

dr hab. inż. Tomasz Dyl, prof. UMG  
Uniwersytet Morski w Gdyni  
Wydział Mechaniczny  
ul. Morska 81-87  
81-225 Gdynia

Gdynia, 25.01.2025r.

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej  
pod tytułem

***„Analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego”***

**Autor: mgr inż. Marcin Szpunar**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński**

**Promotor pomocniczy: dr inż. Robert Ostrowski**

Recenzję opracowano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, z dnia 27.11.2024r. o numerze RM-530-05-02/2024, w którym otrzymałem informację o powołaniu mojej osoby przez Radę Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza na posiedzeniu w dniu 27 listopada 2024 roku na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana **mgr inż. Marcina Szpunara** pod tytułem ***„Analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego”***, za co uprzejmie dziękuję.

## 1. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska Pana *mgr inż. Marcina Szpunara* pod tytułem **„Analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego”**, napisana jest w formie monograficznej, obejmuje ona wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, wprowadzenie, pięć rozdziałów, podsumowanie i wnioski, bibliografię, załączniki (dokumentację konstrukcyjną) streszczenia rozprawy w języku polskim i w języku angielskim.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska napisana jest na odpowiednim poziomie, ma strukturę typową dla analiz numerycznych i prac eksperymentalnych, zawiera w sobie analizę przeglądu literatury, cel pracy, tezę pracy, zakres pracy, opisany materiał badawczy, metodykę badawczą oraz wyniki badań ich interpretację, a na koniec przedstawiono podsumowanie pracy i wnioski wynikające z analizy wyników badań. Układ pracy, pod względem struktury, podziału treści, kolejności rozdziałów uważam za właściwy. Całość rozprawy zawarta jest na 232 stronach, tekstu, wraz z rysunkami, wzorami i tabelami. W bibliografii wykazano 300 pozycji literaturowych, dobrano je i wykorzystano w sposób odpowiedni. Recenzowana rozprawa doktorska jest właściwie zredagowana, jest napisana spójnie, Autor prawidłowo zredagował i opisał pracę ze względu na język techniczny.

Rozprawa doktorska została podzielona na część dotyczącą analizy literatury, w której opisano zagadnienia dotyczące materiału inżynierskiego jakim jest tytan i jego stopy. Przedstawiono charakterystykę kształtowania przyrostowego dotyczącego metody wytwarzania opartej na obróbce plastycznej metali. W szczególności zamieszczono charakterystykę modelowania numerycznego, które odgrywa kluczową rolę w zrozumieniu i optymalizacji procesu kształtowania przyrostowego blach. Na zakończenie przeglądu literatury zamieszczono wnioski i podsumowanie wynikające z tej części pracy. Następnie wskazano cel, zakres i tezę rozprawy doktorskiej.

Główną częścią pracy była analiza numeryczna i eksperymentalna procesu kształtowania przyrostowego cienkich blach wykonanych z materiałów trudno odkształcalnych w obróbce plastycznej na zimno, a mianowicie z tytanu technicznie czystego klasy 2 (CP-Ti Gr 2) oraz stopu tytanu klasy 5 (Ti-6Al-4V).

Po przeprowadzonej analizie literaturowej i po przeanalizowaniu zasygnalizowanych problemów występujących podczas badań wstępnych kształtowania wytłoczek metodą przyrostową przedstawiono tezę pracy:



„Zastosowanie hybrydowego nagrzewania wsadu, za pomocą cieczy pod adaptacyjnym ciśnieniem oraz za pomocą nagrzewania tarcowego, o odpowiedniej strategii kierunku prędkości obrotowej narzędzia w stosunku do kierunku jego posuwu, a także dobór odpowiedniego materiału narzędziowego umożliwią w procesie kształtowania przyrostowego dwufazowego stopu tytanu Ti-6Al-4V uzyskanie wytłoczek ze zmiennym nachyleniem ścianki bocznej, poprzez zwiększenie stopnia odkształcenia materiału blachy, przy jednoczesnym zmniejszeniu odkształceń sprężystych wytłoczek po odciążeniu.”

Celem pracy była analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność w procesie formowania przyrostowego cienkich blach wykonanych z tytanu technicznie czystego CP-Ti Gr 2 oraz stopu tytanu Ti-6Al-4V. Mimo tego, że analizie badawczej poddano dwa rodzaje materiałów inżynierskich, to tezę pracy oparto tylko na jednym z nich (stop tytanu Ti-6Al-4V). Nie zostało to jednak wyraźnie zaznaczone czym to było spowodowane.

Do zrealizowania postawionego celu i udowodnienia tezy pracy określono istotne etapy badawcze:

- Określenie właściwości mechanicznych badanych blach za pomocą statystycznej próby jednoosiowego rozciągania w temperaturze pokojowej oraz w podwyższonych temperaturach.
- Badania tribologiczne, charakterystyka topografii powierzchni blach, badania tarcia za pomocą testu przeciągania pasa blachy oraz ich analiza mikroskopowa po procesie tarcia.
- Analiza wpływu rodzaju zastosowanego smaru na współczynnik tarcia w teście przeciągania pasa blachy za pomocą analizy wariancji i sztucznych sieci neuronowych.
- Wykonanie specjalnego przyrządu umożliwiającego kształtowanie blachy w założonych warunkach temperaturowych.
- Badania nad zastosowaniem narzędzi pokrytych powłokami osadzonymi z fazy gazowej oraz narzędzia wykonanego z ceramiki wzmacnianej whiskerami.
- Modyfikacja narzędzi w celu polepszenia właściwości smarujących, wykonanie dodatkowych rowków w strefie kontaktu z kształtowaną blachą.
- Dobór strategii (przeciwbieżnej i współbieżnej) procesu oraz wartości parametrów nastawczych takich jak: ciśnienie medium roboczego, prędkość obrotowa, posuw narzędzia, podziałka ścieżki roboczej.
- Optymalizacja procesu formowania z wykorzystaniem statystycznego centralnego planu kompozycyjnego i analizy wariancji.
- Analiza charakterystyki wartości sił dla procesu formowania przyrostowego.
- Wyznaczenie wartości współczynnika tarcia występującego podczas badań eksperymentalnych kształtowania przyrostowego wytłoczek z blach tytanowych.



- Analiza wytłoczek uszkodzonych podczas procesu kształtowania z wykorzystaniem mikrofotografii SEM.
- Ocena odkształceń oraz dokładności wymiarowej wytłoczek wraz z rozkładem grubości blachy wykorzystując system pomiarowy ARGUS do pomiarów fotogrametrycznych.
- Modelowanie numeryczne procesów formowania blach wykonanych z tytanu CP-Ti Gr 2 i stopu tytanu Ti-6Al-4V w środowisku ABAQUS.

W pracy przeprowadzono wnikliwą analizę przeglądu literatury z zakresu rodzajów materiałów trudno odkształcalnych, a w szczególności tytanu i jego stopów, metod kształtowania przyrostowego blach oraz wyzwań związanych z tarcieniem i smarowaniem w kontekście obróbki plastycznej stosowanych materiałów.

Z wykorzystaniem autorskiego stanowiska badawczego do kształtowania przyrostowego w podwyższonych temperaturach z możliwością sterowania aktywnym ciśnieniem i temperaturą medium roboczego oraz nagrzewaniem wynikającym z tarcowego oddziaływania trzpienia roboczego na odkształcany materiał dokonano analizy wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność cienkich blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego.

## **2. Ocena rozprawy doktorskiej**

W mojej ocenie rozprawa doktorska jest napisana na wysokim poziomie, została ona podzielona na dwie główne części. Pierwsza stanowi analizę literaturową a druga obejmuje analizę numeryczną i badania eksperymentalne. Praca stanowi spójną całość, w której w prawidłowy sposób określono cel, tezę i zakres badań.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono przegląd literaturowy dotyczący właściwości tytanu i jego stopów, metod formowania przyrostowego blach i zagadnienia związane z tarcieniem i smarowaniem w obróbce plastycznej. Opisano szczegółową analizę teoretyczną i eksperymentalną specyfiki procesu kształtowania przyrostowego w aspekcie stosowanych narzędzi, metod obróbki, problemów związanych z tarcieniem i smarowaniem z uwzględnieniem stanu wiedzy dotyczącej modelowania numerycznego tego procesu.

W pracy przeanalizowano wpływ kilku rodzajów powłok narzędzi oraz strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych CP-Ti Gr 2 oraz ze stopu tytanu Ti-6Al-4V w procesie jednopunktowego kształtowania przyrostowego.

W części badawczej określono materiał oraz metodykę. Przedstawiono charakterystykę materiałów użytych w badaniach oraz ich topografię powierzchni.



W metodyce badawczej opisano badania tribologiczne tarcia za pomocą testu przeciągania pasa blachy oraz charakterystykę zaprojektowanego i wykonanego stanowiska doświadczalnego, zamontowanego na stole trzy osiowej frezarki pionowej CNC Makino PS95, do formowania przyrostowego w podwyższonej temperaturze, wytłoczek stożkowych o stałym i zmiennym kącie pochylenia ścianki. Przedstawiono centralny plan kompozycyjny dla tytanu technicznie czystego CP-Ti Gr 2. Zamieszczono także dla stopu tytanu klasy 5, Ti-6Al-4V, I-optymalny plan badań w układzie blokowym o jednostkach rozszczepionych. Wykonano badania doświadczalne wpływu materiałów narzędziowych (WC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + SiC (w)) pokrytych różnymi powłokami (AlCrN, TiSiXN, ZrN) na możliwość realizacji procesu formowania przyrostowego.

Główną częścią pracy własnej Autora były zamieszczone wyniki badań ich analiza i interpretacja. Określono właściwości tarcia blach poprzez charakterystykę wyników badań tarcia po wykonanym teście przeciągania pasa blachy z udziałem smarów syntetycznych oraz smarów naturalnych. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych kształtowania przyrostowego uwzględniające analizę parametrów wejściowych, parametrów siłowych i topografię powierzchni wytłoczek oraz wyznaczenie wartości współczynnika tarcia dla wytłoczek z tytanu technicznie czystego klasy 2 oraz stopu tytanu klasy 5. Szczególnie jako poznawczą część pracy Autor zamieścił modelownie numeryczne procesu kształtowania wytłoczek z badanych materiałów. Szczegółowo opisał model numeryczny, przedstawił wyniki oraz ich analizę a także przedstawił wnioski wynikające z przeprowadzonych symulacji komputerowych. Doktorant scharakteryzował proces formowania przyrostowego blach tytanowych i ze stopu tytanu uwzględniając zarówno teoretyczne jak i praktyczne aspekty, które przyczyniają się do dalszego rozwoju technologii obróbki przyrostowej blach. Autor wykazał, że dobór parametrów obróbkowych, takich jak prędkość obrotowa i posuw narzędzia, strategia kształtowania, podziałka ścieżki oraz ciśnienie oleju, ma istotny wpływ na współczynnik tarcia, składowe siły formowania oraz odkształcalność materiału.

Na zakończenie rozprawy zamieszczono podsumowanie i wnioski, które mają na celu dostarczenie wytycznych do projektowania procesu kształtowania przyrostowego. Przedstawione zostały także kierunki dalszych prac badawczych.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest w sposób przemyślany sformułowany i szczegółowo odzwierciedla jej treść. Rozprawa jest oryginalna, wnosi naukową i eksperymentalną, wartość dodaną do zagadnień związanych z dziedziną nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.



### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Rozprawa doktorska napisana jest prawidłowo, tak jak zostało to opisane w charakterystyce ogólnej i ocenie. Jednakże podczas zapoznania się z recenzowaną dysertacją odnotowałem uwagi o charakterze dyskusyjnym. Nie są one umniejszeniem wartości pracy, natomiast z pewnością pomogą Autorowi we właściwy sposób wykorzystać wyniki badań i zamieścić je w przyszłych publikacjach. Zatem mam prośbę do Doktoranta o wyjaśnienie pewnych kwestii:

- Celem pracy była analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność w procesie formowania przyrostowego cienkich blach wykonanych z tytanu i jego stopu. Pomimo, że analizie teoretycznej i eksperymentalnej poddano dwa rodzaje materiałów inżynierskich, to tezę pracy oparto tylko na jednym z nich, tym bardziej, że w temacie pracy jest napisane dla blach tytanowych a nie ze stopu tytanu. Nie zostało to jednak wyraźnie opisane czym taki wybór był spowodowany?
- Na rysunku 2.5 zamieszczono zmiany składowej osiowej siły w zależności od średnicy narzędzia, podziałki ścieżki narzędzia, kąta ścianki wytłoczki i grubości blachy. Wykresy dotyczą zależności siły osiowej od czasu. Proszę wyjaśnić czym się różnią poszczególne wykresy, wyglądają tak jak by to był ten sam rysunek powielony czterokrotnie. Przy opisach osi brak jest jednostek.
- Na stronie 50 w tabeli 4.1 zamieszczono wyniki statycznej próby rozciągania dla tytanu CP-Ti Gr 2. Wykonano badania dla trzech wartości temperatury: 20°C, 90°C, 160°C. Natomiast na stronie 52 w tabeli 4.2 zamieszczono wyniki statycznej próby jednoosiowego rozciągania dla stopu tytanu Ti-6Al-4V. W tym wypadku wykonano badania dla pięciu wartości temperatury: 20°C, 104°C, 183°C, 261°C, 340°C. Czym był spowodowany dobór takich właśnie wartości temperatury? Czemu nie były takie same warunki dla obu przypadków materiałów?
- Na stronie 55 w tabelach 4.4 i 4.5 podano właściwości materiałowe narzędzi. Twardość podawana jest w różnych jednostkach. Warto by było ujednolicić oznaczenia twardości.
- Na stronie 57 w tabeli 5.1 podano podstawowe właściwości fizykochemiczne badanych materiałów smarnych. Badania prowadzono dla różnych olejów naturalnych i syntetycznych. Mam pytanie, czy aby na pewno ze względów ekonomicznych zasadne jest stosowanie olejów spożywczych w celu polepszenia właściwości smarujących procesu kształtowania blach?
- Na stronie 76 na rysunku 5.15 Autor pracy zamieścił widok efektów zastosowania prędkości obrotowej narzędzia większej niż 1000 obr/min, gdzie przedstawił zużycie katastroficzne narzędzia i uszkodzenie blachy. Proszę wyjaśnić, jakie



Doktorant zaproponował w tym wypadku środki zaradcze w celu poprawy parametrów procesu tak, aby zapewnić jego prawidłowy przebieg.

- Na stronie 197 Autor napisał, że narzędzia z rowkami smarnymi o różnym kształcie nie spełniły oczekiwań, powodując pogorszenie jakości powierzchni wytłoczek poprzez tak zwane „frezowanie”. Proszę wyjaśnić, czy zjawiska występujące w tym przypadku i kinematyka procesu była typowa dla kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej poprzez skrawanie?
- W podsumowaniu i wnioskach Doktorant właściwie określił, że wykonane badania pozwoliły zidentyfikować najistotniejsze parametry procesu wpływające na zachowanie blach tytanowych CP-Ti Gr 2 i ze stopu tytanu Ti-6Al-4V w procesie jednopunktowego kształtowania przyrostowego SPIF (Single-Point Incremental Forming), tym bardziej dlaczego udowodnienie tezy oparto tylko na jednym materiale inżynierskim.

Przedstawione uwagi krytyczne są bardziej o charakterze dyskusyjnym i nie wpływają na pozytywną wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej.

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

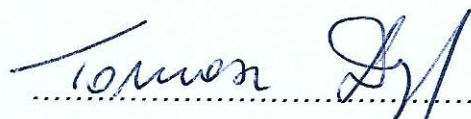
Doktorant wykazał się opanowaniem warsztatu badawczego i samodzielnością prowadzenia analizy procesu formowania przyrostowego blach z tytanu i ze stopu tytanu w aspekcie wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność wytłoczek.

Dogłębnie przeprowadził analizę literaturową dotyczącą właściwości tytanu i jego stopów, metod formowania przyrostowego blach oraz kwestii związanych z tarciem i smarowaniem w procesie jednopunktowego kształtowania przyrostowego. Opisano szczegółową analizę teoretyczną i eksperymentalną specyfiki procesu kształtowania wytłoczek w aspekcie stosowanych narzędzi, metod obróbki, problemów związanych z tarciem i smarowaniem z uwzględnieniem stanu wiedzy dotyczącej modelowania numerycznego tego procesu wykorzystując odpowiedni plan kompozycyjny.

Doktorant wykazał się samodzielnością poprzez opracowanie i wykonanie stanowiska badawczego do kształtowania przyrostowego w podwyższonych temperaturach z możliwością sterowania takimi czynnikami jak ciśnienie i temperatura z równoczesnym nagrzewaniem poprzez tarcie oddziaływanie trzpienia roboczego na odkształcany materiał, a także przeprowadzeniem analizy wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność cienkich blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego.

W zakończeniu i podsumowaniu rozprawy jednoznacznie wykazano, że cel pracy został osiągnięty zaś teza została potwierdzona. Umiejętność prowadzenia badań oraz prawidłowa analiza ich wyników świadczy o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Szpunara pod tytułem: „**Analiza wpływu rodzaju powłoki narzędzia i strategii obróbki na jakość powierzchni i odkształcalność blach tytanowych w procesie formowania przyrostowego**”, spełnia warunki określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie i dopuszczenie Pana **mgr inż. Marcina Szpunara** do publicznej obrony rozprawy przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

  
.....  
dr hab. inż. Tomasz Dyl, prof. UMG