

Dr hab. inż. Marek Kowalik - prof. URad.
Wydział Mechaniczny
Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza PASOWICZA
**pt.: Wpływ starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności
blach ze stopu AlCu4Mg1**
wykonana na podstawie powołania przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Rzeszowskiej oraz umowy nr NN-530-85/2024(1)

1. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Grzegorza Pasowicza łącznie zawiera 185 stron. Tekst pracy zawiera 98 rysunków i 37 tabel. W spisie literatury znajduje się 213 pozycje, przede wszystkim artykułów z zagranicznych czasopism technicznych i kilkanaście pozycji książkowych fundamentalnych dla teorii i technologii obróbki plastycznej. Praca podzielona jest na 11 rozdziałów opatrzone wprowadzeniem, wykazem oznaczeń spisami tabel i rysunków. Rozdział drugi oparty na przeglądzie literatury jest analizą stanu wiedzy z zakresu kształtowania blach ze stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym (37 stron ok. 20% pracy) podsumowanym wnioskami określającymi pole badań. W rozdziale trzecim i czwartym zostają sformułowane teza, cele, zakres pracy i plan badawczy. Doktorant w rozdziale piątym i szóstym przedstawił wyniki badań metalograficznych i wytrzymałościowych blach platerowanych o różnych grubościach ze stopu AlCu4Mg1 wzdłuż i poprzecznie do kierunku walcowania. Rozdział siódmy zawiera wyniki badań własności plastycznych po obróbce cieplnej (30 stron ok. 16%). Rozdział ósmy (16 stron tj. 9% pracy) obejmuje wyniki badań doświadczalnych sprężynowania blach po gięciu. Modelowaniu MES poświęcony jest rozdział dziewiąty (17 stron ok. 9% zawartości pracy), w którym określono skuteczność prognozowania wielkości sprężynowania po gięciu w zależności od zastosowanych modeli numerycznych. W rozdziale dziesiątym (20 stron ok. 11%) przedstawiono wyniki symulacji procesu kształtowania wytłoczki produkcyjnej kształtowanej z blachy w stanie wyżarzonym i po przesycaniu. W rozdziale jedenastym zawarte jest podsumowanie i wnioski o charakterze oryginalnym, aplikacyjnym, naukowym i użytkowym. Praca jako całość ma charakter teoretyczno-doświadczalny, a proporcja między tymi częściami jest zachowana. Struktura wewnętrzna pracy jest prawidłowa i logicznie ułożona. Układ pracy jest tradycyjny: teoria - metoda - doświadczenie - dyskusja wyników i wnioski. Strona edytorska jest dobrze opracowana, tekst objaśniono rysunkami dobrej jakości.

2. Ocena aktualności naukowej podjętej tematyki

Przedstawiona do opinii praca dotyczy kształtowania blach ze stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym na elementy konstrukcji statków powietrznych. Przemysł lotniczy od momentu jego powstania był zawsze najbardziej innowacyjną dziedziną techniki stale poszukującą nowych materiałów o wysokich własnościach wytrzymałościowych i małej gęstości. Niestety materiały te są trudne technologicznie zarówno na etapie wytwarzania stopów oraz kształtowania plastycznego, czy obróbki skrawaniem, ponieważ wymagają niezwyklej staranności i uwzględnienia wielu czynników w procesie produkcyjnym. Podjęcie badań nad wpływem starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności blach ze stopu AlCu4Mg1 uważam za celowe, ponieważ zwiększają możliwość bardziej dokładnego symulowania procesu kształtowania i przewidywania własności materiału oraz geometrii wylotek i narzędzi. Optymalizacja parametrów technologicznych pod kątem sterowania własnościami wyrobu wpisuje się w aktualne trendy inżynierii mechanicznej. Reasumując temat pracy uważam za aktualny naukowo i użyteczny.

3. Szczegółowa charakterystyka rozdziałów rozprawy

Rozdział pierwszy *Wprowadzenie* zawiera bardzo ogólną charakterystykę zastosowania blach ze stopów aluminium w przemyśle lotniczym. Wskazuje na istotną rolę procesu obróbki cieplnej tych materiałów na wytrzymałość i technologię kształtowania. Autor słusznie stwierdza, że przeprowadzenie przesycania, następnie kształtowania plastycznego i starzenia pozwala uzyskać najlepsze własności wytrzymałościowe. Rozdział kończy krótki opis zawartości pracy. W opinii recenzenta wstęp powinien w stopniu bardziej precyzyjnym zarysowywać problematykę pracy w aspekcie tytułu, w którym mowa o konkretnym gatunku AlCu4Mg1 oraz trudności jakie występują w przewidywaniu jego własności i w określeniu danych do opisu numerycznego.

W rozdziale drugim *Analiza stanu wiedzy* opracowanym na podstawie literatury, opisana jest obszernie następująca tematyka: charakterystyka stopów aluminium wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, opis typowych elementów statku powietrznego wykonanych z blach ze stopów aluminium oraz wybrane metody kształtowania wylotek. W punkcie 2.1 *Podział stopów aluminium* czytelnik otrzymuje interesujący opis stopów aluminium używanych do budowy płatowca z odniesieniem literaturowym nawet do pewnych ciekawostek historycznych. Autor bardziej szczegółowo omawia grupę stopów Al-Cu typu 2xxx do której należy badany materiał AlCu4Mg1 (AW-2024). Wagę interesującego tekstu umniejszają kolokwializmy i oczywistości np. p.2.1.1 str. 11; p.2.1.2 str.15 „niemagnetyczność, Z racji.. ... tolerancja na uszkodzenia” i inne. Recenzent nie rozumie pojęć „ograniczeń geometrycznych właściwości inżynierskich, stosunkowo wysoka wydajność strukturalna” punkt 2.2 str.19 i prosi o wyjaśnienia. W opinii recenzenta jest zbyt uboga zawartość punktu 2.2.2 *kształtowanie wylotek z blach do utwardzania wydzielinowego*. Przesycanie i starzenie mają znaczący wpływ na własności wytrzymałościowe i możliwości technologiczne dlatego czytelnik powinien otrzymać więcej informacji, które są zawarte w cytowanej literaturze. Doktorant powinien przedstawić szerzej tę tematykę na obronie pracy tym bardziej, że używa tych terminów w tytule pracy. W punkcie 2.3 *Symulacje komputerowe procesów kształtowania wylotek* otrzymujemy powszechnie znany opis korzyści wynikających z zastosowania symulacji numerycznej w technologii oraz klarownie przedstawione modele naprężenia uplastyczniającego wg Hollomona, Swifta, Voce’a i El-

Magda. Rozdział kończy punkt 2.4 *Wnioski wynikające z analizy literatury*, w którym autor słusznie zauważa istotną rolę wpływu czasu po przesycaniu na własności plastyczne i wytrzymałościowe blach ze stopu AlCu4Mg1. Recenzent zgadza się z opinią Doktoranta, że warstwa platerowana będzie miała wpływ na wartość sprężynowania powrotnego blachy.

W rozdziale trzecim *Cele, teza i zakres pracy* Autor deklaruje, że celem pracy jest wyznaczenie dla blach ze stopu AlCu4Mg1 krzywych umocnienia σ - ϵ w stanie wyżarzonym i po przesycaniu w trakcie starzenia w funkcji czasu oraz charakterystyk sprężynowania, przez co uzyskane zostaną dokładne dane do modelowania numerycznego kształtowania plastycznego. Tak przedstawione cele mają zarówno aspekty naukowe i użytkowe. Doktorant stawia następującą tezę str. 46 : „*W przypadku blach kształtowanych po przesycaniu w trakcie starzenia naturalnego znajomość wartości współczynników materiałowych w równaniach konstytutywnych naprężenia uplastyczniającego w funkcji czasu starzenia umożliwi uwzględnienie zmiany własności materiału blachy na etapie analizy projektowania procesu technologicznego*”. W opinii recenzenta jest to cel użytkowy. Teza jest pewną wątpliwością do udowodnienia np. „własności w funkcji czasu będą się zmieniały liniowo”. Proszę o komentarz do tej uwagi.

W rozdziale czwartym *Plan badań* Doktorant przedstawia siedmioetapowy przebieg badań dla próbek pobranych wzdłużnie, poprzecznie i pod kątem 45° do kierunku walcowania blachy, w stanie wyżarzonym, przesycanym i starzonym. Etapy badawcze przedstawione są przejrzysto w formie grafów. Recenzent nie ma uwag do tego rozdziału.

Skład chemiczny i struktura materiału AlCu4Mg1 (AW-2024) zostały przedstawione w rozdziale piątym. Próbkę została wykonana z blach 0,50 mm, 0,80 mm, 1,00 mm i 2,00 mm platerowanych aluminium AW-1050A. W opinii recenzenta fotografie zglądów powinny być lepiej opisane zarówno na rysunkach jak i w tekście oraz wskazana byłaby przynajmniej jedna struktura z większym powiększeniem.

W rozdziale szóstym Doktorant prezentuje wyniki badań własności plastycznych blach w stanie wyżarzonym o grubościach 0,5 mm; 0,8 mm; 1 i 2 mm, z każdej pobrano próbki wzdłużnie i prostopadle oraz pod kątem 45° do kierunku walcowania. Otrzymane wyniki $R_{p0,2}$; R_m ; $A_{50\%}$; A_g oraz współczynnik anizotropii nie różniły się znacząco. Na podstawie tych danych autor wyznaczył krzywe umocnienia σ - ϵ oraz współczynniki materiałowe do równań naprężenia uplastyczniającego Hollomona, Swifta, Voce'a i El-Magda korzystając z oprogramowania Logger Pro. W sumie na tym etapie pracy uzyskano 21 zestawów danych. Spośród analizowanych modeli umocnienia najdokładniejszy wg Doktoranta okazał się model El-Magda z błędem poniżej 0,5%. Rozdział nie budzi żadnych zastrzeżeń recenzenta.

Rozdział siódmy zawiera wyniki badań własności plastycznych po przesycaniu w trakcie starzenia w czasie do 2 godzin. Łącznie Doktorant przygotował 135 próbek po 45 odpowiednio dla blach o grubościach 0,5; 1; 2 mm i sukcesywnie badał własności plastyczne w trakcie starzenia co 0; 20; 45; 90 i 120 minut w próbie jednoosiowego rozciągania. Analizując te wyniki można zauważyć, że wzrost granicy plastyczności miał charakter liniowy w funkcji czasu, a po dwugodzinnym starzeniu $R_{p0,2}$ wzrastała ponad 35% i R_m na poziomie 10%. Czytelnikowi należy się szerszy opis efektu Portevina–Le Chateliera w jaki sposób został zidentyfikowany, co jest jego przyczyną, dlaczego jest najbardziej widoczny dla blachy o grubości 2 mm, dlaczego jest niewidoczny w przypadku blach wyżarzonych. W punkcie 7.3 Doktorant wyznacza współczynniki do równań umocnienia plastycznego Hollomona, Swifta, Voce'a i El-Magda oraz określa średni błąd dopasowania modeli umocnienia. Rozdział kończy szczegółowe zestawienie współczynników materiałowych w funkcji czasu starzenia naturalnego dla poszczególnych blach w formie przejrzystych tabel. Przedstawione dane mają duże znaczenie praktyczne, gdyż pozwalają na projektowanie procesu technologicznego wytłóczek. Doktorant mając do dyspozycji dane materiałowe

uchyla się jednak od odpowiedzi na pytanie czy na uzyskane wartości ma wpływ grubość blachy.

Rozdział ósmy poświęcony jest badaniom sprężynowania blach podczas gięcia. Jest to zjawisko, które ma największy wpływ na projektowanie oprzyrządowania do kształtowania blach, a jego znajomość pozwala zaprojektować przyrząd z optymalnymi promieniami narzędzi, strzałkami ugięć stempli itp. unikając tzw. metody prób i błędów. Doktorant przystosował do badań stanowisko składające się z maszyny wytrzymałościowej i przyrządu do gięcia typu „V” z promieniami gięcia $r=5\text{mm}$. W czasie prób rejestrowana była siła zginająca w funkcji strzałki ugięcia. Badania polegały na zginaniu próbek o szerokości 40 mm ze strzałką ugięcia 20 mm, przy czym gięcie przebiegało w dwóch wariantach tj. w jednym zabiegu na 20 mm i w 8 zabiegach z odciażaniem próbki aż do osiągnięcia ugięcia 20 mm. Badania przeprowadzono dla materiału w stanie wyżarzonym i po przesycaniu podczas starzenia w czasie do dwóch godzin. Wynikiem było uzyskanie dla każdej z grubości blachy charakterystyki współczynnika sprężynowania K w funkcji warunków geometrycznych tj. w/f_g . W posumowaniu rozdziału recenzentowi brak jest wyraźnego stanowiska Autora co ma bardziej istotny wpływ na sprężynowanie blachy proces starzenia naturalnego czy warunki geometryczne kształtowania.

W rozdziale dziewiątym *Modelowanie MES procesu gięcia badanych blach* Doktorant prezentuje weryfikację modeli MES gięcia blach w stanie wyżarzonym i po przesycaniu z zastosowaniem oprogramowania MSC.MARC/Menat. Symulacja zostaje przeprowadzona z wykorzystaniem pięciu modeli numerycznych: model 2D w płaskim stanie odkształcenia bez warstwy plateru; model 2D z warstwą plateru; model 3D powłokowy z izotropowym warunkiem H-M; model 3D powłokowy anizotropowy Hilla; model 3D powłokowy anizotropowy Barlata. Dla badanych eksperymentalnie prób gięcia Autor przeprowadził symulację numeryczną wg wymienionych modeli porównując wartości współczynnika sprężynowania i siły oraz analizę błędów. Z przedstawionego w rozdziale materiału i komentarzy wynika, że Doktorant dobrze opanował problematykę zastosowania symulacji numerycznej w obróbce plastycznej.

W rozdziale dziesiątym zweryfikowano dane otrzymane w badaniach laboratoryjnych i symulacyjnych podczas wytwarzania w warunkach przemysłowych wylóczki z blachy AlCu4Mg1 (AW-2024) o grubości 1 mm w stanie wyżarzonym i po przesycaniu w trakcie starzenia naturalnego. Doktorant w projektowaniu procesu technologicznego wykorzystał programy CatiaV5 i Pam-Stamp. W wylóczce zostało wyodrębnione pięć charakterystycznych przekroi na których dokonując pomiarów kątów gięcia i grubości blachy zweryfikowano obliczenia numeryczne. Wylóczki wykonano z blachy wyżarzonej i po przesycaniu w trakcie starzenia naturalnego oraz poddano badaniom defektoskopowym. Recenzent z wielką trudnością zidentyfikował miejsce występowania na wylóczce występowania wymiaru „O”, w którym dokonywano pomiarów sprawdzających, konieczne jest przedstawienie rysunku konstrukcyjnego, aby czytelnik miał rozeznanie w tzw. skali problemu. Cennym ustaleniem tego etapu jest zidentyfikowanie znacznego występowania wad defektoskopowych w czasie 2 godziny po przesycaniu.

Rozdział jedenasty *Posumowanie i wnioski* zawiera krótkie streszczenie osiągniętych rezultatów i 11 wniosków o charakterze: oryginalnym, aplikacyjnym, naukowym i utylitarnym. Z wniosków należy zauważyć: pierwszy o liniowym wzroście własności wytrzymałościowych dla wszystkich grubości blach w funkcji czasu starzenia; szósty o liniowym wzroście współczynnika sprężynowania K w zależności od czasu starzenia i warunków geometrycznych tj. stosunku w/f_g ; jedenasty o możliwości wykorzystania MES do prognozowania defektów wylóczek na podstawie znajomości przebiegu krzywej odkształcalności blachy i czasu po przesycaniu. Podsumowując należy stwierdzić, że prezentowane podsumowanie i wnioski są ściśle związane z prezentowanym materiałem oraz

wynikają z opanowania ogólnej wiedzy w zakresie obróbki plastycznej ze wskazaniem na technologię kształtowania blach.

4. Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta

Z przedstawionej charakterystyki wynika, że rozprawa pomimo wskazanych niedociągnięć spełnia wymagania pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału stawianych w tego typu pracach. Jako oryginalne osiągnięcie doktoranta należy uznać przeprowadzenie badań własności plastycznych blach ze stopu aluminium AlCu4Mg1 w trakcie starzenia naturalnego i wykazanie znaczących różnic tych własności, adaptację stanowiska badawczego pod kątem prowadzonych eksperymentów oraz opracowanie symulacji numerycznych przy użyciu nowoczesnych komercyjnych programów komputerowych. Oryginalnym i ważnym osiągnięciem w aspekcie zastosowań praktycznych, jest kompleksowe opracowanie dla badanych blach współczynników materiałowych w równaniach konstytutywnych naprężenia uplastyczniającego w funkcji czasu starzenia po przesycaniu. Ponadto, wykazanie skuteczności tych współczynników w prognozowaniu sprężynowania z wykorzystaniem nieliniowej MES, w procesach plastycznego kształtowania badanych blach bezpośrednio po obróbce cieplnej i w czasie naturalnego starzenia do dwóch godzin po przesycaniu. Przedstawiony materiał jest merytorycznie poprawny, autor wykazał się znajomością literatury przedmiotu. Sformułował problem badaczy i zaplanował poprawnie badania eksperymentalne w celu weryfikacji oraz zidentyfikował zjawiska w trakcie badań. Posługiwał się nowoczesną aparaturą badawczą oraz opracował materiał badawczy wykazując się znajomością metod statystycznych. Otrzymane wyniki pozwoliły określić parametry materiałowe do symulacji numerycznych dla stopowej blachy aluminiowej. Sformułował wnioski w aspekcie naukowym i użytkowym. Na tej podstawie recenzent stwierdza, że Doktorant opanował metodykę prowadzenia samodzielnie badań naukowych.

5. Uwagi wymagające wyjaśnienia i problemy do dyskusji na publicznej obronie pracy

- Proszę przedstawić wyniki osiągnięte w najbardziej zbliżonych tematycznie cytowanych w pracy pozycjach literaturowych i przeprowadzić dyskusję z wynikami własnymi, wskazać istotne poszerzenie wiedzy.
- Proszę zaproponować przeredagowanie tezy w aspekcie uwag do rozdziału trzeciego i uzasadnić.
- Dlaczego doktorant skupił się na badaniach stosunkowo niewielkiego kąta gięcia ok. 30°. Większość przypadków gięcia blach w technice to 90° z trudnościami wynikającymi z ograniczonego przesuwu stempla w głębi tłoczni. Podsumowując dlaczego wybrano akurat taki maksymalny kąt gięcia. Czy otrzymane współczynniki można wykorzystać przy większych kątach gięcia.
- Proszę przedstawić rysunek konstrukcyjny badanej wytłoczki ze wskazaniem gdzie występuje wymiar „O” w którym dokonywano pomiarów weryfikujących obliczenia. Proszę uzasadnić wybór tego miejsca na wytłoczce oraz wyrazić opinię o skali trudności technologicznej wspomnianego detalu.
- Czy w wyniku przeprowadzonych badań oraz znając tzw. ograniczenia przemysłowe Doktorant jest w stanie zalecić do realizacji technologicznej jeden z badanych wariantów

6. Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzent stwierdza, że rozprawa stanowi rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego technologii kształtowania blach ze stopów aluminium podanych obróbce cieplnej. Ponadto Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz aspektami utylitarnymi zastosowania jej wyników. Przedstawiona dysertacja wskazuje na opanowanie przez Doktoranta podstaw prowadzenia badań teoretycznych i doświadczalnych w zakresie procesów obróbki plastycznej pod kątem optymalizacji parametrów technologicznych. Tym samym spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Dz.U. z 2023 r. poz.742 wraz z późniejszymi zmianami. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Grzegorza Pasowicza do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę, obszerny i konsekwentnie zrealizowany program badawczy oraz wartościowe wyniki nie tylko z poznawczego, ale także z praktycznego punktu widzenia, które znacząco poszerzają wiedzę w zakresie wyznaczania i doboru parametrów materiałowych w równaniach konstytutywnych naprężenia uplastyczniającego oraz modelowania procesów plastycznego kształtowania blach ze stopu AlCu4Mg1 w trakcie starzenia naturalnego, a ponadto współautorstwo 5 artykułów naukowych w zakresie tematyki rozprawy (w tym 2 za 140 pkt i 2 za 100 pkt wg punktacji MNiSW), wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Pasowicza.

15.02.25 Marek Kowalczyk