



## WYDZIAŁ MECHANICZNY POLITECHNIKA LUBELSKA

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
tel. 81 53-84-232, e-mail: a.rudawska@pollub.pl



dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PL  
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji

Lublin, dnia 09.05.2017 r.

### Recenzja

**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Zieleckiego  
p.t.: „Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz nośności  
zakładkowych połączeń klejowych ze zmodyfikowaną strefą  
przykrawędziową”**

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Pana Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 9 marca 2017 roku, nr RM-530-03-03-2016 i zawarta na tej podstawie umowa o dzieło.

#### 1. Cel główny oraz cele szczegółowe rozprawy

Głównym celem recenzowanej rozprawy była numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz nośności zakładkowych połączeń klejowych ze zmodyfikowaną warstwą przykrawędziową. Sformułowano także siedem celów szczegółowych, wśród których wymieniono:

- 1) analizę znanych dotychczas rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych w celu zwiększenia nośności połączeń klejowych,
- 2) wstępną analizę naprężeń zakładkowych połączeń klejowych wybranych materiałów jednoimiennych (stal-stal, tytan-tytan) z uwzględnieniem liniowo-sprężystego modelu materiału łączonych elementów,
- 3) wstępną analizę naprężeń zakładkowych połączeń klejowych wybranych materiałów różnoimiennych (titan-stal) z uwzględnieniem liniowo-sprężystego modelu materiału łączonych elementów,

- 4) analizę wpływu wartości modułu Younga materiałów łączonych elementów na poziom naprężeń występujących w warstwie środkowej spoiny klejowej,
- 5) określenie wpływu zaproponowanych modyfikacji geometrii strefy przykrawędziowej na poziom naprężeń w spoinie klejowej w przypadku połączeń jedno- i różnoimiennych,
- 6) eksperymentalne określenie nośności zakładkowych połączeń klejowych,
- 7) określenie wpływu odkształceń plastycznych materiałów łączonych na stan naprężeń w zakładkowym połączeniu klejowym.

W opisie celów szczegółowych (2 i 3) wydaje się, że pojawiło się pewne niezręczne sformułowanie związane z określeniem rodzaju materiału, gdyż badaniom eksperymentalnym i analizie numerycznej poddany jest stop tytanu Ti6Al4V, a nie tytan.

Realizacja przyjętych celów rozprawy wymagała zarówno głębokiej analizy teoretycznej omawianych problemów, jak też przeprowadzenia przez Doktoranta badań eksperymentalnych oraz obszernej analizy numerycznej, których opis i wyniki są przedstawione w niniejszej rozprawie.

## **2. Zakres rozprawy**

Rozprawa jest klasyczną naukową pracą łączącą badania eksperymentalne oraz analizę numeryczną, a jej tytuł jest adekwatny do zawartych w niej treści. Układ rozprawy jest przejrzysty i właściwy. Składa się ona z ośmiu rozdziałów obejmujących: przegląd literatury na temat ogólnej charakterystyki i zastosowania procesu klejenia, procesu powstawania połączenia klejowego, technologii klejenia, wybranych zagadnień wytrzymałości połączeń klejowych, a także analizy połączeń klejowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, na podstawie której sformułowano cele oraz zakres rozprawy, analizę numeryczną zawierającą wstępną analizę naprężeń w zakładkowych połączeniach klejowych jednoimiennych i różnoimiennych oraz analizę numeryczną nieliniową połączeń klejowych z uwzględnieniem plastycznej deformacji łączonych materiałów, a także badania doświadczalne, obejmujące badania wytrzymałościowe w celu wyznaczenia wybranych właściwości mechanicznych materiałów stanowiących połączenia klejowe oraz badania związane z oceną przygotowania powierzchni łączonych materiałów do klejenia. Ostatni rozdział zawiera wnioski i opis kierunków dalszych badań.

Rozdział pierwszy obejmuje analizę aktualnego stanu literatury związanej z problematyką rozprawy. Pierwszy rozdział zawiera pięć podrozdziałów w brzmieniu: ogólna charakterystyka i zastosowanie klejenia, proces powstawania połączenia klejowego, technologia klejenia, wytrzymałość połączeń klejowych oraz analiza połączeń klejowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Ocena stanu wiedzy opisana w tym rozdziale rozprawy przekonuje, że podjęcie i wykonanie rozprawy jest celowe, jak również uzasadnione, choć pewien niedosyt budzi brak podsumowania tego rozdziału, które pozwoliłoby na wskazanie obszarów znanych oraz tych, które nie są dostatecznie i szczegółowo poznane. Jednakże analiza stanu wiedzy pozwoliła na określenie głównego celu naukowego oraz celów szczegółowych, które zamieszczono w rozdziale drugim, przedstawiając także zakres rozprawy.

Trzeci rozdział rozprawy obejmuje opis budowy modelu numerycznego zakładkowych połączeń klejowych, zarówno jednoimiennych, jak i różnoimiennych, przy czym uwzględniono różne warianty geometrii strefy przykrawędziowej. Jednak pewnym niedostatkiem jest brak pełnego przedstawienia istotnych informacji związanych np. z ilością wykonywanych połączeń, zwłaszcza ze względu na późniejsze badania eksperymentalne.

W czwartym rozdziale przeprowadzono wstępną analizę numeryczną naprężeń w analizowanych zakładkowych połączeniach klejowych wzdłuż środkowej warstwy spoiny klejowej.

Rozdział piąty poświęcony jest metodyce badań eksperymentalnych, w którym opisano technologię wykonania analizowanych połączeń zakładkowych, przeprowadzono badania wytrzymałościowe połączeń klejowych oraz przedstawiono metodykę wyznaczania wybranych właściwości mechanicznych zarówno kleju, jak i łączonych materiałów. W rozdziale tym zamieszczono również zagadnienia związane z oceną przygotowania powierzchni łączonych materiałów, obejmujące zarówno określenie wybranych parametrów chropowatości powierzchni, jak i określenie właściwości adhezyjnych poprzez wartość swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych. Niestety słabym punktem tego rozdziału jest niewystarczająco szczegółowy opis metodyki badań. W rozdziale tym pojawiają się pewne nieścisłości oraz brak jest niektórych istotnych informacji, zwłaszcza dotyczących metody oceny przygotowania powierzchni łączonych materiałów do procesu klejenia.

Rozdział szósty zawiera rezultaty przeprowadzonych badań doświadczalnych, na podstawie których określono nośność analizowanych połączeń klejowych. Wiadomości

podano zgodnie z wymaganiami stawianymi rozprawom naukowym, choć niedosyt budzi jednak niezbyt szczegółowy opis badań, a także brak wielu podstawowych informacji związanych z, przedstawioną uprzednio w rozdziale 5, metodyką przeprowadzania badań doświadczalnych. Ponadto wydaje się niewystarczające zastosowanie tak małej liczby próbek w celu uzyskania stałych materiałowych, także obliczanie średniej z dwóch pomiarów, przy braku uwzględnienia niepewności wyznaczania średniej. W takim przypadku do wyznaczania przedziału ufności należy stosować test T-studenta. Współczynnik rozszerzenia dla przedziału ufności 0,95 i liczby stopni swobody  $r = n-1$ , czyli w tym przypadku 1 wynosi 12,706. W przypadku przeprowadzenia badań eksperymentalnych zawierających tylko jedną próbkę należałoby uwzględnić wszystkie źródła błędów, szacując niepewność metodą B. Szkoda, że w pracy nie zamieszczono takich informacji. Ważnym elementem tego rozdziału jest statystyczna analiza wyników statycznej próby rozciągania połączeń klejowych, choć niedosyt budzi zbyt lakoniczny opis wyników tej analizy. Stosowanie statystycznej analizy ułatwia dyskusję otrzymanych rezultatów badań i uwiarygodnia podjęcie oraz ocenę dalszych badań, zwłaszcza związanych z analizą numeryczną. Niestety słabym punktem tego rozdziału jest niewystarczająco szczegółowy opis i opracowanie wyników badań związanych z oceną stanu powierzchni łączonych materiałów. Dotyczy to zarówno opisu wyników chropowatości powierzchni, jak i oceny właściwości adhezyjnych powierzchni analizowanych materiałów. Brak szczegółowych informacji związanych z metodyką przeprowadzania pomiarów kąta zwilżania (które powinny być przedstawione w rozdziale 5) oraz porównanie wyników wartości swobodnej energii powierzchniowej i jej składowych dla powierzchni blach stalowych i blach ze stopu tytanu, z zastosowaniem różnych metod obliczeniowych wpływa na dość lakoniczną interpretację wyników obliczeń. Ponadto wydaje się niewłaściwe sformułowanie brzemienia podrozdziału 6.6, tj. „Pomiary stanu powierzchni klejonych materiałów”, jest to ocena przygotowania (lub stopnia przygotowania) powierzchni do klejenia łączonych materiałów.

Rozdział siódmy poświęcony jest nieliniowej analizie numerycznej wybranych wariantów połączeń klejowych z uwzględnieniem plastycznej deformacji łączonych materiałów, przy czym podczas tej analizy uwzględniono rezultaty zarówno badań doświadczalnych (rozdział 6), jak i wyniki wstępnej analizy numerycznej (rozdział 4) rozważanych połączeń klejowych. Podczas tej analizy uwzględniono sprężysto-plastyczny model materiału blachy stalowej. Podejście to od kilkunastu lat jest stosowane w analizie wytrzymałościowej

połączeń klejowych, zwłaszcza w literaturze zagranicznej, aczkolwiek różne aspekty w prowadzonych analizach są podkreślane i analizowane. Mocną stroną rozdziału siódmego jest obszerna analiza stanu naprężeń w zakładkowych połączeniach klejowych zarówno jednoimiennych, jak i różnoimiennych, uwzględniająca zarówno niektóre aspekty konstrukcyjne (pośrednio także materiałowe i technologiczne), jak i plastyczne odkształcenie materiałów łączonych. Na uwagę zasługuje także szczegółowa analiza i dyskusja bardzo obszernych i interesujących wyników badań.

Ostatni rozdział ósmy stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej, w którym sformułowano, na podstawie otrzymanych rezultatów, wnioski zarówno o charakterze kwantytatywnym, jak i kwalitatywnym oraz określono kierunki dalszych badań.

Rozprawa składa się z 131 stron i zawiera 92 rysunki oraz 30 tabel. W rozprawie znajduje się również streszczenie w języku polskim i angielskim (str. 131), wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów oraz innych istotnych oznaczeń stosowanych w rozprawie. Cytowana literatura liczy 101 pozycji (która nie została przygotowana ani w porządku alfabetycznym, ani zgodnie z kolejnością cytowania) i obejmuje publikacje polskie oraz pozycje zagraniczne (zarówno w języku angielskim, jak i niemieckim). W zestawieniu literatury ujęto m.in. 3 normy techniczne i 6 pozycje o charakterze instrukcji technicznych lub materiałów informacyjnych. Nie występują natomiast opisy patentowe. W wykazie literatury znajdują się trzy publikacje Doktoranta, w których jest on współautorem (poz. 19, 62 oraz 66).

### **3. Ocena ogólna rozprawy**

Cel główny oraz cele szczegółowe zostały sformułowane jasno i przejrzysto. Dotyczą one zagadnień stosunkowo trudnych, zwłaszcza w rozpatrywanym kontekście, które nie były tak szczegółowo analizowane. Przeprowadzona obszerna i interesująca analiza numeryczna pozwoliła lepiej poznać zagadnienia związane z wpływem wybranych czynników konstrukcyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych. Ma to duże znaczenie ze względu zarówno w aspekcie technologii wykonania połączeń klejowych, jak i eksploatacji tych połączeń z uwzględnieniem wytrzymałości.

Analiza stanu wiedzy przeprowadzona została dość wyczerpująco. Obejmowała ona zakres tematyczny rozprawy, aczkolwiek zabrakło podsumowania tej analizy, na podstawie której sformułowano wnioski, ułatwiłyby Doktorantowi określenie celów rozprawy oraz

trafnego wyboru metod badawczych, ustalenie odpowiedniego zakresu badań eksperymentalnych oraz wszelkich zagadnień związanych z analizą numeryczną.

Część numeryczna rozprawy została wykonana w sposób nie budzący większych zastrzeżeń. Podział na analizę wstępną, na podstawie której wyłoniono i poddano analizie kolejne zagadnienia badawcze w drugiej części analizy numerycznej, jest jak najbardziej właściwy i umożliwił realizację założonych poszczególnych celów rozprawy oraz formułowanie wniosków cząstkowych. Ponadto zastosowanie danych materiałowych, określonych w badaniach eksperymentalnych jest poprawne i pozwala na otrzymanie wyników analizy numerycznej uwzględniających rzeczywiste właściwości analizowanych połączeń klejowych, w tym rozkład naprężeń, w ukształtowanych w określony sposób, połączeniach klejowych pod wpływem działania obciążeń zewnętrznych. Na podkreślenie zasługuje obszerny zakres analizy numerycznej związanej z analizą dużej ilości wariantów rozpatrywanych połączeń klejowych zarówno jednoimiennych, jak i różnoimiennych.

Niedosyt budzi jednak część doświadczalna związana przede wszystkim z technologią wykonania kształtu łączonych elementów oraz samą technologią wykonania połączeń klejowych, a także opis metodyki wykonywania niektórych pomiarów, zwłaszcza związanych z oceną stanu powierzchni klejonych elementów. Wprawdzie właściwie zostały dobrane poszczególne metody badawcze i związane z nim przyrządy pomiarowe, jednakże pojawiają się nieścisłości i błędy obliczeniowe, a rezultaty badań opisane są w sposób lakoniczny. Ze względu na fakt, że ocena stopnia przygotowania powierzchni nie jest uwzględniona w analizie numerycznej, nie wpływa to na rzetelność przeprowadzonej analizy numerycznej. Część ta mogła zostać pominięta w pracy bez obniżenia wartości merytorycznej, choć jeżeli została ona zaprezentowana, to powinna zostać przedstawiona w poprawny sposób, nie budzący większych zastrzeżeń.

Praca została wykonana na dobrym poziomie merytorycznym, ze względu zarówno na sposób jej wykonania, jak i zakres przeprowadzonych analiz numerycznych, choć pojawiają się zastrzeżenia dotyczące części doświadczalnej.

W rozprawie Doktorant nie ustrzegł się jednak pewnych nieścisłości i uproszczeń, które przedstawiono poniżej.

1. W opisie rodzajów połączeń pojawiło się pewne niezręczne sformułowanie związane z określeniem rodzaju materiału, gdyż badaniom eksperymentalnym i analizie numerycznej poddany jest stop tytanu Ti6Al4V, a nie tytan.

2. W pracy pojawia się kilkakrotnie błędne oznaczenie stopu tytanu (np. str. 46, 47, 87 itd.) w postaci: Ti6Al4V, podczas gdy oznaczenia poszczególnych pierwiastków to: Ti (tytan) oraz aluminium (Al), a więc poprawne oznaczenie stopu tytanu poddanego badaniom jest następujące: Ti6Al4V.
3. Na str. 18 występują niezręczne sformułowania: „W celu ich usunięcia dokonuje się kąpeli kwaśnej lub alkalicznej elementów.”, raczej powinno być „... dokonuje się zanurzenia elementów w kąpeli kwaśnej lub alkalicznej.” Ponadto w zdaniu „Może być ona przeprowadzana przy pomocy piaskowania, obróbki strumieniowo ściernej, śrutowania, kulowania, szlifowania, szcztokowania, skrawania.”, wymienione obróbki należą do obróbki skrawaniem, a skrawanie nie stanowi dodatkowej obróbki powierzchni, co sugeruje wyżej przedstawione zdanie.
4. W zdaniu (str. 19): „Istnieje możliwość zwiększania wytrzymałości połączeń klejowych lub przyspieszenie sieciowania przez stosowanie specjalnych gruntów – primerów czy aktywatorów).”, w celu większej precyzji należy zastosować dopełnienie: sieciowania kleju.
5. W obecnej nomenklaturze naukowej zaleca się stosowanie wyrażenia: „tworzywa polimerowe”, a nie „tworzywa sztuczne” (np. książka pt.: Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne. Praca zbiorowa pod. Red. R. Sikory, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006).
6. Niezrozumiałe jest zdanie: „Istotną cechą jest, że spoina klejowa jest tworzywem sztucznym, które charakteryzują inne własności mechaniczne od np. stali jak i ich zależność od temperatury.”, (str. 20).
7. Na str. 34 występuje niezręczne sformułowanie: „Innym sposobem wpływania na wytrzymałość połączeń jest długość zakładki klejowej”. Myślę, że Autor miał na myśli: „zmiany długości zakładki klejowej”.
8. Doktorant powinien konsekwentnie w całej rozprawie stosować jednakowe oznaczenie kleju.
9. Na str. 47 znajduje się zdanie: „Dla każdego typu połączeń wykonano pięć prób”. Czy oznacza to po 5 próbek połączeń klejowych dla każdego wariantu połączenia? Czy wykonano jedno połączenie dla każdego wariantu połączenia (tab. 3.4 i tab. 3.5). W dalszej części pracy słowo „próba” odniesione jest do badań wytrzymałościowych.

- Czy Doktorant określił minimalną liczbę pomiarów? I ewentualnie na podstawie jakich zależności i wyników badań zostały te obliczenia przeprowadzone?
10. Na str. 48 Doktorant wspomina, że: „Modyfikacje warstwy przykrawędziowej blach uzyskiwano na drodze obróbki mechanicznej”, ale brak jest jakiegokolwiek informacji na temat opisu technologii wykonania próbek blach poddanych późniejszemu klejeniu. Jest to istotne ze względu na fakt, że obróbce mechanicznej poddawana jest blacha o grubości 2 mm, co może powodować pewne trudności technologiczne, jednakże to zagadnienie nie jest przedstawione w rozprawie.
  11. Wydaje się, że bardziej poprawnym wyrażeniem jest „zniszczenie połączenia”, a nie „zerwanie złącza” lub „zerwanie połączenia”.
  12. Na wielu rysunkach w rozdziale 4 występuje opis osi x, jako: „Współrzędna X”, który powinien być jednak sprecyzowany.
  13. W pracy występują pewne nieprecyzyjne sformułowania związane z obiektem badań i analiz. Przykładowo w zdaniu (str. 57) „Podobny charakter zmiany maksymalnych naprężeń można zauważyć dla próbek wykonanych ze stali”, a przecież przedmiotem badań są połączenia klejowe blach stalowych, a nie próbki stalowe. Dotyczy to także pozostałych połączeń.
  14. Co oznacza sformułowanie: „płaskie przebiegi naprężeń”?
  15. Autor sformułował zdanie: „Z tego powodu w niniejszej pracy zaproponowano oryginalną zmianę geometrii strefy przykrawędziowej w celu obniżenia poziomu naprężeń.” (str. 60). Doktorant cytuje pracę [80], przedstawiając na rys. 1.35 typy połączeń analizowane w tej pracy, w której model 3 (z ukosowanymi krawędziami łączonych elementów) oraz model 4 (z zaokrągleniami krawędzi łączonych elementów) są analizowane. Wydaje się, że Doktorant powinien wskazać na różnice w rozpatrywanych modelach podkreślając ich oryginalność, ponieważ zmienna grubość łączonych elementów analizowana jest w niektórych pracach, zwłaszcza przedstawianych przez zagraniczne ośrodki naukowe.
  16. Na str. 61- występuje pomyłka w opisie połączeń, analizowane są połączenia różnoimienne (rys. 4.10), a w tekście jest opis: „tytan-tytan”.
  17. Przedstawiony plan procesu technologicznego (rys. 5.1 – str. 66) nie zawiera istotnego etapu, jakim jest etap utwardzania spiny klejowej (i ewentualnie etap sezonowania). Wydaje się także, że powinien zostać uwzględniony etap



przygotowania krawędzi blach (co jest istotą geometrii analizowanych połączeń klejowych) lub powinien zostać on uwzględniony w pierwszej operacji – cięcia blach, a także kontrola wykonania łączonych elementów. W planie tym nie umieszczono także etapu kontroli poprawności kształtowo-wymiarowej wykonania połączeń klejowych.

18. W rozdziale piątym brak jest następujących informacji: opisu technologii wykonania łączonych próbek (co jest niezwykle istotne ze względu na dokładności i zapewne trudność wykonania), określenia tolerancji wykonania łączonych próbek, rodzaju kąpieli odtłuszczającej umieszczonej w myjce ultradźwiękowej, brak oznaczenia modelu myjki firmy EMAG, a także opisu przygotowania kleju oraz tego, czy był nakładany na jedną, czy na dwie powierzchnie i czy zastosowane warunki przygotowania połączenia pozwoliły na uzyskanie założonej geometrii połączenia. Ponadto jaka była grubość spoiny klejowej i jej tolerancja wymiarowa?
19. Jaka była podstawa do przyjęcia długości zakładki wynoszącej 12,5 mm? Z tym związane jest także zdanie odnoszące się do przyszłych badań (str. 125). Jeżeli była to optymalna długość zakładki wynikająca z rozkładu naprężeń, to czy jest potrzeba prowadzenia dalszych badań w celu globalnej oceny analizowanych modyfikacji?
20. W podrozdziale 5.2 - str. 68, opisującym badania wytrzymałości połączeń klejowych, brak jest informacji na temat zastosowanej normy do badań. Ponadto na rys. 5.6 nie jest przedstawiona próba rozciągania (lub jej schemat), ale maszyna wytrzymałościowa i zdjęcie próbki, umieszczonej w szczękach tej maszyny.
21. W podrozdziale 5.4.1 (str. 73) brak jest informacji na temat ilości zastosowanych do badań próbek, ilości powtórzeń, a także rodzajów mierzonych parametrów chropowatości powierzchni. Wymienione w tym podrozdziale normy nie zostały zamieszczone w spisie literatury, podczas gdy inne normy zostały tam umiejscowione.
22. Podrozdział 5.4.2 (str. 73 i 74) – pojawiają się pewne nieścisłości terminologiczne. Pomiar dotyczy kąta zwilżania nie swobodnej energii powierzchniowej, którą określa się na podstawie pomiaru kąta zwilżania. W opisie równania (5.4) i (5.5) powinien znaleźć się opis odniesiony do swobodnej energii powierzchniowej, a nie do napięcia powierzchniowego. W tekście występuje niefortunne wyrażenie „na badanym materiale”, powinien być opis „na powierzchni badanego materiału”. Wystąpił pewien błąd w prezentacji jednostek w tabeli 5.2. W tekście występuje opis, że

powierzchnie blach po obróbce piaskowaniem odtłuszczano acetonem i po takim przygotowaniu powierzchni poddano je badaniom związanym z pomiarami kąta zwilżania. Natomiast w podrozdziale 5.2 powierzchni próbek poddano oczyszczaniu w myjce ultradźwiękowej, stąd pytanie: dlaczego do określenia wartości swobodnej energii powierzchniowej, zastosowano inną metodę odtłuszczenia oraz zapewne środek odtłuszczający (gdyż w pracy brak jest informacji na temat zastosowanego środka odtłuszczającego podczas odtłuszczenia ultradźwiękowego), który wpływa na uzyskanie innych właściwości adhezyjnych łączonych powierzchni? Brak jest podstawowych parametrów niezbędnych do opisu tego rodzaju badań: objętości kropli pomiarowej, ilości kropli zastosowanych cieczy pomiarowych, ilości próbek materiałów poddanych badaniu, odległości z jakiej osadzano krople na badanej powierzchni, temperatury i wilgotności (które odgrywają bardzo ważną rolę w tego rodzaju badaniach). Jaki był czas pomiaru od chwili osadzenia kropli cieczy pomiarowej na powierzchni do chwili pomiaru? W jaki sposób oceniono, że kropla osiągnęła stan równowagi? Co oznacza, że pomiar kąta wykonywany był dziewięć razy? Dla jednej kropli? Dla kilku kropli? Jaka była częstość odczytu wartości kąta zwilżania? Z przedstawionymi pytaniami związana jest część pracy dotycząca wyników (str. 90), które nie zawierają wiadomości dotyczących odchyłeń standardowych uzyskanych wyników. Dla przedstawionych kątów zwilżania woda wyniki SEP i jej składowych (tabel 6.9) są błędnie obliczone. Do obliczeń wymienionych wielkości w przypadku stali zastosowana jest metoda średniej geometrycznej (metoda Owensa-Wendta), a w przypadku próbek ze stopu tytanu metoda średniej harmonicznej (metoda Wu), w związku z czym wartości tych nie można porównywać.

23. Doktorant, wymieniając otrzymane rodzaje zniszczenia połączeń klejowych, nie wspomina o normie, na podstawie której określono charakter zniszczenia.
24. Rozdział 8 – występuje nieprecyzyjne zdanie: „ W przypadku modelowania połączeń klejowych (materiałów o niskiej granicy plastyczności) należy stosować sprężysto-plastyczny model materiału łączonych blach”.

#### 4. Uwagi dotyczące edycji rozprawy

Rozprawa napisana jest w sposób przejrzysty. Niedosyt jednak budzi brak konsekwencji oznaczeń i niejednoznaczności terminologiczne, a także bardzo liczne błędy edycyjne oraz interpunkcyjne, które przedstawiono poniżej.

1. Wykaz oznaczeń i skrótów (str. 3) został przygotowany dość niestarannie. Nie obejmuje on wielu oznaczeń i symboli zamieszczonych w pracy (np.  $b$  (str. 22, 86),  $E$  (str. 26),  $k$  (str. 26),  $A$  (str. 25, 86),  $F_B$  (str. 27, 35),  $n_V$  (str. 27),  $n_{GR}$  (str. 27),  $R_t$  (str. 30),  $R_b$  (str. 31),  $S_x$  (str. 31),  $S_y$  (str. 31),  $L_{upt}$  (str. 35),  $\sigma_{zr}$  (str. 37),  $\delta_k$  (str. 38),  $v$  (str. 41),  $\varepsilon_z$  (str. 51),  $W$  (str. 51, 52),  $X$  i inne symbole na str. 83,  $\alpha$  (str. 84),  $\varepsilon_M$  (str. 86),  $\varepsilon_{pl}$  (str. 112).
2. Ponadto pojawiają się błędy w oznaczeniach, a mianowicie: w wykazie oznaczeń i symboli, symbol „ $d$ ” oznacza „grubość spoiny klejowej”, a na str. 26 – „szerokość łączonych blach”; symbol „ $l_u$ ” (pisany raz małą, a raz dużą literą w tekście lub „ $Lu$ ”), oznacza szerokość zakładki, a w dalszej części pracy oznacza długość zakładki (np. str. 26, 30).
3. W pracy pojawiają się nieścisłości terminologiczne (np. str. 10, 11, 12). Doktorant w rozprawie stosuje wyrażenie „połączenie klejowe” oraz „złącze klejowe”, przyjmując oba wyrażenia jako synonimy, podczas gdy (zgodnie z informacjami zwartymi w niektórych publikacjach, (np. Prof. M. Żenkiewicza lub Prof. R. Sikory), złącze stanowią dwa materiały (np. podłoże i powłoka), natomiast połączenie tworzą dwa materiały złączone za pomocą materiału pośredniczącego, jakim (w przypadku połączeń klejowych) jest klej.
4. Str. 4 – występuje: „Mises – naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera (Mises)”, raczej powinno być oznaczenie „Hubera-Misesa” lub „H-M”, ewentualnie „Hubera–Misesa–Hencky’ego” lub „H-M-H” i stosowny opis.
5. Str. 4 – występuje: „ $R_m$  – wytrzymałość na rozciąganie rozciąganej podczas statycznej próby rozciągania”, należy usunąć słowo „rozciąganej”.
6. Str. 5 – występuje wyrażenie: „Połączenia tytan-tytan” oraz „Połączenia tytan-stal z modyfikacją blachy stalowej po lewej stronie”, a przecież analizowany jest stop tytanu.

7. Str. 10 (pkt. 11) – należałoby sprecyzować, jaki moduł sprężystości kleju jest w tym zdaniu rozważany. Ponadto dość niefortunne jest zdanie: „Znacznie mniejszy moduł sprężystości kleju od stali sprzyja tłumieniu drgań”.
8. Str. 10 (pkt. 1) – niewłaściwe jest wyrażenie: „Klej wymaga odpowiedniego czasu do utwardzania...”. Klej wymaga odpowiedniego czasu utwardzania, w celu osiągnięcia określonych właściwości (w tym mechanicznych).
9. Str. 12 – niewłaściwe jest wyrażenie: „zastygniętego kleju”, jest to wyrażenie kolokwialne, które nie należy stosować w pracy naukowej.
10. Str. 13, str. 14 – niewłaściwe jest wyrażenie: „kął zwilżenia”, należy stosować terminologię „kat zwilżania”, co zresztą występuje w wykazie oznaczeń na str. 3 i w tekście rozprawy.
11. Str. 14 – występuje nieprawidłowa forma zapisu jednostki energii powierzchniowej. Jest: „ $mJm^{-2}$ ”, podczas gdy poprawne formy zapisu jednostek to:  $mJ/m^2$  lub  $mJ m^{-2}$  (lub też  $mJ \cdot m^{-2}$ ).
12. Str. 15 – brak oznaczenia stopni przy niektórych wartościach.
13. Str. 17 – powinien być zapis: „ustalenie i złożenie elementów klejonych”.
14. W pracy występują także niezręczne sformułowania typu: „klejów twardniejących” (str. 21); „a co za tym idzie” (str. 21); itp.
15. Na str. 22 występuje także błąd dotyczący określenia czynników wpływających na wytrzymałość połączeń klejowych, jest: „moduł sprężystości poprzecznej (liczba Poissona)”, przecież są to dwie różne wielkości.
16. Niezrozumiałe jest oznaczenie „(1.4.1 – powyżej)” w zadaniu zamieszczonym na str. 25.
17. Na str. 26 i 27 Doktorant powołuje się na wyniki badań: „Matting i Ulmer [3]”, podczas gdy w spisie literatury pod numerem [3] występuje inna pozycja.
18. W przypadku kilku rysunków występują pewne nieścisłości w oznaczeniach rysunkowych i w opisie rysunków (np. str. 31).
19. Str. 41 – powinna być następująca forma zapisu:  $v = 0,34$ .
20. Str. 45 – występuje: „Rozdział szósty obejmuje wyniki badań eksperymentalnych, w których określono nośność rozpatrywanych połączeń klejowych”. Powinno być: „...na podstawie których...”.

21. Na wielu rysunkach w rozdziale 4 występuje opis osi x, jako: „Współrzędna X”, który powinien być jednak sprecyzowany.
22. Brak przecinków przed licznymi wyrażeniami, typu: „ jak również” (np. str. 6, 72), „aby” (np. str. 11), „czy” (np. str. 11), „w jakim” (str. 11) i wiele innych,
23. W pracy występuje niekonsekwencja oznaczeń próbek, przykładowo: „Ti\_F\_...” i „Ti\_Fe\_...”.
24. Str. 8 – występuje: „przyjmuję się”. Powinno być „przyjmuje się”.
25. Str. 9 – Rys. 1.1 – w opisie rysunku jest powołanie się na pozycje literaturowe [3, 7], są to pozycje niemieckojęzyczne, a opis rynku jest w języku polskim, co sugeruje, że albo jest to opracowanie na podstawie tych pozycji (co należałoby zaznaczyć w opisie wykorzystania źródeł bibliograficznych) lub też jest pomyłka w źródłowej literaturze. Podobna sytuacja dotyczy rys. 2.1 i wielu innych rysunków.
26. Str. 28 – błędna numeracja tabeli, powinno być: Tab. 1.1 (rozdział 1), a jest 2.1.
27. W przypadku niektórych rysunków zamieszczonych w rozdziale 6, brak jest osi Y, podane są tylko jednostki.
28. W przypadku wartości parametrów chropowatości powierzchni zamieszczonych w podrozdziale 6.6 brak jest jednostek tych wielkości.
29. Brak jest konsekwencji przedstawiania liczb dziesiętnych, stosując m.in. taką samą liczbę miejsc dziesiętnych (np. Tab. 7.2, Tab. 7.4, tab. 7.5).
30. W rozdziale siódmym występuje błędna numeracja tabel. Na str. 116 jest Tab. 7.4, po czym jest Tab. 7.3 (która występuje na str. 111).
31. Literatura nie jest przygotowana ani zgodnie z kolejnością cytowania, ani alfabetycznie. Brak konsekwencji zapisu cytowanej literatury oraz bardzo duża niestaranność w jej przygotowaniu:
  - a) w pozycji 26 brakuje nazwy czasopisma oraz pełnych danych bibliograficznych (zgodnie z przyjętą zasadą w rozprawie dotyczącą przedstawiania pozycji bibliograficznych) oraz występują błędy edycyjne w oznaczeniu stopu tytanu,
  - b) poz. 43 - błędne nazwisko autora, jest: „Kuczmarzewski”, a powinno być: „Kuczmaszewski”, poz. 51 – błędne nazwisko autora, jest: „Kłocica”, a powinno być: „Kłonica”,
  - c) błędy edycyjne w nazwie czasopisma (poz. 13, 82, 89),
  - d) błędy edycyjne w tytule pozycji literaturowej (poz. 30),

- e) błędy edycyjne w przedstawieniu pozycji literaturowej (poz. 34, 72, 72, 74, 101),
- f) brak roku wydania (poz. 10, 87),
- g) przedstawienie niepełnych danych budzi wątpliwości dotyczące rodzaju literatury (poz. 10, 15, 23, 24, 38, 44, 48, 50, 51, 70),
- h) brak numeru stron pozycji bibliograficznej (poz. 13, 19, 20, 22, 28, 29, 30, 42, 43, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 62, 68, 76, 79, 80, 81, 89, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 101),
- i) w wielu pozycjach przed rokiem wydania monografii znajduje się przecinek, a przed niektórymi nie jest on umiejscowiony,
- j) w przypadku źródeł internetowych brak daty dostępu do danych (poz. 8, 9, 12, 35, 37),
- k) brak wydawnictwa lub pełnej nazwy wydawnictwa (poz. 27, 33, 47, 51, 61, 87),
- l) brak miejsca – miasto (ewentualnie kraj) wydania literatury (poz. 36, 40, 41, 46, 58, 75, 87, 88, 89).

Przedstawione powyżej uwagi formalne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy, choć wpływają na ogólne wrażenie związane z edycją pracy.

## 5. Wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter oryginalnej pracy naukowej, łączącej w sobie w sposób zrównoważony elementy poznawcze i praktyczne. Została ona przedstawiona zgodnie z metodologią prowadzenia i prezentowania prac naukowych.

Wnioski sformułowane w rozprawie mają istotne znaczenie dla lepszego poznania wpływu analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń klejowych (związanych przede wszystkim z różną geometrią strefy przykrawędziowej łączonych materiałów) na zwiększenie nośności połączeń klejowych, poprzez obniżenie wartości naprężeń w spoinie klejowej. Ponadto w przypadku połączeń klejowych materiałów jendoimiennych zwiększanie modułu Younga istotnie wpływa na obniżenie wartości maksymalnych naprężeń w warstwie środkowej spoiny klejowej. Podkreślono, że w przypadku modelowania połączeń klejowych należy uwzględnić sprężysto-plastyczny model materiałów łączonych, ze względu na poprawność określenia poziomu naprężeń w połączeniach klejowych, a także nie należy dopuszczać do powstania odkształceń plastycznych w materiałach łączonych, gdyż uplastycznienie materiału prowadzi do nagłego wzrostu naprężeń w spoinie klejowej, co jest

przyczyną obniżenia nośności połączeń klejowych jednozakładowych. Przedstawione wnioski mają istotne znaczenie poznawcze i utylitarne.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają słuszność sformułowanego celu głównego rozprawy oraz celów szczegółowych rozprawy oraz stanowią weryfikację założonych celów badawczych rozprawy. Na uznanie zasługuje obszerny zakres analizy numerycznej, wykonanej także z uwzględnieniem danych materiałowych uzyskanych na drodze doświadczalnej, choć zastrzeżenia budzi metodyka wykonania niektórych badań doświadczalnych, rezultaty tych badań oraz ich interpretacja. Pewną niedoskonałością pracy jest niestaranność jej przygotowania w niektórych fragmentach.

Pomimo przedstawionych w punkcie 3 i 4 uwag krytycznych recenzowaną rozprawę doktorską mgr. inż. Krzysztofa Zieleckiego oceniam pozytywnie. Doktorant w konsekwentny sposób zrealizował przyjęte cele rozprawy, wykazując pozytywny wpływ przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń klejowych na zwiększenie nośności połączeń klejowych. Niniejsza rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne, a uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w praktyce.

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Zieleckiego p.t.: „Numeryczno-eksperymentalna analiza naprężeń oraz nośności zakładkowych połączeń klejowych ze zmodyfikowaną strefą przykrawędziową” oceniam, że rozprawa ta spełnia warunki określone w ustawie 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) w odniesieniu do rozpraw doktorskich. Upoważnia mnie to do przedstawienia wniosku o dopuszczenie Pana mgr inż. Krzysztofa Zieleckiego, po spełnieniu pozostałych wymogów, do publicznej obrony tej rozprawy.

Anna Ludawska