



**KATEDRA KOMPUTEROWEGO MODELOWANIA
I TECHNOLOGII OBRÓBKII PLASTYCZNEJ**

WYDZIAŁ MECHANICZNY
POLITECHNIKA LUBELSKA
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 LUBLIN



tel.: +48 81 5384245

fax: + 48 81 5384241

e-mail: a.gontarz@pollub.pl

Dr hab. inż. Andrzej Gontarz, prof. nadzw. PL
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska

Lublin, 5 grudnia 2014 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Julity Winowieckiej**

p.t. „Kształtowanie plastyczne blach ze stopów tytanu i aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym”

Podstawę prawną recenzji stanowi Ustawa o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późn. zm.), Rozporządzenie Prezesa Rady Ministrów w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskim i habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora i Uchwała Rady Wydziału Budowy Maszyn Politechniki Rzeszowskiej z dnia 24 września 2014 r.

1. Omówienie recenzowanej pracy

Opracowana przez Doktorantkę praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny i dotyczy kształtowania plastycznego blach ze stopów aluminium i tytanu, w szczególności stosowanych w przemyśle lotniczym. Procesy produkcji części z blach, w tym analizowane w pracy wytłaczanie, są dobrze poznane i powszechnie stosowane w zakładach branżowych. Niemniej jednak ich prawidłowa realizacja niejednokrotnie jest zadaniem trudnym, w szczególności w odniesieniu do materiałów trudno odkształcalnych, do których zalicza się niektóre stopy aluminium i tytanu. Stąd też prace naukowe wzbogacające wiedzę w tym zakresie są potrzebne. Podjęta tematyka jest zatem uzasadniona, a uzyskane wyniki mogą mieć charakter użyteczny.

Praca zawiera 164 strony i jest podzielona na 9 rozdziałów, w tym wstęp i wnioski. Sześć z nich (od 4 do 9) o objętości 112 stron dotyczy badań własnych.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie, Doktorantka przedstawiła rodzaje materiałów i ich rozwój w zastosowaniach lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem stopów Al i

Ti. Wskazała również na pewne trudności technologiczne związane z kształtowaniem plastycznym blach z tych materiałów, nawiązując w ten sposób do tematyki badań opisanych w pracy.

W rozdziale drugim, o objętości 16 stron, przedstawiona została charakterystyka stopów aluminium i tytanu stosowanych w przemyśle lotniczym. Podano rodzaje stopów, składy chemiczne, własności i przykładowe zastosowania. Omówiono również zagadnienie kształtowania wsadów typu Tailor Welded Blanks tj. wsadów łączonych z blach o różnych właściwościach. Przedstawiono metody łączenia oraz wady i zalety takich wsadów w procesach produkcyjnych. Rozdział ten jest ściśle związany z tematyką pracy.

W dwunastostronicowym rozdziale trzecim zamieszczono przegląd opracowań specjalistycznych dotyczących problemów wytwarzania części lotniczych z blach ze stopów aluminium i tytanu. Treść rozdziału zawiera charakterystykę istotnych czynników w procesach wytlaczania i gięcia tych gatunków materiałów. Szczegółowo podano wyniki badań prezentowane w wybranych publikacjach naukowych. W szczególności scharakteryzowano zjawiska ograniczające, takie jak: sprężynowanie powrotne blachy, pękanie, pocienienie, fałdowanie, narosty na narzędziach. Przedstawiono wpływ tarcia na przebieg procesów oraz problematykę wytlaczania blach spawanych. Podane informacje stanowią dobre wprowadzenie do dalszej części pracy zawierającej badania własne.

W rozdziale czwartym sformułowano cel i przedstawiono zakres pracy. Za główny cel przyjęto określenie możliwości kształtowania plastycznego blach ze stopów aluminium i tytanu (w tym blach spawanych) stosowanych do produkcji części lotniczych, z uwzględnieniem zjawisk ograniczających takich jak: sprężynowanie powrotne, fałdowanie i pękanie. Cel pracy jest jasno sformułowany i informuje o kierunku badań zmierzających do określenia wpływu parametrów procesów kształtowania na wymienione zjawiska.

Rozdział piąty, o objętości 16 stron, dotyczy metodyki badań realizowanych w ramach pracy. Podano w nim szczegółowo informacje dotyczące: wyznaczania właściwości mechanicznych oraz odkształceń granicznych, badań tłoczności i sprężynowania powrotnego blach. Biorąc pod uwagę obszerność pracy, niektóre podstawowe informacje można było podać krócej, w formie bardziej ogólnej np. opisy: wielkości wyznaczanych w statycznej próbie rozciągania, warunku plastyczności według hipotezy H-M-H czy teorii plastycznego płynięcia Levy'ego - Misesa.

Rozdział szósty, w którym przedstawiono wyniki badań doświadczalnych jest jednym z zasadniczych rozdziałów pracy. Na 36-ciu stronach dla blach z wybranych stopów aluminium i tytanu zaprezentowano: rezultaty uzyskane w jednoosiowej próbie rozciągania z uwzględnieniem anizotropii oraz w próbie tłoczności metodą Erichsena, wyznaczone krzywe graniczne, wyniki badań sprężynowania powrotnego blach. Wykonane testy są typowe, często stosowane do

określenia cech technologicznych blach. Należy jednak stwierdzić, że zawarte w rozdziale treści zawierają bogaty materiał badawczy, który jest rezultatem dużego nakładu pracy Doktorantki.

W rozdziale siódmym, obejmującym 49 stron, przedstawiono wyniki analizy numerycznej procesu gięcia i zjawiska sprężynowania powrotnego oraz procesu wytłaczania wytłoczek osiowosymetrycznych ze stopów aluminium i tytanu, w tym próbek spawanych z gatunku Grade 2 i Grade 5. Końcowy podrozdział zawiera analizę procesu wytłaczania owiewki z tytanu Grade 2 stosowanej w budowie samolotów, w aspekcie minimalizacji różnicy wymiarów (spowodowanej sprężynowaniem powrotnym), pomiędzy częścią nominalną i wytłoczką. Do symulacji zastosowano specjalistyczny program PAM-STAMP 2G, który umożliwił analizę zjawisk sprężynowania powrotnego, fałdowania blachy oraz pęknięcia, przy różnych warunkach tarcia i sile docisku dociskacza w procesie wytłaczania. W rozdziale zamieszczono obszernie wyniki dużej liczby symulacji, a więc jego przygotowanie było pracochłonne. Pozytywnie należy ocenić formułowanie syntetycznych wniosków po każdym etapie badań.

Siedmiostronicowy rozdział ósmy zawiera krótkie porównanie wyników badań doświadczalnych i symulacji numerycznych w zakresie kątów sprężynowania powrotnego, głębokości wytłoczek i rozkładu grubości ścianki przy wytłaczaniu, a także jakości owiewki lotniczej.

W rozdziale dziewiątym liczącym 2 strony zawarto wnioski sformułowane na podstawie wykonanych badań doświadczalno-teoretycznych. Ocenia się je jako prawidłowe i znajdujące odzwierciedlenie w przedstawionym w pracy materiale (poza wnioskiem pierwszym, który ma formę informacji).

Rozprawa zakończona jest spisem bibliograficznym zawierającym 130 pozycji, z czego około 70% to opracowania anglojęzyczne.

Na końcu rozprawy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim.

2. Ocena ogólna

Oceniana praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Doktorantka podjęła badania procesu wytłaczania i gięcia blach ze stopów aluminium i tytanu stosowanych do produkcji części lotniczych. Praca napisana jest poprawną polszczyzną i wykonana na dobrym poziomie edycyjnym. Przyjęty do realizacji temat pracy doktorskiej jest uzupełnieniem wyników badań publikowanych na świecie. Realizacja badań wymagała od Doktorantki znajomości teorii i technologii, umiejętności modelowania numerycznego i samodzielnego prowadzenia badań doświadczalnych w zakresie procesów kształtowania plastycznego blach. Pozytywnie należy ocenić zawarty w pracy bogaty materiał dotyczący badań doświadczalnych i analiz numerycznych. Praca należy zatem do

pracochłonnych, jej wykonanie wymagało dużego wysiłku i czasu. Do realizacji badań użyto dobrej klasy urządzeń i specjalistycznego oprogramowania dedykowanego analizowanym procesom. Dochowano dużej staranności zarówno przy prowadzeniu eksperymentów, jak też symulacji numerycznych. Do osiągnięć Doktorantki należy zaliczyć określenie, dla badanych gatunków blachy, wpływu parametrów procesu wytlaczania, w szczególności siły dociskacza i warunków tarcia na jego przebieg i zjawiska ograniczające, do których należą fałdowanie i pękanie. Interesujące są również uzyskane wyniki dotyczące sprężynowania powrotnego oraz wytlaczania wytłoczek z wsadów spawanych z blach w gatunku Grade 2 i Grade 5. W wyniku wykonanych badań Doktorantka zrealizowała cele pracy. Całość rozprawy oceniam pozytywnie.

W tak dużej objętościowo pracy trudno ustrzec się błędów gramatycznych i niedociągnięć edycyjnych. Nie wpływają one istotnie na jakość pracy, stąd nie zostały wskazane w recenzji. Zostały natomiast zaznaczone w tekście i przekazane Doktorantce w nadziei, że ustrzeże się ich w dalszej pracy naukowej. W rozprawie występują również pewne niejasności, które w mojej opinii wymagają wyjaśnień:

1. Przedstawione w podrozdziale 7.1. wyniki symulacji numerycznych znacząco różnią się od rezultatów doświadczalnych. Dla większości badanych materiałów, w eksperymencie uzyskano kąty sprężynowania $\Delta\alpha_c$ dużo większe od teoretycznych (Al 5251 - o 62%; Al 2024 - o 30%; Al 2017A - o 12%; Al 7075 - o 88%; Grade2 - o 65%; Grade5 - o 17%). Tylko dla gatunku Grade 4 uzyskano dobrą zgodność (różnica wyniosła ok. 2%). W przypadku kąta sprężynowania $\Delta\alpha_d$ (wyrażającego różnicę pomiędzy kątem pod obciążeniem i po odciążeniu pomiędzy prostymi fragmentami ramion próbki) dla materiału Grade 2 różnica wyniosła nawet ponad 370% (s. 98, tab. 7.5). Wyniki te wskazują, że jakość zastosowanego modelu numerycznego w zakresie wyznaczania kątów sprężynowania jest niezadowalająca dla obu stosowanych metod obliczeniowych: jawnej i niejawnej. Skąd wynika rozbieżność pomiędzy rezultatami teoretycznymi i doświadczalnymi? W jaki sposób można poprawić jakość modelu numerycznego w zakresie obliczeń kątów sprężynowania?
2. W podrozdziale 7.2 przedstawiono wyniki symulacji procesu wytlaczania próbek spawanych z materiału Grade 2 i Grade 5. W modelu numerycznym uwzględniono obszar spoiny i strefy wpływu ciepła po stronie Grade 2 i Grade 5 poprzez wprowadzenie trzech dodatkowych modeli materiałowych (tab. 7.6 na str. 103 i rys. 7.12 na str. 104). W pracy nie podano z jakiego źródła pochodzą modele opisujące materiał strefy wpływu ciepła (badania własne czy literatura) oraz w jaki sposób zostały wyznaczone. Nie podano też źródła i

metody wyznaczenia krzywych odkształceń granicznych dla tych stref. Jest to o tyle istotne, że prognozowane pęknięcia wystąpiły właśnie w obszarze strefy wpływu ciepła.

3. Również daje się odczuć niedostatek informacji dotyczących modelu materiałowego opisującego tytan w gatunku Grade 2, zastosowanego w symulacji procesu wytłaczania owiewki lotniczej. Na str. 133 podano ogólnie, że zastosowano model sprężysto-plastyczny z umocnieniem kinematycznym, nie podając żadnych dodatkowych szczegółów. Można wnioskować, że jest to inny model niż stosowany we wszystkich pozostałych obliczeniach w pracy. Z jakiego źródła pochodzi model? Skąd wynika zastosowanie w tym przypadku innego modelu niż w pozostałych obliczeniach? Jaka jest dokładność zastosowanego modelu w aspekcie modelowania zjawiska sprężynowania, które przyjęto za podstawę optymalizacji procesu wytłaczania owiewki?
4. W podrozdziale 6.1 na str. 59-60 podano, że w przypadku tytanu Grade 4 największą wytrzymałość na rozciąganie odnotowano dla próbek wyciętych pod kątem 90° do kierunku walcowania blachy, natomiast z tab. 6.6 wynika, że jest ona największa dla próbek wyciętych pod kątem 45° do kierunku walcowania. Ponadto należy zauważyć, że w przypadku próbek wyciętych pod kątem 90° uzyskano stosunkowo duży rozrzut wyników (ok. 4,5%) przy badaniu tylko dwóch próbek. Dlaczego nie wykonano badań uzupełniających w celu uzyskania bardziej miarodajnego wyniku w zakresie wytrzymałości na rozciąganie?

Powyzsze uwagi w większości mają charakter dyskusyjny i ustosunkowanie się do nich Doktorantki wzbogaci podane treści.

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Julity Winowieckiej zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Autorka wykazała należyłą wiedzę, umiejętności prowadzenia badań naukowych i przedstawiania wyników.

Na podstawie podanej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Julity Winowieckiej spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późn. zm.). Wniosuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

