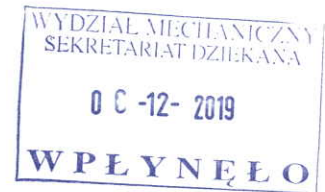


Gdańsk, 2.XI.2019 r.

Prof. dr inż. Włodzimierz Przybylski, prof. zw. PG  
Wydział Mechaniczny,  
Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji  
Politechnika Gdańska



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. **Katarzyny KORZYŃSKIEJ**  
pt. „**Badania wpływu procesu pneumokulowania na wytrzymałość zakładkowych  
połączeń klejowych**”

### 1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą wykonania niniejszej recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej nr dz.WM/379/2019 z dnia 2 października 2019 roku.

### 2. Informacje ogólne o rozprawie

Rozprawa składa się z 133 stron w tym tekstu merytorycznego 112 stron oraz 87 rysunków, 30 tabel i spisu literatury obejmującego 181 pozycji (w tym 6 dotyczących stron internetowych). Rozprawa nie zawiera streszczenia. Promotorem jest dr hab. inż. Władysław Zielecki, prof. PRZ a promotorem pomocniczym dr inż. Sławomir Świrad.

### 3. Ocena wyboru problematyki rozprawy

Rozprawa jest związana tematycznie z rozwojem technologii klejenia stosowanej w łączeniu części metalowych, szczególnie stopów tytanu w konstrukcjach lekkich. Głównym celem rozprawy jest sprawdzenie możliwości zwiększenia wytrzymałości połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V przez zastosowanie kulowania

(kulkowania) powierzchni klejowych zakładkowo. Kulowanie jest bowiem jedną z metod umocniającego nagniatania dynamicznego w wyniku którego można uzyskać korzystny stan warstwy wierzchniej obrobionych przedmiotów. Określenie w wyniku badań parametrów tej obróbki zapewniających najwyższy wzrost wytrzymałości połączeń klejowych, z jednoczesną minimalizacją kosztów operacji kulowania, uważam za celowe dla dalszego rozwoju technologii klejenia elementów metalowych.

Temat rozprawy i podjęte przez Autorkę problemy badawcze są aktualne i ważne dla doskonalenia technologii złączy klejowych - szczególnie stopów tytanu ale też i innych metali.

#### **4. Treść i struktura rozprawy**

Rozprawa składa się z 5-ciu rozdziałów, zawiera wprowadzenie, analizę literatury, tezy pracy, metodykę i wyniki badań oraz wnioski i spis analizowanej literatury.

W rozdziale 1. Autorka przeanalizowała literaturę naukową krajową i zagraniczną. Pozycje zagraniczne w językach obcych stanowią ok. 70 pozycji całego spisu literatury. Z zamieszczonego podsumowania analizy literatury z zakresu tematyki rozprawy wynika, że klejenie elementów konstrukcyjnych jest coraz częściej stosowaną metodą wykonywania połączeń – szczególnie w lotniczych lekkich konstrukcjach. Zwiększenie więc wytrzymałości takich połączeń ma bardzo duże znaczenie dla bezpieczeństwa konstrukcji i zmniejszenia kosztów ich wykonania. Znane są prace badawcze z zakresu klejenia zakładkowego stali np. S235JR [166, 170] lecz w odniesieniu do kulowania stopów tytanu brak jest wyczerpujących badań, szczególnie w odniesieniu do wpływu naprężeń technologicznych po kulowaniu na wytrzymałość złączy klejowych oraz kosztów ich wykonywania.

Teza rozprawy i główne cele zostały zamieszczone w rozdziale 2. Dla przyjętej tezy rozprawy wyznaczyła Doktorantka cele cząstkowe do realizacji badań i do opracowania modeli matematycznych, ujmujących wpływ parametrów kulowania na stan naprężeń i wytrzymałość na ścinanie klejowych zakładkek. Dwa cele cząstkowe (7 i 8) dotyczą optymalizacji parametrów i kosztów procesu pneumokulowania. W rozdziale 2 zamieszczony został również szczegółowy plan i zakres badań laboratoryjnych.

W rozdziale 3 Opisano szczegółowo metodykę badań, własności badanego stopu tytanu, konstrukcję i przygotowanie próbek do badań, przyjęte plany realizacji doświadczeń, optymalizacji warunków pneumokulowania oraz metodykę obliczania kosztów operacji pneumokulowania. Poza tym przedstawiono stanowisko do pneumokulowania próbek oraz metodykę pomiaru: naprężeń własnych, wytrzymałości na ścinanie oraz badań metalograficznych i elastooptycznych. Do klejenia próbek o wymiarach 100x25x2 mm stosowano klej dwuskładnikowy Araldite 2014-1. Grubość warstwy kleju wynosiła 0,4 mm, a czas sieciowania (docisku) próbek przebiegał w temperaturze 24°C przez 7 dni, ze stałym dociskiem.

W rozdziale 3 opisano również stosowane stanowiska badawcze i pomiarowe. Do pomiarów naprężeń własnych stosowano znaną metodę rentgenowską z użyciem dyfraktometru Protool xRD. Natomiast badania wytrzymałościowe próbek realizowano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON ElectroPlus E10000. Spoina klejowa próbek poddana była naprężeniom ścinającym.

Badania metalograficzne obejmowały badania struktury złomów połączeń klejowych z użyciem mikroskopu VEHO Discovery VMS-001. W celu oceny stanu powierzchni skleiny po rozdzieleniu zakładek próbki dokonano pomiarów struktury geometrycznej powierzchni metodą bezstykową za pomocą profilometru Altisurf 520. Dla zobrazowania rozkładu naprężeń w klejowym połączeniu przeprowadzono badania z użyciem plaryskopu elastooptycznego G.U.N.T. Wycięte próbki z płyty poliwęglanu były klejone w takich samych warunkach co próbki z tytanu. Na podstawie rozkładu (zagęszczenia) izoklin oceniono stopień koncentracji naprężeń w zakładkach.

## 5. Analiza i ocena rozprawy

Po bardzo dobrze przeprowadzonej analizie literatury z zakresu tematyki rozprawy Autorka przyjęła tezę rozprawy oraz sformułowała główny cel a także cele cząstkowe. Przyjęta teza jest następująca:

**„ Istnieje możliwość zwiększenia wytrzymałości na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych stopu tytanu Ti6Al4V poprzez umocnienie strefy zakładki metodą nagniatania strumieniowego rozproszonego (pneumokulowania).”**

Do przyjętej w rozprawie tezy nie mam zastrzeżeń merytorycznych. Na podstawie tak sformułowanej tezy wyznaczyła Autorka do realizacji główny cel rozprawy, którym było sprawdzenie doświadczalnie „możliwości poprawy właściwości wytrzymałościowych zakładkowych połączeń klejowych stopu Ti6Al4V przez pneumokulowanie” z uwzględnieniem parametrów obróbki, naprężeń własnych oraz kosztów wykonania złącza. Autorka przyjęła też 8 celów cząstkowych dla realizacji m.in. badań wpływu kulowania na stan naprężeń w warstwie wierzchniej zakładki połączenia, wytrzymałości na ścinanie i umocnienie warstwy wierzchniej zakładek. Poza tym opracowanie modeli matematycznych określających wpływ parametrów kulowania na stan naprężeń własnych oraz wytrzymałość klejowych zakładek na ścinanie. Celem cząstkowym była także optymalizacja procesu pneumokulowania ze względu tylko na koszty produkcji złącz oraz optymalizacja dwukryterialna, ze względu na koszty i wytrzymałość złączy. Dla tak szerokiego przyjętego programu badań wyniki tej rozprawy są użyteczne dla przemysłu wytwarzającego lekkie konstrukcje ze stopów tytanu.

Badania realizowano wg planu statystycznego, determinowanego, sekwencyjnego, poliselekcyjnego – Hartleya PS/DS-P:Ha3. Jest to plan dobrze dobrany do oceny wyników przyjętych w rozprawie badań. Plan ten umożliwia bowiem uzyskanie adekwatnych modeli matematycznych przy możliwie małej liczbie doświadczeń. Poza tym plan ten umożliwia wyznaczenie funkcji obiektu badań w postaci wielomianu drugiego stopnia z uwzględnieniem interakcji czynników wejściowych.

Na podkreślenie zasługuje wykonanie optymalizacji procesu kulowania ze względu na koszty oraz dwukryterialnej optymalizacji procesu z uwzględnieniem kosztów i wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych. Do przyjętych w rozprawie planów realizacji doświadczeń i metodyki obliczeń nie mam zastrzeżeń.

Z analizy stanu wiedzy podsumowanego w rozdziale 1 rozprawy wynika, że na temat efektów pneumokulowania klejowych połączeń metali w tym stopów tytanu istnieją jedynie fragmentaryczne prace badawcze. Prace te wykazują jednak, iż istnieje możliwość poprawy właściwości wytrzymałościowych klejowych połączeń zakładkowych. Dlatego uważam, że przeprowadzenie kompleksowych badań efektów pneumokulowania złącz klejowych, szczególnie stopu tytanu, stosowanego w

konstrukcjach lekkich (np. samolotów), wraz z oceną kosztów stosowania przemysłowego tej metody – uważam za celowe. Łatwość stosowania pneumokulowania jako umacniającej, powierzchniowej obróbki plastycznej powinna być szerzej stosowana w przemyśle.

Zakres tematyczny rozprawy wynika z przyjętej tezy i celu badań, zawiera 7 właściwie dobranych laboratoryjnych zadań badawczych oraz analiz matematycznych. Przyjęty zakres badań jest rozbudowany i ma charakter badań kompleksowych wraz z opracowaniem modeli matematycznych i optymalizacji procesu kulowania złączy klejowych.

Przyjęta metodyka badań oraz wymieniona aparatura badawcza zastosowana w badaniach eksperymentalnych jest aktualna i właściwa do stosowania w rozprawie doktorskiej.

Do oryginalnych osiągnięć Autorki w recenzowanej rozprawie zaliczam m.in. następujące:

1. Kompleksowość poprawnie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych i warstwy wierzchniej w zakładkach połączenia klejowego wykonanego ze stopu tytanu Ti6Al4V.
2. Wyjaśnienie mechanizmu oddziaływania umocnienia warstwy wierzchniej zakładek na wytrzymałość na ścinanie klejowych połączeń oraz wskazanie, iż przez pneumokulowanie możliwy jest wzrost ich wytrzymałości o ok. 52%.
3. Określenie doświadczalne wpływu parametrów technologicznych pneumokulowania na stan naprężeń w zakładce połączenia klejowego.
4. Opracowanie modeli matematycznych ujmujących wpływ parametrów pneumokulowania na wytrzymałość na ścinanie zakładek oraz wykonanie optymalizacji procesu ze względu na wytrzymałość zakładek połączeń klejowych.
5. Optymalizacja dwukryterialna procesu pneumokulowania z uwzględnieniem kosztów procesu i wytrzymałości na ścinanie klejowych połączeń zakładkowych.

Na podkreślenie zasługuje także dobrze opracowany, dokładny plan badań własnych dla zrealizowania przyjętych celów, a także szerokie stosowanie metod

statystycznych i modeli matematycznych w opracowaniu wyników badań. Opracowanie edytorskie rozprawy jest bardzo dobre.

Natomiast do uwag krytycznych i dyskusyjnych zaliczam następujące:

1. W rozprawie nie uwzględniono badań wpływu pneumokulowania na wytrzymałość zmęczeniową zakładkowych połączeń klejowych. Odporność zmęczeniowa jest bardzo ważną cechą połączeń klejowych, np. dla konstrukcji samolotowych.
2. We wniosku z badań nr 13, dotyczącego wytrzymałości badanych złączy, Autorka stwierdza „za pomocą metod konstrukcyjnych uzyskuje się poprawę co najwyżej 23%”. Na jakiej podstawie to stwierdzono?
3. Ograniczony w badaniach zakres obciążeń złącza jedynie do działania sił rozciągających. Elementy klejone są w praktyce często obciążone również momentem zginającym.
4. Wątpliwości budzi stwierdzenie, że koszt pneumokulowania jednego złącza klejowego wynosi od 3 groszy do 16 groszy – czy również dla zalecanego czasu obróbki 70 sekund wg wniosku nr 11 lub dla 180 s. wg wniosku 9.
5. W jakim celu wykonano badania struktury geometrycznej powierzchni (SGP) złomu klejowego połączenia zakładkowego? We wnioskach z badań (str. 110-112) brak oceny tych badań.

W rozprawie stosuje Autorka właściwą terminologię i odwołania do pozycji literatury. Jednak nie jest konsekwentna w stosowaniu nazwy badanego procesu obróbki – tzn. używa w większości tekstu rozprawy określenia „pneumokulowanie” (tytuł) lub „kulowanie” (str. 72) ale także „kulkowanie” (s. 50, 92 dół, rys. 4.3.2), „pneumokulkowanie” (s. 60) i „okulkowanie” (s. 91). Czy stosowane w badaniach elementy kuliste o tak małej średnicy, wynoszącej 1,5 mm, są fizycznie kulami czy kulkami (s.4, 46 dół i s. 47, 73, 74, i inne, rys. 94, 95) – przecież pochodzą z produkcji łożysk kulkowych a nie kulowych. Proponuję używać nazwy pneumokulkowanie lub kulkowanie strumieniowe (jak na str. 43, 90 i 45).

Spis literatury (181 pozycji) przeanalizowanej i przywołanej w całości w tekście rozprawy jest dobrze dobrany. Około 50 % publikacji jest obcojęzycznych. Jednak zdziwiło mnie brak publikacji z wydawnictw pokonferencyjnych światowej cyklicznej

konferencji „Shot Peening”. Konferencja taka odbywa się w różnych krajach od wielu już lat. W 2002 r. odbyła się w Polsce, organizowana przez Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie.

Szkoda, że w programie badań nie uwzględniono pomiarów mikrotwardości i jej rozkładu w warstwie wierzchniej zakładki. Można by wówczas określić głębokość utwardzenia w zakładce w wyniku odkształceń plastycznych powstających wskutek pneumokulkowania i wyjaśnić przyczynę wytworzenia ścisających naprężeń w zakładkach.

Czy długość zakładki połączenia klejowego ma wpływ na wytrzymałość złącza? Dlaczego badano złącza tylko ze stałą zakładką wynoszącą 12,5 mm.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr Katarzyna Korzyńska wykonała oryginalne badania dot. zwiększenia wytrzymałości i analizy kosztów wykonywania klejowych złącz zakładkowych ze stopu tytanu Ti6-Al4-V. Ustaliła, że w wyniku pneumokulkowania takich złączy można zwiększyć ich wytrzymałość na ścinanie do 52%.

Doktorantka wykazała się umiejętnością stosowania planowania badań eksperymentalnych i modelowania matematycznego oraz optymalizacji jedno i dwukryterialnej. Opracowała szczegółowe oceny kosztowe realizacji technologii umacniania pneumokulkowaniem złącz klejowych z tytanu – co ma duże znaczenie w organizacji produkcji przemysłowej takich złącz. Doktorantka dobrze opanowała metodykę badań naukowych, wykazała się umiejętnością opracowania i analizy ich wyników. Posiada więc umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

**Po szczegółowej analizie całości rozprawy stwierdzam, że teza rozprawy przyjęta w rozdziale 2 (str. 59) została udowodniona. Wnioski merytoryczne, zamieszczone w rozdziale 5, są potwierdzone wynikami przeprowadzonych badań laboratoryjnych.**

## **6. Wniosek**

W wyniku dokonanej analizy i pozytywnej oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska, którą wykonała mgr Katarzyna Korzyńska pt. „Badania wpływu procesu pneumokulkowania na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych” - spełnia

wymagania aktualnej Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. z 2014r. i Dz. U. z 2015r., oraz Rozporządzenia Ministra NiSzW z dnia 3.X.2014r.

Tematyka recenzowanej rozprawy jest zgodna z dyscypliną naukową „Inżynieria Produkcji”. Może być dopuszczona do obrony na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

A handwritten signature in blue ink, written in a cursive style, slanted downwards from left to right. The signature is illegible due to its cursive nature.