

Poznań, 29.12.2014r.

Dr hab. inż. Marian Jóska, prof. nadzw. PP  
Instytut Maszyn Roboczych  
i Pojazdów Samochodowych  
Politechniki Poznańskiej

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba SZABELSKIEGO pt.:

**„BADANIA WPLYWU OBRÓBKIE CIEPLNEJ DOCZOŁOWYCH POŁĄCZEŃ  
KLEJOWYCH NA ICH WYTRZYMAŁOŚĆ STATYCZNA”**

### 1. Podstawa formalna wykonania recenzji

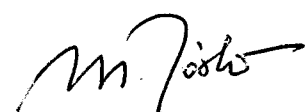
Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie Uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej z dnia 29.10.2014r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w przewodzie doktorskim mgra inż. Jakuba Szabelskiego (Pismo Pana Prodziekana ds. Nauki nr WM/277/2014 z dn. 06.11.2014r.). Do pisma jest dołączony egzemplarz pracy doktorskiej.

### 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa w postaci wydrukowanej książki została przygotowana pod kierunkiem promotora, prof. dr hab. inż. Józefa Kuczmaszewskiego i promotora pomocniczego dr inż. Jacka Domińczuka. Obejmuje łącznie 132 strony tekstu formatu B5 i składa się w kolejności: ze streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu skrótów i symboli, dziesięciu numerowanych rozdziałów merytorycznych, wykazu ilustracji i tabel oraz bibliografii. Rozprawa ma właściwą dla prac doktorskich strukturę redakcyjną, tytuł trafnie oddaje jej treść, cztery spójne rozdziały przeglądowe, zawierające analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie tytułowej tematyki, poprzedzają sformułowanie własnej problematyki badawczej, pozostała część jest związana z własnymi badaniami Autora. Rozprawa została starannie przygotowana pod względem edytorskim. Bibliografia obejmuje 111 pozycji i zawiera szeroki przekrój rodzajowy piśmiennictwa w języku polskim i angielskim – około 65% źródeł literaturowych.

### 3. Analiza rozprawy

Zakres zastosowania połączeń klejowych w budowie maszyn i środków transportu systematycznie wzrasta. Na przykład, w pojazdach samochodowych, reprezentujących transport drogowy i w środkach innych gałęzi transportu, kleje pełnią nie tylko funkcję łączącą elemen-



ty, ale także uszczelniającą i tłumiącą drgania. Tak więc, połączenia klejowe są pożądane nie tylko konstrukcyjnie, ale także z punktu widzenia eksploatacji, zwłaszcza w tych węzłach, gdzie panujące warunki eksploatacyjne predestynują ich zastosowanie. W wielu przypadkach ten rodzaj połączenia jest bezkonkurencyjny w stosunku do innych rodzajów połączeń nierozłącznych. To powoduje, że podjęty temat jest ze wszelkich miar aktualny i istotny.

Różnorodność klejów, rodzajów połączeń klejowych oraz wieloaspektowość problematyki klejenia pokazuje, że jest ona bogata poznawczo, ale i złożona, a wiele obszarów, związanych z konstytuowaniem połączeń klejowych nie jest jeszcze do końca poznanych lub było dotychczas traktowanych marginalnie. Wpływ niektórych czynników technologicznych i eksploatacyjnych na wytrzymałość tych połączeń nie jest jeszcze wyjaśniony. W szczególności, odstępstwo od stechiometrycznej proporcji podstawowych komponentów klejów, które zdarza się w praktyce produkcyjnej i eksploatacyjnej, np. podczas napraw, może istotnie wpływać na ich właściwości i na wytrzymałość połączenia klejowego.

Dlatego, badania związane z wyjaśnieniem wpływu wspomnianych odstępstw na wytrzymałość połączenia, z zastosowaniem obróbki cieplnej, jako środka zaradczego na te odstępstwa, a także jej wpływ na podstawowe cechy mechaniczne oraz wytrzymałość połączenia w określonej temperatury zewnętrznej, w jakiej znajduje się klej i połączenie uważam za przedsięwzięcie celowe, ważne poznawczo i aplikacyjnie. Autor podjął ten problem w zakresie obróbek wygrzewania doczołowych połączeń klejowych i ich wytrzymałości statycznej.

W rozdziale 1. (Wstęp) przedstawiono problematykę pracy. Zasygnalizowano podstawowe problemy kształtowania połączeń klejowych, opisane w rozprawie. Wskazano na interdyscyplinarny charakter klejenia, wspierając się stosownym diagramem. Zwrócono uwagę na wpływ czynników technologicznych i eksploatacyjnych na wytrzymałość połączenia.

W rozdziale drugim, poświęconym podstawowej wiedzy o procesie klejenia, zawarto wyczerpujące wiadomości o kryteriach podziału klejów, o ich właściwościach adhezyjnych i kohezyjnych, modelach i rodzajach adhezji oraz o typowych rodzajach połączeń klejowych. Opisy modeli połączeń adhezyjnych są precyzyjne i umiejętnie zilustrowane.

W rozdziale trzecim podjęto problematykę technologicznego przygotowania powierzchni do operacji klejenia oraz zawarto ocenę metod preparowania tych powierzchni. Zaprezentowano strukturę operacyjną procesu klejenia i scharakteryzowano właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej klejonych elementów. Wyczerpująco i relatywnie dogłębnie rozważono zarówno tradycyjne, jak i nowoczesne metody przygotowania powierzchni elementów przeznaczonych do klejenia. Przedstawiono wytrzymałościowe skutki zwilżalności łączonych powierzchni oraz wartości swobodnej energii powierzchniowej i metody pomiaru tej energii.

M. Jóska 2

Sposobom utwardzania klejów konstrukcyjnych poświęcono rozdział 4. pracy, wydzielając grupy i kategorie klejów o podobnym mechanizmie utwardzania, szczegółowo analizując utwardzanie klejów dwuskładnikowych, w tym utwardzanie termiczne oraz inne nowoczesne i kombinowane sposoby utwardzania. Rozdział jest napisany bardzo komunikatywnie, analiza mechanizmów utwardzania jest dogłębna i twórcza, budząca uznanie dla Autora. W tym rozdziale – przy okazji analizy mechanizmu utwardzania – anonsuje On także genezę swojej dysertacji, związaną z proporcjami komponentów w klejach dwuskładnikowych.

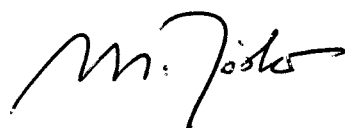
Rozdział 5. obejmuje omówienie wpływu ciepła na wytrzymałość połączenia klejowego. Poddano wnikliwej analizie wyniki badań źródłowych w zakresie zagadnień odporności cieplnej połączenia klejowego i jego starzenia cieplnego. Określono warunki badań własnych w zakresie skutków oddziaływania ciepła na otoczenie, zarówno w fazie jego konstytuowania, jak i degradacji eksploatacyjnej z udziałem ciepła. Zakres przeprowadzonej analizy ma bezpośredni związek z tematem rozprawy, a przytoczone wyniki badań zostały trafnie dobrane.

Na podstawie wyczerpującego przeglądu literatury zagadnienia, Autor dokonał syntetycznej oceny stanu wiedzy i technologii w zakresie tematycznym rozprawy doktorskiej (rozdział 6.). Umiejętne i logiczne podsumowanie oceny umożliwiło Mu sformułowanie hipotez badawczych i określenie celów pracy, sprowadzających się do wyznaczenia zależności między wytrzymałością statyczną doczołowego połączenia klejowego a warunkami utwardzania cieplnego tego połączenia oraz do oceny wpływu na wytrzymałość wielkości odstępstw od wartości stosunku stechiometrycznego żywicy epoksydowej i utwardzacza dla wybranych klejów (rozdział 7.). Następnie, przyjęto wyspecyfikowany w postaci punktów zakres pracy, który jest w istocie zbiorem zadań, umożliwiających osiągnięcie celów i zweryfikowanie hipotez. Z metodologicznego punktu widzenia, takie postępowanie jest poprawne, określa bowiem sensownie zakresy etapowych kroków w ramach realizacji pracy doktorskiej, opisane w kolejnych rozdziałach i podrozdziałach pracy.

W rozdziale ósmym przedstawiono własne badania eksperymentalne, obejmujące cztery zagadnienia merytoryczne, a mianowicie:

- badania wytrzymałości na odrywanie doczołowe połączeń klejowych;
- wyznaczenie modułów sprężystości wzdłużnej badanych klejów;
- określenie udarnośći klejów, będących przedmiotem badań;
- ocenę twardości próbek rozpatrywanych klejów.

W przypadku każdego z badanych zagadnień, wystarczająco szczegółowo przedstawiono właściwą dla każdego zagadnienia metodologię badania, z tabelarycznymi programami badań, z uwzględnieniem wybranych kombinacji i zapewnieniem wymaganej ilości powtórzeń. Ilo-



ściowe wyniki badań bardzo starannie opracowano statystycznie. Użyty komputerowy program statystyczny pozwolił na wielostronne przeprowadzenie analizy statystycznej uzyskanych wyników, w tym charakterystykę ich rozkładu, testy istotności różnic średnich badanych wielkości, równych wariancji, itp. Wyniki badań, we wszystkich rozpatrywanych zakresach, zaprezentowano tabelarycznie i graficznie oraz opracowano statystycznie i uwidoczniło to na wykresach cząstkowych i syntetycznych.


Dodatkowo, przedstawiono typy zniszczeń badanych połączeń klejowych w postaci tabelarycznej, z zebranymi widokami przełomów, co uważam za cenną inicjatywę, pozwalającą zaprezentować typy zniszczenia adhezyjno-kohezyjnego i zestawić je z poszczególnymi proporcjami składników badanych klejów oraz z warunkami ich utwardzania i badania.

W dziwiątym rozdziale pracy doktorskiej przeprowadzono analizę merytoryczną uzyskanych i opracowanych statystycznie wyników, w której odniesiono się do następujących kwestii badawczych, zasługujących na odnotowanie:

- względna zmiana średniej wytrzymałości statycznej połączenia klejowego w przypadku niedogrzenia i dotwardzania cieplnego,
- względny wpływ odstępstwa od zalecanej proporcji składu kleju (utwardzacz i tzw. baza) na wytrzymałość połączenia,
- względny wpływ odstępstwa od zalecanej proporcji oraz sposobu utwardzania i temperatury badań na wytrzymałość połączenia,
- zależność wytrzymałości od typu zniszczenia w różnych temperaturach niszczenia,
- zależność wytrzymałości rozpatrywanych połączeń od wybranych charakterystyk klejów, tzn. od sprężystości podłużnej, udarności i twardości, przy rozpatrywanych kombinacjach temperatury obróbek cieplnych połączeń i temperatur ich badania.

Zestaw problemów poddanych analizie merytorycznej jest imponujący, a sama analiza jest dogłębna, o niewątpliwym charakterze poznawczym, uwiarygodniona solidnym opracowaniem statystycznym wyników. Formułowane stwierdzenia są przekonujące, a ustalone związki – logiczne, z zaznaczeniem przewidywanych skutków.

Numerowane rozdziały pracy kończy sformułowanie dziewięciu wniosków ogólnych (rozdział 10.), z którymi należy się zgodzić i które odnoszą się do założonych celów rozprawy i sformułowanych hipotez, co Autor formalnie zaznacza, stwierdzając zweryfikowanie hipotez i osiągnięcie postawionych celów naukowo-badawczych. Rozdział zawiera także uwagi końcowe, odnoszące się w szczególności do prognozowania parametrów termicznych procesu klejenia, umożliwiających poprawę wytrzymałości statycznej połączeń z udziałem klejów dwuskładnikowych i do rozszerzenia wyników badań także na inne kleje epoksydowe.

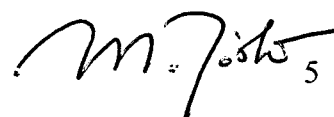
 4

Przechodząc do podsumowującej części analizy rozprawy należy stwierdzić, że do najważniejszych osiągnięć Autora w opiniowanej rozprawie można zaliczyć:

- Wykazanie, że operacja dotwardzania cieplnego na etapie konstytuowania doczołowego połączenia klejowego prowadzi do zwiększenia jego wytrzymałości statycznej w temperaturze otoczenia również w przypadku połączeń wykonanych klejami z odstępstwem od wyjściowej proporcji żywicy do utwardzacza, uznanej za optymalną.
- Ustalenie, że operacji dogrzewania cieplnego nie można jednak traktować, jako uniwersalnie poprawiającej wytrzymałość połączenia klejowego we wszystkich przypadkach eksploatacyjnych takiego połączenia, zwłaszcza w warunkach podwyższonej temperatury i w sytuacji nadmiaru utwardzacza w składzie kleju.
- Udowodnienie, że nadmiar utwardzacza w składzie dwuskładnikowego kleju epoksydowego jest mniej bezpieczny niż jego niedobór w odniesieniu do parametrów wytrzymałości połączenia klejowego, eksploatowanego w różnej temperaturze oraz, że najczęściej prowadzi on również do zmian innych właściwości kleju, takich jak sztywność, twardość i udarność.
- Udokumentowanie zniszczeń wybranych połączeń klejowych i zestawienie ich typów z proporcjami komponentów oraz warunkami utwardzania i temperaturami badania, co pozwoliło na określenie charakteru zniszczeń tych połączeń.

Oprócz wymienionych osiągnięć własnych widocznych w rozprawie, dobrze świadczących o jej poziomie i erudycji jej Autora, można znaleźć elementy dyskusyjne, wymagające wyjaśnień, a mianowicie:

1. Proszę szczegółowiej przedstawić sposób realizacji dotwardzania cieplnego wybranych próbek oraz czas i tempo ich chłodzenia. Jaki mogą mieć wpływ parametry chłodzenia na wytrzymałość połączenia klejowego?
2. Do mocowania próbek w uchwytach zrywarki użyto uchwytów dwuprzegubowych w celu niwelowania błędów osiowości połączenia górnej i dolnej połowy próbki, zapewniających osiowe rozciąganie próbek. Czy było to konieczne w przypadku klasy używanej maszyny wytrzymałościowej i w jakim zakresie wpłynęło na dokładność pomiarów?
3. Analiza statystyczna wyników, uzyskanych z badań eksperymentalnych wytrzymałości połączeń klejowych, była prowadzona z wykorzystaniem pakietu Statistica. Przy sprawdzaniu równości średnich, analizując wyniki testu Levene'a, Browna i Forsytha, wyka-




ziano równość wariancji, gdy jednocześnie test F wykazał jej nierówność. Jednak, dalsza analiza równości średnich (testem t-Studenta i testem Cochrańa-Coxa) wykazała w obydwu metodach brak istotnej różnicy między rozpatrywanymi średnimi. Jaki wynik byłby właściwy, gdyby w tym przypadku analiza równości średnich metodami dla serii o równej i różnej wariancji dały przeciwne rezultaty?

4. Czy sposób przygotowania powierzchni do klejenia może mieć wpływ na wytrzymałość połączeń wykonanych klejami z odstępstwem od zalecanej proporcji żywicy do utwardzacza i jeśli tak, to na ile może być on istotny?

Autor nie ustrzegł się także pewnych niedociągnięć pozamerytorycznych, choć nie jest ich w pracy wiele i mają one raczej charakter językowy lub edytorski. Uwagi szczegółowe, pozamerytoryczne nie wymagają wyjaśnień i sprowadzają się do następujących stwierdzeń (s. – oznacza stronę, wg – wiersz górny, wd – wiersz dolny):

- W pracy, w wielu miejscach, są pominięte znaki interpunkcyjne, zwłaszcza przecinki (np. s. 15, 7wd, s. 16, 8wd, s. 17, 9-10wg i w kilku innych fragmentach pracy) oraz w niektórych wyrazach są popełnione trywialne błędy literowe, polegające na przykład na dublowaniu liter, np. s. 19, 5wg, bądź na pominięciu spacji (s. 84, 14wg, s. 104, 11wg).
- Nadmierne stosowanie potocznych skrótów, np. „ww” (s. 27, 1wd, s. 38, 12wd, s. 67, 12wg, itd.); „wg”, s. 84, 8wg; „ok.” (s. 47, 18wd, s. 61, 13wd, s. 62 – 3x) lub ich nasilenie – sąsiedowanie („tj. np.”, s. 43, 13wg) oraz stosowanie własnych skrótów, np. „temp.” (s. 40, podpis rys. 17, w nagłówkach tabel); „param.”, s. 108-109, 113, 114-115, w opisach rysunków 68, 69, 72, 73, 74. Lepiej byłoby w niektórych przypadkach rozwinąć skrót lub objaśnić go pod tabelą, w podpisie rysunku i tabeli lub w tekście.
- Lokalny nadmiar wyrazów lub ich niedobór, np. s. 46, 7wd – wystarczy jedno z dwóch stwierdzeń, tzn. „może być określona” lub „jest określona”; s. 42, 20wd – można było napisać „obecności jonów wodorotlenkowych” lub inne adekwatne wyrażenie, odnoszące się do jonów; s. 58, 14wg – można było dodać „parametru procesu klejenia”.
- Nadużywanie w pracy rzeczownika „moment” w sensie czasu, tym bardziej, że wyrażenie to ma również znaczenie wielkości fizycznej (mechanicznej), np. s. 48, 1wg (por. także s. 53, 4wd, s. 61, 3wd, s. 62 – 2x i w kilku innych miejscach). W wielu frazach pracy można byłoby to określenie zastąpić wyrazem „chwila”.
- Niepełny podpis pod rysunkiem 31 na stronie 60 i rysunkiem 48 na stronie 88. Na stronie 88 ukazano także nieprawidłowy numer rysunku – zamiast rys. 56 – 1wd, powinien być



prawdopodobnie rys. 50. Zamiast „...oddziaływaniu energii cieplnej ...”, można było po prostu napisać „oddziaływaniu ciepła” (s. 50, 10wd, s. 51, 11wd), zamiast stwierdzenia „...od pewnego momentu ...”, logiczniej byłoby – „od pewnej proporcji” (s. 119, 7wg).

#### 4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Szabelskiego zawiera wszystkie elementy niezbędne do jej pozytywnej oceny. Do nich zaliczam szczegółową analizę materiałów źródłowych, związanych z przedmiotem badań, jasne sformułowanie własnej problematyki badawczej i wynikających z niej hipotez badawczych i celów pracy oraz konsekwentne wykonywanie zadań badawczych, zgodnie z zasadami metodologii realizacji pracy naukowo-badawczej.

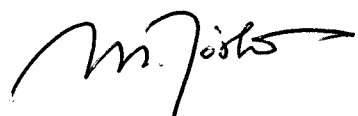
Praca posiada prawidłową strukturę, jest logiczna metodologicznie i spójna merytorycznie. Jest napisana poprawnym i komunikatywnym polskim językiem technicznym z użyciem należytej i precyzyjnej terminologii. Tytuł rozprawy został sformułowany w sposób przemyślany i dokładnie odzwierciedla jej treść. Redakcja pracy jest bardzo dobra, jakość i autonomiczność części ilustracyjnej – zasługuje na pochwałę.

Ocena tematu i zakresu pracy jest pozytywna. Podjęty w pracy problem jest ważny i aktualny z poznawczego i praktycznego punktu widzenia. W celu rozwiązania tego problemu Autor zaplanował badania własne, w wystarczającym zakresie dla wybranych klejów epoksydowych i wykonał te badania, wzbogacając je o wyznaczenie charakterystyk tych klejów. Wyniki badań są cenne zarówno dla poznania mechanizmu konstytuowania połączenia klejowego, jak i dla praktyki w warunkach odstępstwa od sugerowanej teoretycznie proporcji składników oraz obróbki cieplnej.

Ocena warsztatu badawczego Doktoranta jest bardzo pozytywna i zasługuje na uznanie za dojrzałość, zarówno w sensie metodologicznym (planowanie eksperymentów), jak i używanych środków badawczych (aparatura, stanowiska badawcze i urządzenia technologiczne) oraz narzędzi statystycznych (pakiety statystyczne), co umożliwia Mu swobodne działanie w zakresie wnioskowania statystycznego i merytorycznego.

Rozprawa doktorska jest pracą oryginalną i wnosi naukową i technologiczną wartość dodaną do zagadnień związanych z dziedziną nauk technicznych i dyscypliną naukową **inżynieria produkcji**, zwłaszcza w zakresie technologii klejenia i technologicznego kształtowania połączeń klejowych, z uwzględnieniem obróbek cieplnych.

Rzetelna analiza aktualnego stanu podjętego w pracy problemu, poprawne sformułowanie własnej problematyki badawczej, przeprowadzenie badań w uzasadnionym zakresie,



a także uzyskanie wyników, mających znamiona uniwersalności i – w rezultacie – skuteczne osiągnięcie celów oraz zweryfikowanie postawionych hipotez, świadczą o dużej wiedzy Autora, umiejętnościach podejmowania zagadnienia naukowego, formułowania i weryfikowania tez badawczych, pozwalających rozwiązać podjęty problem. Przejawia się w tym dojrzałość naukowa Doktoranta i Jego przygotowanie do samodzielnej pracy badawczej.

## 5. Wniosek końcowy

Pozytywna ocena, jaka wypływa z analizy rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Szabelskiego, zatytułowanej „Badania wpływu obróbki cieplnej doczołowych połączeń klejowych na ich wytrzymałość statyczną” upoważnia mnie do stwierdzenia, że **spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim** przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzenie MNiSzW z dnia 22 września 2011 roku, w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. z 2011 r., nr 204, poz. 1200), **a jej Autor może być dopuszczony do publicznej obrony.**

