściwościach mechanicznych i cieplnych EN AW-7075 oraz Ti6Al4V przekładają się na optymalny dobór parametrów skrawania i strategii obróbki cienkościennych konstrukcji?

**Pytanie 5.** Jak pogodzić wymagania wysokiej dokładności wymiarowej, dobrej jakości powierzchni i krótkiego czasu obróbki przy jednoczesnym ograniczeniu odkształceń i drgań?

#### **4. Podsumowanie i wniosek końcowy**

Podsumowując recenzję, stwierdzam, że mgr inż. Jakub Czyżycki trafnie zdefiniował oraz skutecznie rozwiązał istotny i aktualny problem naukowy, wnosząc znaczący wkład w rozwój wiedzy dotyczącej frezowania elementów cienkościennych. Tak szeroka i wnikliwa analiza, przedstawiona w rozprawie, wymagała od Autora rozległej wiedzy z zakresu technologii obróbki skrawaniem, w szczególności frezowania. Świadczy to o wysokim poziomie merytorycznym Doktoranta i potwierdza jego gotowość do samodzielnego prowadzenia badań naukowych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Jakuba Czyżyckiego nt. *Analiza odkształceń elementów cienkościennych podczas frezowania stopu aluminium EN AW-7075* w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20.07.2018 r. (Dz.U. z dn. 24.10.2024 r., poz. 1571) i może stanowić podstawę do nadania Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Może być, zatem dopuszczona do publicznej obrony.

