

dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. uczelni
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Instytut Technik Wytwarzania
Zakład Automatykacji i Obróbki Skrawaniem
Politechnika Warszawska
e-mail: slawomir.spadlo@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 25.03.2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Pasowicza

pt.: *Wpływ starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności blach ze stopu AlCu4Mg1*

promotor pracy: dr hab. inż. Stanisław KUT, prof. PRz

Podstawą opracowania recenzji jest umowa o dzieło NN-530-85/2024 (3) z dnia 09.12.2024 r. zawarta z Politechniką Rzeszowską im. Ignacego Łukasiewicza, reprezentowaną przez: dr. hab. inż. Lesława Gniewka, prof. PRz – prorektora ds. nauki.

1. Charakterystyka podjętej tematyki rozprawy doktorskiej

W przemyśle lotniczym wiele elementów konstrukcyjnych wytwarzanych jest metodą przeróbki plastycznej. Z uwagi na wymagania dotyczące lekkości konstrukcji lotniczych są one wykonywane w głównej mierze ze stopów lekkich. Zagadnienia dotyczące ich kształtowania nabierają szczególnego znaczenia w sytuacjach, w których stawiane są wysokie wymagania wytrzymałościowe produkowanych elementów. Zagadnienia dotyczące kształtowania blach metodą przeróbki plastycznej stają się szczególnie istotne w przypadku zastosowania stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo. Uzyskanie i zapewnienie dokładności oraz powtarzalności geometrycznej w procesie kształtowania, w których wymagania postawione są na bardzo wysokim poziomie staje się wyzwaniem naukowym. Zagadnienia badawcze związane z rozwiązaniem tak postawionych zadań nie były łatwe, wymagały uwzględnienia wielu czynników związanych z postawionym wymogiem rzeczywistego ich wdrożenia, w warunkach produkcyjnych.

Z uwagi na postawione wymagania, dotyczące specyfiki prac badawczo-wdrożeniowych, praca musiała być realizowana w wymiarze naukowym, zawierającym elementy nowatorskie oraz poznawcze, a także elementy związane z bezpośrednim wdrożeniem wyników badań w warunkach przemysłowych. Biorąc pod uwagę fakt, że wdrożenie miało nastąpić w warunkach produkcyjnych, jako rzeczywiste i „pełnoskalowe” rozwiązanie przedmiotowego zagadnienia wymagało skorelowania zagadnień naukowych oraz ich implementacji produkcyjnej.

Biorąc pod uwagę warunki konkursowe programu „doktorat wdrożeniowy” dotyczące finalnego wskaźnika realizacji projektu – wdrożenia wyników badań naukowych, były one ukierunkowane przede wszystkim na realizację aspektów użytecznych.

W ocenie recenzenta, realizacja prac badawczych w formule „doktoratu wdrożeniowego” nie była prostym przedsięwzięciem. Wymagała pełnej determinacji zarówno doktoranta jak również promotora. Potwierdzeniem, trafności wyboru tematyki badań naukowych jest zainteresowanie ich wdrożeniem producenta branży lotniczej WSK Mielec.

W tym kontekście uważam, że praca mgr inż. Grzegorza Pasowicz dotycząca badań właściwości plastycznych oraz sprężynowania powrotnego blach aluminiowych ze stopu AlCu4Mg1 w stanie wyżarzonym oraz po przesycaniu i w trakcie procesu starzenia naturalnego prowadzące do wyznaczenia współczynników w równaniach konstytutywnych naprężenia uplastyczniającego Hollomona, Swifta, Voce’a oraz El-Magda wpisuje się w ogólnoswiatowe kierunki badań, wnosząc wymierne korzyści poznawcze i użyteczne. Dlatego też uważam, że podjęty przez Autora pracy temat, a także zakres pracy należy uznać za uzasadniony i bardzo aktualny.

2. Charakterystyka zawartości pracy

Recenzowana rozprawa doktorska, ma objętość 184 strony. Podzielona jest na 11 rozdziałów stanowiących zasadniczą część pracy oraz 6 załączników. Zawiera 33 zestawienia tabelaryczne i 97 rysunków. Ponadto w pracy zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz zestawienie bibliografii (213 pozycji). Praca zawiera spis tabel i rysunków oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1. stanowiącym wprowadzenie, Doktorant scharakteryzował istotę zagadnień dotyczących kształtowania elementów metodą przeróbki plastycznej, ze szczególnym uwzględnieniem stopów lekkich stosowanych w konstrukcjach lotniczych. Autor przedstawia problemy związane z kształtowaniem elementów wykonanych ze stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo.

Rozdział 2. Zawiera przegląd i analizę dostępnej literatury. Rozdział został podzielony, w sposób logiczny mający na celu scharakteryzowanie czterech głównych obszarów dotyczących podjętej tematyki badawczej obejmujących: charakterystykę stopów aluminium, zagadnienia konstrukcyjne oraz technologiczne związane z kształtowaniem elementów konstrukcji lotniczych metodami przeróbki plastycznej z materiałów umacnianych wydzieleniowo, wyniki symulacji komputerowych procesu kształtowania wyłoczek. W rozdziale tym zawarto podsumowanie i wniosek z przeprowadzonych analiz. W podsumowaniu rozdziału Autor trafnie zauważa, że

w dostępnej literaturze istnieją obszary dotyczące przeróbki plastycznej stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo – przesycanych a następnie starzonych, które nie zostały w pełni zbadane. Przedmiotem rozważań w tym rozdziale były również zagadnienia dotyczące wpływu czynników związanych z kształtowaniem blach platerowanych. Należy podkreślić, że w podsumowaniu rozdziału Doktorant wykorzystał szeroką wiedzę praktyczną uzyskaną podczas pracy zawodowej w WSK Mielec.

Rozdział 3. Autor, na podstawie analizy literatury oraz własnego doświadczenia zawodowego związanego z pracą w WSK Mielec, trafnie określił cel, tezę i zakres pracy, który został szczegółowo opisany w kolejnym rozdziale.

Rozdział 4 - Plan badań. Na uwagę zasługuje rozbudowany zakres pracy, uwzględniający badania właściwości plastycznych blach w stanie wyżarzonym, badania właściwości plastycznych blach po przesycaniu w trakcie starzenia naturalnego, badania sprężynowania blach wyżarzonych w próbie gięcia swobodnego, badanie sprężynowania blach po przesycaniu w trakcie starzenia naturalnego, wykonanie symulacji numerycznych procesu gięcia swobodnego blach wyżarzonych oraz po przesycaniu w trakcie starzenia naturalnego dla różnych czasów starzenia. Zaplanowany program badawczy obejmował również aspekty aplikacyjne, których planowanym efektem było wdrożenie wyników badań do praktyki przemysłowej. Badania te dotyczyły oceny efektywności symulacji MES z wykorzystaniem uzyskanych współczynników materiałowych w modelach naprężenia uplastyczniającego na przykładzie procesu kształtowania wytłoczki przemysłowej. Rozdział zawiera wyniki prac badawczych dotyczących weryfikacji modelowania MES z wynikami badań eksperymentalnych.

Rozdział 5 – dotyczy badań materiałów wejściowych. W tym rozdziale Autor skoncentrował się na przeprowadzeniu oceny metalograficznej, a właściwie grubości powłoki ochronnej, blach platerowanych. Rozdział ten w opinii oceniającego mógłby stanowić podrozdział pierwszy rozdziału 6.

Rozdział 6. Badanie właściwości plastycznych blach w stanie wyżarzonym. Na podstawie statycznej próby jednoosiowego rozciągania, określono granice plastyczności $Rp_{0.2}$, wytrzymałość na rozciąganie Rm , wydłużenie oraz współczynniki anizotropii normalnej dla poszczególnych materiałów dla czterech grubości blach dla próbek wycinanych w różnych kierunkach w odniesieniu do kierunku walcowania. Wyznaczono wartości współczynników materiałowych oraz krzywe umocnienia odkształceniowego. Autor ocenił dokładności dopasowania krzywych umocnienia z wykorzystaniem wybranych modeli naprężenia uplastyczniającego dla modeli

Hollomona, Swifta, Voce'a oraz El-Magda dla poszczególnych grubości badanych blach w stanie wyżarzonym.

Rozdział 7. Badanie właściwości plastycznych blach po obróbce cieplnej. Rozdział ten, w opinii recenzenta, stanowi najistotniejszą część pracy. Autor przedstawił w nim wyniki szeroko zakrojonych badań prób jednoosiowego rozciągania materiału w stanie wyżarzonym stanowiące materiał porównawczy do dalszych badań. Kolejny etap badań obejmował materiał w stanie po przesycaniu z temperatury 493°C z chłodzeniem w wodzie, a następnie w trakcie procesu starzenia naturalnego w czasie w przedziale 0-120 min. Doktorant zakończył badania procesu starzenia po 120 min, interesujące byłoby jakie parametry wytrzymałościowe uzyskalby materiał w wyniku doprowadzenia procesu starzenia do jego zakończenia tj. do osiągnięcia stanu T4.

Rozdział 8. Badanie sprężynowania blach po gięciu. W rozdziale tym przedstawiono stanowisko, warunki oraz metodykę prowadzenia badań. Na podstawie uzyskanych wyników określono charakterystyki sprężynowania dla różnych grubości badanych blach dla materiału w stanie wyżarzonym oraz po przesycaniu i w trakcie procesu starzenia naturalnego. Dla każdej z badanych próbek wyznaczono przebiegi siły gięcia w funkcji strzałki ugięcia próbki w zakresie 0 - 20 mm. Istotnym wnioskiem z porównania przebiegów charakterystyk sprężynowania jest fakt, że wraz ze wzrostem grubości badanej blachy wzrasta siła gięcia, oraz strzałka ugięcia po odciążeniu. Z tego wynika, że dla grubszych blach występuje mniejsze sprężynowanie powrotne.

Rozdział 9. Modelowanie MES procesu gięcia badanych blach. Obliczenia numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych, dotyczące m.in. przeróbki plastycznej, wymagają określenia zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem w całym zakresie obciążenia. W warunkach po przekroczeniu granicy plastyczności obrabiany materiał ulega umocnieniu. Zjawisko to można opisać krzywą umocnienia plastycznego. W niniejszym rozdziale Doktorant przedstawił wyniki analiz numerycznych w celu określenia skuteczności prognozowania wielkości sprężynowania po gięciu oraz siły gięcia badanych blach platerowanych. Analiza przeprowadzono z wykorzystaniem nieliniowej MES z zastosowaniem pięciu modeli numerycznych:

Symulacje procesu gięcia przeprowadzono z wykorzystaniem pięciu modeli numerycznych: model I - model 2D analizowany w płaskim stanie odkształcenia z pominięciem właściwości materiału warstw plateru, model II - model 2D analizowany w płaskim stanie odkształcenia uwzględniający właściwości materiału warstw plateru, model III - model 3D powłokowy z izotropowym warunkiem plastyczności Hubera-Misesa, model IV - model 3D powłokowy z anizotropowym warunkiem plastyczności Hilla, model V - model 3D powłokowy z anizotropowym warunkiem plastyczności Barlata. Przyjętą miarą dopasowania modelu był błąd względny wyników uzyskanych metodą eksperymentalną oraz w wyniku modelowania

komputerowego. Autor dokonał szczegółowej oceny porównawczej charakterystyk sprężynowania analizowanych modeli dla różnych grubości blach, w tym platerowanych oraz dla różnych czasów procesu starzenia naturalnego. Błędy dopasowania licznych analizowanych modeli mieściły się w przedziale około 2-8% dla materiałów bezpośrednio po procesie przesycania. Największe błędy dopasowania w przedziale około 2-15% dotyczyły próbek po 120 min. starzenia naturalnego.

Rozdział 10. Ocena opracowanych współczynników modeli naprężenia uplastyczniającego na przykładzie wytłoczki produkcyjnej. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki symulacji numerycznych przykładowej wytłoczki dla materiału w stanie wyżarzonym oraz po procesie przesycania w trakcie starzenia naturalnego. Symulacje komputerowe przeprowadzono z przy użyciu komercyjnego oprogramowania Pam-Stamp wykorzystywanego w firmie PZL Mielec. W analizie komputerowej wykorzystano dostępny w programie anizotropowy warunek plastyczności Vegtera wprowadzając uprzednio określone charakterystyki materiałowe. Wyniki symulacji porównano z rzeczywistym procesem kształtowania na prasie krawędziowej oraz hydraulicznej. Jako miarę porównawczą zastosowano pomiary parametrów geometryczne uzyskanych wytłoczek po drugiej operacji kształtowania. Dokonano porównania kąta sprężynowania dla pięciu przekrojów kształtowanej wytłoczki. Największy wzrost kąta w odniesieniu do materiału w stanie wyżarzonym wykazywały wytłoczki z blachy kształtowanej 120 min po przesycaniu. Zbadano również wpływ stanu materiału w trakcie procesu naturalnego starzenia na wielkość ścienienia materiału. Analiza wartości opisywanego parametru wskazuje, że stan materiału formowanych wytłoczek w niewielkim stopniu wpływa na pocienienie materiału. Na podstawie analizy MES oraz wyników prac eksperymentalnych dokonano oceny skuteczności opracowanych współczynników modelu naprężenia uplastyczniającego. Jako kryterium jakościowe przyjęto względny błąd badanej wielkości w odniesieniu do wyniku uzyskanego w analizie MES. Szczegółowa analiza uzyskanych wyników wskazuje na dużą zgodność wyników badań uzyskanych na podstawie zaproponowanej przez Doktoranta metodyki z wynikami prac eksperymentalnych. Wyniki symulacji numerycznych procesu gięcia oraz procesu kształtowania wytłoczki produkcyjnej potwierdziły słuszność sformułowanej w rozprawie tezy.

Rozdział 11. Podsumowanie i wnioski. Podsumowanie, wnioski oraz elementy oryginalne pracy zawiera najistotniejsze wnioski z przeprowadzonych badań. Jego treść obejmuje szczegółowe rekomendacje związane z wdrożeniem, w warunkach przemysłowych, uzyskanych wyników badań.

Kończącą pozycję rozprawy stanowi bibliografia.

Rozprawa zawiera spis tabel, spis rysunków oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

3. Uwagi szczegółowe dotyczące pracy

Praca została przygotowana starannie pod względem redakcyjnym i językowym oraz graficznym, jednakże autor nie ustrzegł się pewnych nieścisłości, usterek o charakterze edycyjnym lub stylistycznym, a w szczególności:

1. Autor dysertacji niekiedy cytuje dużą liczbę pozycji literaturowych bez szczegółowego odniesienia się do treści poruszanych tam zagadnień (str. 26, 27, ... 31, ... 40, 42, itd.). Pewne zmiany redakcyjne w tym zakresie przyczyniłyby się do poprawy jakości odbioru tej pracy.
2. str. 8 użycie sformułowań potocznych „*na próżno szukać*”
3. str. 9, 11 użycie niewłaściwych określeń np. „waga” zamiast masa
4. str. 9 jest „*Przemysł lotniczy ma bardzo dobrze wypracowane zastosowanie...*” przykładowo sformułowanie mogło by być wyrażone w następującej formie: „*Przemysł lotniczy ma opanowane w szerokim zakresie zastosowanie...*”
5. str. 11 użyte jest sformułowanie „*...choćby ze względu na redukcję paliwa...*” a powinno być „*...choćby ze względu na redukcję zużycia paliwa...*”
6. str. 11 niewłaściwie użyte są określenia: *wkładu* zamiast *wsadu*, *wlaniu go do formy* zamiast *zalaniu formy*
7. str. 12 jest „*...jednolitą mikrostrukturę...*”. powinno być „*...jednorodną mikrostrukturę...*”
8. str. 13 jest „*...podobny do nazewnictwa odlewanych stopów...*” powinno być „*...podobny do nazewnictwa odlewniczych stopów...*”
9. str. 16 jest „*...wykorzystuje ten materiał do produkcji zbiorników przewożących ciekły tlen, ciekły wodór czy zbiorniki do...*”, powinno być „*...wykorzystuje ten materiał do produkcji zbiorników przewożenia ciekłego tlenu, ciekłego wodoru czy zbiorniki do...*”
10. str. 17 jest „*Prowadzi to do ograniczenia masy oraz 30% do 40% wydłużenie żywotności podzespołów [72]*”, powinno być „*Prowadzi to do ograniczenia masy oraz 30% do 40% wydłużenia żywotności podzespołów [72]*”
11. str. 18 Autor używa niewłaściwych określeń dotyczących procesów korozyjnych i utożsamia proces korozji z produktami korozji.
12. str. 18 błędy dotyczące poprawności użytych określeń, składniowe, stylistyczne i fleksyjne „*Koncepcje laboratoryjne uszkodzeń korozyjnych w trakcie eksploatacji nie mogą być jednoznaczne, ponieważ warunki środowiskowe w różnych regionach świata nie są takie same. Przykładowo na samolot lecący z Alaski do Stanów Zjednoczonych działają odmienne warunki środowiskowe porównując do samolotu lecącego nad Morzem Śródziemnym.*”
13. str. 18 błędy dotyczące opisu procesu anodowania stopów aluminium „*Anodowanie polega na naroście warstwy glinu w procesie elektrochemicznym*” bowiem polega ono na wytworzeniu na powierzchni stopu aluminium warstwy tlenku (Al_2O_3)

14. str. 18 błędy dotyczące poprawności użytych sformułowań „*Platerowanie to proces nakładania cienkich powłok metali (np. aluminium lub niklu) wykończenia powierzchni na inny materiał*”
15. str. 19 nie jest jasne dla czytelnika użycie określenia „...*wydajność strukturalna...*”
16. str. 21 jest „*Poszycie statku powietrznego które z reguły podlega naprężeniom*” sformułowanie mogło by być wyrażone w następującej formie: „*Poszycie statku powietrznego które z reguły podlega obciążeniom wywołującym naprężenia*”
17. str. 21 jest „...*kończąc na dużych gabarytach...*” powinno być „...*kończąc na elementach dużych gabarytach/wymiarach...*”
18. str. 23 jest „...*następuje utrata spójności materiału na drodze odkształceń plastycznych...*” powinno być „...*następuje utrata spójności materiału na w wyniku odkształceń plastycznych...*”
19. str. 23 jest „*Wytłoczki o powierzchni rozwijalnej są kształtowane z wykorzystaniem gięcia.*” sformułowanie mogło by być wyrażone w następującej formie: „*Wytłoczki o powierzchni rozwijalnej są kształtowane w wyniku procesu gięcia (np. wykorzystaniem pras krawędziowych)*”
20. str. 24 błąd fleksji - jest „*Wartość sprężynowania jest najczęściej określana za pomocą bezwymiarowego współczynnika sprężynowania K, jako iloraz promienia...*” powinno być *Wartość sprężynowania jest najczęściej określana za pomocą bezwymiarowego współczynnika sprężynowania K, jako ilorazu promienia...*
21. str. 27 jest „...*mniej koszt oprzyrządowania z porównaniu...*” powinno być „...*mniej koszt oprzyrządowania w porównaniu...*”
22. str. 29 nie jest jasne dla czytelnika zdanie: „*Kształtowanie blachy po przesycaniu, jest to o tyle korzystne, iż część nie wchodzi do pieca po ukształtowaniu (zależne od wspomnianego wyżej stanu ostatecznego materiału części), gdzie mogłaby ulec deformacji podczas procesu przesycania zachodzącego w piecu i zaraz po wyciągnięciu z niego po przesycaniu*”, bowiem w piecu następuje nagrzewanie do wymaganej temperatury, po czym wygrzewanie w określonym czasie w celu uzyskania jednorodnego roztworu stałego. Proces przesycania związany jest z szybkim ochłodzeniem materiału.
23. str. 46, 47 Autor stosuje określenie „...*po obróbce cieplnej w trakcie starzenia naturalnego...*” podczas gdy proces starzenia jest jednym z zabiegów obróbki cieplnej, dwa następujące po sobie zabiegi obróbki cieplnej przesycanie i starzenie to proces umacniania wydzieleniowego.
24. str. 47 błędne odwołanie do „rys. 6.1” powinno być „rys. 4.1”
25. str. 48 Autor odwołuje się do „...*autorskiego wzoru na kąty gięcia...*” nie podając numeru wzoru. Czy należało by interpretować, że są to wzory przedstawione na str. 106 (kilkadziesiąt stron dalej)

26. str. 48 Autor naprzemiennie używa określeń „...względnego wygięcia próbki...” a w kolejnych wersach „...względnego ugięcia...”
27. str. 91, 92, 94-96 na wykresach rys. 7.14, 7.16, 7.19 – 7.24 błędnie oznaczono jednostki, zamiast *Mpa* powinno być *MPa*.
28. str. 98-100 w zestawieniu tabelarycznych tab. 7.7-7.9 błędnie oznaczono jednostki, zamiast *MPa* powinno być *MPa*.
29. str. 136 prawdopodobnie w zdaniu zadziałała autokorekta „...płyty pełniące rolę mocowania do pracy hydraulicznej...” powinno być „...płyty pełniące rolę mocowania do prasy hydraulicznej...”
30. str. 143 błędy fleksyjne „...przystąpiono do realizacji praktycznego stanowiska mającego na celu w warunkach produkcyjnych wykonać wytłoczki do badań z blachy wyżarzanej oraz po przesycaniu,...” powinno być „...przystąpiono do realizacji praktycznego stanowiska mającego na celu w warunkach produkcyjnych wykonanie wytłoczek do badań z blachy wyżarzanej oraz po przesycaniu,...”
31. str. 147 rys.10.15 grafika przedstawiona na tym mało czytelna.

Uwagi do dyskusji

W rozprawie występują niespójności w określeniach dotyczących obróbki cieplnej stopów aluminium zwłaszcza w początkowych rozdziałach pracy. Dotyczy to przede wszystkim definicji umacniania wydzieleniowego i związanych z tym procesem przesycania oraz starzenia (przykłady szczegółowych uwag podane są w punkcie 23, 24 powyższego wyszczególnienia).

Właściwości stopów aluminium, zależą od składu chemicznego. Czy materiał użyty do wykonania poszczególnych próbek pochodził z tego samego wytopu?

W opinii oceniającego należałoby przeprowadzić wstępne badania materiałowe dotyczące procesu umacniania wydzieleniowego w szerszym zakresie tak, aby w sposób precyzyjny dobrać warunki obróbki cieplnej. Doktorant przyjął w sposób arbitralny temperaturą wygrzewania stopu na poziomie 493°C, podobnie w sposób arbitralny określone zostały czasy wygrzewania związane z ujednoldnieniem roztworu stałego stopu.

Dla przykładowych próbek należałoby przeprowadzić proces starzenia naturalnego przyjmując dłuższe czasy.

Czy wniosek dotyczący poprawy właściwości mechanicznych w zaproponowanym cyklu technologicznym przesycanie - początkowe stadium starzenia - kształtowanie metodą przeróbki plastycznej wynika z przeprowadzonych badań własnych?

W pracy zabrakło również przykładowych wykresów rozciągania.

Czy dokonano próby oszacowania błędu analizy procesu gięcia związanego z grubością plateru, bowiem właściwości materiału podstawowego oraz plateru są różne.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska pt. „Wpływ starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności blach ze stopu AlCu4Mg1” została zrealizowana na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej i została napisana pod kierownictwem naukowym Pana dr hab. inż. Stanisława Kuta, prof. PRz.

Tytuł pracy w pełni odzwierciedla treści zawarte w przedmiotowej dysertacji i został sformułowany poprawnie.

W oparciu o analizę wyników badań przedstawionych w literaturze Doktorant trafnie sformułował cel pracy, hipotezę i zakres pracy.

Dla osiągnięcia celów i udowodnienia tez pracy Doktorant zrealizował bardzo szeroki zakres badań analitycznych oraz doświadczalnych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Pasowicz ma charakter teoretyczno-eksperymentalny dotycząca badań oraz modelowania właściwości materiałowych stopów aluminium umacnianych wydzieleniowo pod kątem ich zastosowań w procesie kształtowania metodą przeróbki plastycznej. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego.

Oceniając całościowo rozprawę należy stwierdzić, że układ pracy i wybór narzędzi oraz metodyki prowadzenia badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych uważam za poprawny. Uzyskane wyniki stanowiły dane do przeprowadzonych przez Autora analiz dotyczących możliwości wykorzystania korzystnych właściwości mechanicznych stopów aluminium bezpośrednio po przesycaniu. Autor skoncentrował się na badaniu możliwości kształtowania materiału metodą przeróbki plastycznej w początkowym stadium starzenia naturalnego. Merytorycznie praca nie budzi zastrzeżeń. Porównanie wyników teoretycznych i uzyskanych w wyniku symulacji komputerowych charakteryzuje zbieżność jakościowa i ilościowa z wynikami prac eksperymentalnych, co świadczy o poprawności opracowanych modeli oraz dużej wiedzy, umiejętnościach badawczych, systematyczności rozważań, ich kompleksowości i rzetelności naukowej Autora. Temat rozprawy jest aktualny, a zawarty w niej materiał badawczy bogaty.

Dodatkowo Doktorant wykazał się znacznymi umiejętnościami w zakresie wykorzystania technik komputerowych do badań symulacyjnych w aspekcie opisu dotyczącego cech materiałowych w procesie kształtowania materiału metodami przeróbki plastycznej.

Doktorant wykazał się również umiejętnością planowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych, modelowych, oraz opracowania i merytorycznej analizy uzyskanych wyników. Na uwagę zasługuje fakt starannego przygotowania prac eksperymentalnych, które obejmowały badania wstępne materiału w zakresie dotyczącym określenia jego właściwości mechanicznych. W opinii recenzenta, z uwagi na fakt wykorzystywania w pracy efektów obróbki

cieplnej (umacniania wydzieleniowego) polegającej na połączeniu zabiegu przesycania i starzenia, oraz zależność wyników procesu umacniania od składu chemicznego materiału, badania metaloznawcze powinny być poszerzone o jego analizę oraz bardziej zaawansowaną analizę mikrostruktury metalograficznej poszczególnych partii materiału.

Na podstawie analizy wyników badań wstępnych Doktorant opracował autorskie koncepcje badawcze przedstawione w części opracowania dotyczącej badań zasadniczych, które dotyczyły metodyki.

Dodatkowo Doktorant wykazał się wiedzą z obszaru modelowania metodą elementów skończonych, co pozwoliło mu przygotować adekwatne do przeprowadzonych testów eksperymentach modele symulacyjne.

Uważam, że uwagi zawarte w recenzji mogą być przedmiotem analiz w dalszej działalności badawczej i publikacyjnej Doktoranta. Podkreślam, że część uwag ma charakter pytań i sugestii do wykorzystania w przyszłości. Ponadto stwierdzam, że postawione w pracy tezy jak i zdefiniowany cele badawcze zostały w pełni osiągnięte.

Wśród wielu publikacji dotyczących zagadnień kształtowania metodą przeróbki plastycznej stopów lekkich, mgr inż. Grzegorz Pasowicz potrafił znaleźć istotny, z punktu widzenia naukowego i użytecznego, problem badawczy, który rozwiązał samodzielnie, przyczyniając się do rozwoju dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Należy również zwrócić uwagę, że praca została wyłoniona w postępowaniu konkursowym ogłoszonym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” i uzyskała już na etapie wstępnym pozytywne rekomendacje w zakresie trafności zaproponowanej tematyki badawczej oraz potencjału wdrożeniowego.

Na uwagę zasługuje również fakt, że praca zrealizowana była w formule doktoratu wdrożeniowego i obejmuje prace badawczo-rozwojowe, mające na celu ich implementację techniczną przedmiotowego opracowania w warunkach przemysłowych. Wyniki opracowania stanowią przedmiot wdrożenia PZL Mielec.

Do oryginalnych osiągnięć pracy zaliczam:

1. Prawidłowo zaplanowane i przeprowadzone obszerne, wielokierunkowe badania modelowe oraz eksperymentalne dotyczące kształtowania właściwości materiałowych stopu AlCu4Mg1.
2. Przeprowadzenie symulacji komputerowych materiału w różnych stanach obróbki cieplnej.
3. Wykazanie korzyści wynikających z wprowadzenie przesycania stopu bezpośrednio przed procesem kształtowania elementów metodą przeróbki plastycznej
4. Ważnym osiągnięciem jest powiązanie współczynników w równaniach naprężenia uplastyczniającego z czasem po przesycaniu. Uzyskane zależności umożliwiają w prosty

sposób na uwzględnienie zmian właściwości technologicznych materiału w funkcji upływu czasu starzenia w trakcie analizy i projektowania procesów kształtowania wyłoczek w wariancie bezpośrednio po przesycaniu.

5. Utylitarny, oczekiwany głównie przez przemysł lotniczy charakter wniosków wynikających z przeprowadzonych badań.
6. Wdrożenie rezultatów badań naukowych w przemyśle.

5. Ocena końcowa

Przedstawione uwagi krytyczne nie podważają istotnej treści merytorycznej dysertacji ani nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, który udowodnił, że posiada dużą wiedzę z zakresu zagadnień dotyczących badań stopów aluminium starzonych naturalnie w kontekście ich wpływu na kształtowanie charakterystyk materiałowych w procesie przeróbki plastycznej.

Stwierdzam, że treści oraz wyniki badań i sposób ich prezentacji poszerzają wiedzę w zakresie dotyczącym przeróbki plastycznej stopów aluminium bezpośrednio po procesie przesycania. Tematyka rozprawy wpisuje się w nowoczesne kierunki badań w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Należy podkreślić, iż zakres przeprowadzonych badań jest obszerny, a prezentacja wyników przejrzysta. Świadczy to o tym, że mgr inż. Grzegorz Pasowicz posiada umiejętność samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych.

6. Wniosek końcowy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska **mgr inż. Grzegorza Pasowicza** jest interesującą pracą zrealizowaną w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”. Wymiernym efektem pracy naukowej, stanowiącej główną część opracowania, oraz prac o charakterze badawczo-rozwojowym stanowi wdrożenie wyników badań w Polskich Zakładach Lotniczych Sp. z o.o. w Mielcu.

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. **„Wpływ starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności blach ze stopu AlCu4Mg1”** spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, jest zrealizowana w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna. Stosownie do przepisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r. poz. 1668 z późniejszymi zmianami), upoważnia mnie do przedłożenia Radzie Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie wniosku o dopuszczenie mgr inż. Grzegorza Pasowicza do publicznej obrony.

7. Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

Na podstawie § 14 pkt 5. uchwały Senatu PRz nr 46/2023 z dnia 25 maja 2023 r., dotyczącej „Sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza”, **wnioskuję o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.**

Uzasadnienie

Doktorant jest współautorem pięciu publikacji w czasopismach wyszczególnionych w załączniku do Komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 1 grudnia 2021 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych, w tym dwóch ocenianych na 100 pkt. oraz dwóch 140 pkt.:

S. Kut, F. Stachowicz, **G. Pasowicz**: *Springback Prediction for Pure Moment Bending of Aluminum Alloy Square Tube*. MATERIALS 2021, 14, 3814. (140 pkt.)

S. Kut, **G. Pasowicz**, F. Stachowicz. *On the Springback and Load in Three-Point Air Bending of the AW-2024 Aluminium Alloy Sheet with AW-1050A Aluminium Cladding*. MATERIALS 2023, 16, 2945. (140 pkt.).

Na uwagę zasługuje również fakt aktywnego uczestnictwa Doktoranta w konferencjach tematycznie związanych z realizacją doktoratu. Przedstawił on, jako współautor opracowania, wyniki prac w ramach konferencji naukowych, w tym o zasięgu międzynarodowym:

S. Kut, G. Pasowicz: *Wpływ starzenia naturalnego blachy aluminiowej AW-2024 na przebieg krzywej umocnienia odkształceniowego*. XII Konferencja Naukowa ZINTEGROWANE STUDIA PODSTAW DEFORMACJI PLASTYCZNEJ METALI PLASTMET' 2021.

S. Kut, G. Pasowicz, F. Stachowicz: *Wpływ czasu starzenia naturalnego blachy ze stopu AlCu4Mg1 na współczynniki materiałowe wybranych funkcji naprężenia uplastyczniającego*. Międzynarodowa Konferencja Naukowa PROGRESSIVE TECHNOLOGIES AND MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING PRO-TECH-MA' 2022.

S. Kut, G. Pasowicz, F. Stachowicz: *Prognozowanie sprężynowania oraz siły gięcia swobodnego blach platerowanych – weryfikacja eksperymentalna*. Międzynarodowa Konferencja Naukowa PROGRESSIVE TECHNOLOGIES AND MATERIALS IN MECHANICAL ENGINEERING PRO-TECH-MA' 2022.

S. Kut, G. Pasowicz: *Ocena sprężynowania po gięciu platerowanych blach ze stopu AlCu4Mg1*. XIV Konferencja Naukowa Odkształcalność Metali i Stopów OMIS'2022

S. Kut, G. Pasowicz. *Wpływ obróbki cieplnej i starzenia naturalnego na sprężynowanie po gięciu platerowanej blachy ze stopu AlCu4Mg1*. XII Konferencja Naukowa ZINTEGROWANE STUDIA PODSTAW DEFORMACJI PLASTYCZNEJ METALI PLASTMET 2023

S. Kut, G. Pasowicz: *Wyznaczanie i analiza wpływu współczynników materiałowych w równaniach naprężenia uplastyczniającego na dokładność obliczeń sprężynowania powrotnego*

blachy AW-2024 kształtowanej w czasie starzenia naturalnego. XV Konferencja Naukowa Odształcalność Metali i Stopów OMIS'2024.

Praca naukowa została zrealizowana na wysokim poziomie merytorycznym, a na szczególną uwagę zasługuje fakt, że jej wyniki zostały zaimplementowane w warunkach przemysłowych w Polskich Zakładach Lotniczych Sp. z o.o. w Mielcu (PZL Mielec).

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Judy', is positioned in the upper right area of the page.