

	<b>PAŃSTWOWA AKADEMIA NAUK STOSOWANYCH w CHELMIE</b>
	<b>INSTYTUT NAUK TECHNICZNYCH I LOTNICTWA</b>
	ul. Pocztowa 54, 22-100 Chełm, tel.: +48 82 565 88 95

dr hab. inż. Arkadiusz Tofil, prof. uczelni  
atofil@panschelm.edu.pl

Chełm, 22.01.2025 r.

## **Recenzja**

### **Rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Pasowicza pod tytułem „Wpływ starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności blach ze stopu AlCu4Mg1”**

Podstawą opracowania recenzji pracy jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza prof. dr hab. inż. Andrzej Burghardt nr RM-530-09-03/2024

#### **1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Tematyka pracy doktorskiej przedłożonej do recenzji poświęcona jest kluczowej technologii kształtowania blach stosowanej w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i maszynowym. Przemysł lotniczy z uwagi na największe wykorzystanie stopów aluminium jest głównym odbiorcą produktów w postaci wyłoczek. Rozprawa mgr inż. Grzegorza Pasowicza koncentruje się na jednym z kluczowych zagadnień inżynierii materiałowej w przemyśle lotniczym, tj. na wpływie procesu starzenia naturalnego na plastyczność blach aluminiowych typu AlCu4Mg1. Tematyka jest wysoce istotna z punktu widzenia praktyki przemysłowej, gdzie materiały aluminiowe, szczególnie te posiadające zdolność do utwardzania wydzieleniowego, znajdują szerokie zastosowanie ze względu na swoje korzystne właściwości mechaniczne i niską masę.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest właściwie sformułowany i odpowiada jej treści jednoznacznie określając tematykę omówioną w ramach przeprowadzonych przez Doktoranta badań.

#### **2. Treść rozprawy**

Przedłożona do recenzji praca składa się z dziewięciu głównych rozdziałów, podzielonych odpowiednio na tematyczne podrozdziały. Praca zawiera spis treści, wprowadzenie, wykaz ważniejszych oznaczeń, podsumowanie i wnioski a także spis literatury (cytowanej w tekście

rozprawy), tabel i rysunków. Na końcu pracy umieszczono streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim. Ogółem praca zawiera 185 stron (wraz ze spisem literatury i streszczeniami).

Wprowadzenie do pracy przedstawia ogólne zagadnienia związane z tematyką pracy a także wskazuje uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań związanych z tematyką pracy.

Pierwszym rozdziałem po wprowadzeniu jest Analiza stanu zagadnienia. W ramach tego rozdziału autor rozprawy przedstawia informacje na temat stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym, ich podział jak również charakterystykę stopów serii 2xxx. Doktorant przedstawia wybrane grupy części lotniczych wykonywane z blach aluminiowych oraz omawia główne metody kształtowania wytłoczek i ich podział ze względu na kształt powierzchni wytłoczek tj. wytłoczki o powierzchni rozwijalnej i powierzchni nierozwijalnej. Właściwą uwagę poświęca również na omówienie metod formowania wytłoczek z blach do utwardzania wydzieleniowego. Doktorant w ramach analizy stanu zagadnienia przedstawia podstawowe informacje dotyczące symulacji komputerowych procesów kształtowania wytłoczek z szerszym komentarzem dotyczącym metody elementów skończonych (MES) i warunków plastyczności. Podsumowaniem rozdziału jest wskazanie zasadności podjęcia badań w ramach rozprawy, co jest logicznym i poprawnie przeprowadzonym postępowaniem w ramach niniejszego rozdziału.

Cele pracy sformułowano jako wyznaczenie charakterystyk technologicznej plastyczności blach ze stopu aluminium AlCu4Mg1 (AW-2024) w stanie wyżarzonym oraz po obróbce cieplnej w trakcie starzenia naturalnego w postaci przebiegu krzywych umocnienia odkształceniowego. Następnym krokiem jest wyznaczenie współczynników materiałowych w równaniach konstytutywnych oraz wyznaczenia zależności współczynnika sprężynowania w funkcji względnego ugięcia próbki i grubości pasma oraz dla blach po obróbce cieplnej zależności współczynnika sprężynowania w funkcji względnego ugięcia próbki i czasu starzenia naturalnego po przesycaniu. Cel pracy rozszerzono o ocenę skuteczności modelowania MES dla procesów gięcia i kształtowania wytłoczki przemysłowej w oparciu o parametry opracowane w ramach recenzowanej pracy.

Cele pracy można ocenić jako uzasadnione i odpowiadające potrzebom uzupełnienia rozwiązań zapewniających efektywniejsze projektowanie procesów plastycznego kształtowania wytłoczek.

Autor w oparciu o przyjęte cele sformułował następującą tezę: „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 właściwości materiału blachy na etapie analizy i projektowania procesu technologicznego wytłoczki, co znacząco zwiększy dokładność obliczeń inżynierskich, a tym samym wyeliminuje lub ograniczy potrzebę stosowania tzw. metody prób i błędów”. Teza pracy jest sformułowana w sposób właściwy i odpowiada tematyce rozprawy.

W kolejnym rozdziale pt. „Plan badań” przedstawiono program badawczy. Badania podzielono na 7 etapów. Pierwsze cztery etapy dotyczą badań eksperymentalnych w zakresie własności badanych blach dla różnych grubości. Kolejne dwa etapy to modelowanie numeryczne MES procesów gięcia. Ostatni etap badań obejmuje modelowanie MES oraz badania eksperymentalne dla tłoczenia wytłoczki produkcyjnej z blachy w stanie wyżarzonym i po obróbce cieplnej w trakcie starzenia naturalnego. Przyjęty plan badań odpowiada zakresowi pracy i umożliwia uzyskanie danych niezbędnych do realizacji celu pracy.

Kolejny rozdział poświęcony został przedstawieniu materiału, na którym prowadzono badania. Autor przedstawił skład chemiczny oraz przedstawił na rys. 5.1 - 5.4 mikrostrukturę blach o różnej grubości.

Rozdział 6 stanowi przedstawienie wyników badań właściwości plastycznych blach w stanie wyżarzonym. Właściwości blach (w stanie dostawy) wyznaczono na podstawie statycznej próby jednoosiowego rozciągania na maszynie wytrzymałościowej.

Następny rozdział dotyczy badania właściwości plastycznych blach po obróbce cieplnej. Badaniami objęto blachy po przesycaniu i w trakcie starzenia naturalnego o grubościach 0,5; 1 oraz 2mm. Badania przeprowadzono dla 135 próbek. Określono wpływ czasu starzenia na granicę plastyczności a wyniki przedstawiono dla każdej z grubości w postaci czytelnych wykresów. Podobnie zostały przeprowadzone badania dotyczące wpływu czasu starzenia na przebieg krzywej umocnienia. Doktorant w ramach 7 rozdziału przedstawia również wpływ czasu starzenia na współczynniki w modelach naprężenia uplastyczniającego dla modeli Hollomona, Swifta, Voce’a oraz El-Magda. Wyniki przedstawiono w czytelnych tabelarycznych zestawieniach.

Kolejny rozdział został poświęcony badaniu sprężynowania blach po gięciu. Autor rozprawy przedstawia stanowisko badawcze, metodykę wyznaczania współczynnika sprężynowania oraz charakterystyki sprężynowania blach w stanie wyżarzonym jak również blach po obróbce cieplnej. Prezentowane wyniki są przedstawione w postaci tabelarycznej jak również w postaci czytelnych wykresów.

Rozdział 9 został poświęcony modelowaniu MES procesu gięcia badanych blach. Autor przedstawił przyjęte modele numeryczne jak również uwzględnił w pracy analizę błędów

względne obliczonego współczynnika sprężynowania. W ramach niniejszego rozdziału przedstawiono również wyniki badań obejmujące modelowanie MES gięcia blachy po obróbce cieplnej.

Ostatni rozdział pracy stanowi ocenę opracowanych współczynników modeli naprężenia uplastyczniającego na przykładzie wytłoczki produkcyjnej. W rozdziale tym doktorant przedstawia zarówno wyniki modelowania numerycznego MES jak również wyniki badania wytłoczki produkcyjnej. Przedstawia również ocenę skuteczności opracowanych współczynników modelu naprężenia uplastyczniającego opartą na weryfikacji wyników symulacji MES z danymi uzyskanymi podczas prób eksperymentalnych.

W podsumowaniu rozprawy doktorant przedstawił uzyskane w ramach zrealizowanego programu badań wyniki i przedstawił łącznie 11 wniosków, z których jednoznacznie wynika możliwość wykorzystania uzyskanych w ramach rozprawy wyników w warunkach przemysłowego projektowania procesów tłoczenia.

Autor w swojej pracy powołuje się na bardzo bogatą bibliografię, obejmującą 213 pozycji. Cytowane w doktoracie publikacje związane są z tematyką prowadzonych badań i w większości stanowią dorobek zagranicznych pracowników naukowych.

### **3. Ogólna ocena pracy**

Doktorant podjął się przeprowadzenia kompleksowej analizy teoretyczno-doświadczałnej, która miała na celu wyznaczenie charakterystyk technologicznej plastyczności blach ze stopu aluminium AlCu4Mg1. Zadanie to Doktorant wykonał, przeprowadzając serię badań doświadczałnych na obiektach rzeczywistych oraz modelując proces numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Zrealizowane badania oparto głównie na próbie jednoosiowego rozciągania próbek przygotowanych z blach o różnych grubościach ze stopu aluminium AlCu4Mg1, które wcześniej poddano wyżarzaniu oraz przesycaniu. Zaś wyznaczenie charakterystyk technologicznych ograniczono do określenia stopnia sprężynowania podczas gięcia. Wydaje się, że w przypadku analizy własności technologicznych blach kształtowanych plastycznie podstawowym testem jest próba tłoczności. Zwłaszcza, że możliwe do uzyskania wartości odkształceń w próbie rozciągania są bardzo małe. Ponadto Doktorant w swojej pracy ograniczył się jedynie do określenia wpływu czasu starzenia naturalnego na własności plastyczne badanych materiałów, co jest stosunkowo dobrze poznanym zjawiskiem, o czym może świadczyć ogromna liczba publikacji na ten temat. Natomiast w dość ograniczonym stopniu Doktorant skupił się na modelowaniu numerycznym, a w szczególności na próbie opracowania modelu numerycznego, który w szczegółowy sposób

uwzględniałby zmianę własności plastycznych i wytrzymałościowych podczas zachodzących przemian fazowych w odkształcanym materiale. Należy również wskazać, że wyznaczone w rozprawie według zaproponowanego schematu charakterystyki plastyczne mogą być zastosowane tylko dla z góry znanego stopnia umocnienia wydzieleniowego, określonego czasem starzenia naturalnego. Ogranicza to w znacznym stopniu efektywne modelowanie procesów z wykorzystaniem zmodyfikowanych modeli materiałowych (biorąc pod uwagę zmianę własności plastycznych nawet o 30% w przeciągu 2 godzin), gdyż wymaga każdorazowo modyfikacji równań konstytutywnych.

Niemniej jednak należy podkreślić, że pomimo tych mankamentów zakres prowadzonych badań był bardzo obszerny. Doktorant nie ograniczył się tylko do analizy pojedynczego wariantu, a dokonał szerokiej analizy wpływu sposobu przygotowania wsadu ze stopu aluminium do kształtowania plastycznego (stan wyżarzany oraz stan przesycany), wpływu parametrów geometrycznych (różna grubość materiału) oraz określenia wartości współczynnika sprężynowania w zależności od stanu początkowego materiału, grubości blachy oraz stopnia umocnienia wydzieleniowego, co wymagało ogromnego wkładu pracy i doświadczenia w planowaniu i prowadzeniu eksperymentu. Warty podkreślenia jest również fakt, że Doktorant dokonał oceny opracowanych modeli materiałowych na przykładzie kształtowania wytłoczki produkcyjnej w warunkach przemysłowych. Doktorant wykazał się również znajomością nowoczesnego zaplecza badawczego. Wykorzystując techniki numeryczne Doktorant przeprowadził wielowariantowe symulacje MES procesów gięcia, na podstawie których dokonał oceny wpływu stopnia umocnienia wydzieleniowego na wartość współczynnika sprężynowania. Pewne wątpliwości budzi tutaj sposób przygotowania modeli numerycznych oraz przyjęte do obliczeń warunki brzegowe, które zostały przedstawione w zawiły sposób, głównie jako odniesienia do literatury. Nie podano również podstawowych parametrów geometrycznych narzędzi, takich jak promień stempla, odległość między podporami, których wartość również będzie miała wpływ na wielkość sprężynowania giętych blach.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant opracował przebiegi krzywych umocnienia odkształceniowego dla blach ze stopu aluminium dla różnych faz umocnienia wydzieleniowego, a następnie powiązał je ze współczynnikami sprężynowania, które mają istotny wpływ na jakość kształtowanych wyrobów. Dzięki czemu możliwe jest modelowanie zjawisk zachodzących w trakcie obróbki plastycznej blach, takich jak sprężynowanie, czy deformacje.

Zakres pracy można uznać za wystarczający i obejmuje zarówno opracowanie modelu numerycznego MES i przeprowadzenie symulacji numerycznych, jak i zbudowanie stanowiska badawczego, zaplanowanie procedury pomiarowej i przeprowadzenie badań doświadczalnych. Doktorant wykazał się szeroką wiedzą z zakresu metod numerycznych mechaniki (MES), a także z zakresu metod eksperymentalnych mechaniki oraz umiejętnością planowania i wykonania eksperymentu.

Układ pracy jest poprawny, a jej redakcja jest dość staranna. Cele i teza rozprawy zostały określone właściwie, zaś przyjęty plan badawczy umożliwia spełnienie postawionych celów. Bibliografia opracowana jest adekwatnie do tematu pracy.

Biorąc powyższe pod uwagę, moja ogólna merytoryczna ocena rozprawy jest pozytywna. Poniżej przedstawiono uwagi krytyczne, które w większości mają charakter komentarzy dyskusyjnych i nie umniejszają pozytywnej oceny pracy.

#### **4. Pytania i uwagi krytyczne do pracy**

1. Dlaczego w pracy ograniczono się jedynie do prób jednoosiowego rozciągania, a całkowicie pominięto typowe dla blach metody badań, takie jak próba tłoczenia według Erichsena i Olsena (ISO 20482), próba rozciągania miseczki, itp.
2. W trakcie prowadzonych badań analizowano własności wytrzymałościowe i plastyczne blach o różnej grubości z jednego stopu aluminium w gatunku AlCu4Mg1. Uzyskane wyniki wskazują na bardzo duży rozrzut własności plastycznych dla różnych grubości, pomimo identycznych warunków przygotowania materiałów do badań. Co jest przyczyną tak dużych różnic własności plastycznych blach o różnych grubościach? Czy przy tak dużych różnicach możliwe jest uogólnienie wyników, tak aby były one utylitarne?
3. Jakie były parametry geometryczne narzędzi przyjętych do symulacji numerycznych oraz podczas prowadzonych prób doświadczalnych (podczas weryfikacji doświadczalnych wyników)? Sprężynowanie powrotne jest uzależnione również od tych parametrów (głównie wielkość promienia stempla, szerokość rowka matrycy lub rozstaw rolek między podporami w symulacjach, a także kąty matrycy i stempla). Nieuwzględnienie tych parametrów w prowadzonej analizie może powodować, że uzyskane wyniki będą słuszne tylko dla jednego przypadku i nie będą mogły być uogólnione.
4. Jaki wpływ na jakość uzyskanych wyników mają przyjęte uproszczenia podczas modelowania? Podczas prób doświadczalnych zrealizowano proces gięcia na prasie

krawędziowej, gdzie cykl gięcia odbywa się najczęściej z dogniataniem i przytrzymaniem materiału w końcowej fazie, zaś w drugiej operacji realizowano proces tłoczenia. Natomiast symulacje numeryczne prowadzono jedynie dla swobodnego gięcia. W rezultacie kinematyka płynięcia materiału jest zupełnie inna i może mieć wpływ na uzyskane wyniki. Również druga operacja może powodować zmianę geometrii wyrobu

## 5. Uwagi edytorskie

Redakcja pracy jest dość staranna. Należy stwierdzić, że Autor przedstawia wyniki swojej pracy w sposób poprawny, stwierdzenia i dobór słów odpowiadają treściom, do których się odnoszą a tabele zawarte w pracy są w pełni czytelne i zrozumiałe. Jednakże Autor pracy nie uniknął drobnych błędów, które nie wpływają na końcową ocenę pracy. Część z nich jest wynikiem stosowania potocznego nazewnictwa lub zwykłych pomyłek edycyjnych.

## 6. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę pozytywną ocenę rozprawy przedstawioną powyżej oraz dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktoranta spełniający wymagania ustawowe stwierdzam, że **rozprawa doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Pasowicza pod tytułem „Wpływ starzenia naturalnego na charakterystyki technologicznej plastyczności blach ze stopu AlCu4Mg1”** spełnia warunki stawiane przez ustawę „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce” z dn. 20.07. 2018 r. (t. j. Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) i na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.