



WYDZIAŁ MECHANICZNY POLITECHNIKA LUBELSKA

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



*Recenzja spełnia wymagania formalne
Przewodniczący Rady
Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu
dr hab. inż. Marcin Strużek*

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

Lublin, dnia 31.08.2020 r.

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Buli pt.: „Analiza doświadczalno-numeryczna połączeń klejonych w konstrukcjach stalowych”

Podstawą sporządzenia niniejszej recenzji jest pismo Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu dr hab. inż. Grzegorza Wojnara, prof. PŚ Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej z dnia 14 lipca 2020 roku, nr RDILT/102/2019/2020 i zawarta na tej podstawie umowa o dzieło.

1. Cel rozprawy

Głównym celem recenzowanej rozprawy było poszerzenie wiedzy na temat połączeń klejowych konstrukcyjnych elementów stalowych, wykonanych przy zastosowaniu wybranego kleju metakrylowego.

Wśród zadań szczegółowych wymieniono:

- 1) określenie wybranych cech kleju w zakresie koniecznym do prawidłowego modelowania połączeń klejowych, wykonanych przy zastosowaniu tego kleju,
- 2) analizę wpływu wybranych czynników reologicznych zastosowanego kleju na właściwości połączeń konstrukcyjnych elementów stalowych, wykonane przy użyciu badanego kleju,
- 3) określenie wybranych charakterystyk kleju w różnych wartościach temperatury odniesienia,

Wpłynęło dnia 4.09.2020 r.

- 4) zaproponowanie metodyki modelowania numerycznego połączeń typu stal-stal wykonanych przy użyciu badanego kleju.

Moim zdaniem w celu pracy należałoby doprecyzować, że rozprawa dotyczy konstrukcyjnych połączeń klejowych elementów stalowych. W opisie zadań szczegółowych wydaje się, że można byłoby zmodyfikować przedstawione sformułowania, stosując np. synonimy, gdyż w trzech zadaniach pojawia się sformułowanie w odpowiedniej formie „wykonanych przy użyciu badanego kleju”. Ponadto należałoby doprecyzować drugie zadanie związane z określeniem rodzaju materiału, którego dotyczą czynniki reologiczne (tu: kleju) i że analiza wpływu wybranych czynników reologicznych kleju dotyczy właściwości (jakich?) konstrukcyjnych połączeń klejowych elementów stalowych.

W pracy sformułowano również 3 tezy oraz do każdej z nich przedstawiono pewne ograniczenia związane z realizowanym zakresem badań i analiz. Pierwsza teza w brzmieniu: „Wzmocnienie belek dwuteowych wykonane przy użyciu stalowych płaskowników połączonych z konstrukcją klejem metakrylowym, daje możliwość znacznego zwiększenia nośności doraźnej. Istnieje również możliwość przywrócenia pierwotnej nośności uszkodzonych belek, przez zastosowanie stalowych płaskowników połączonych z konstrukcją klejem metakrylowym” jest oryginalna i wynika także z analizy literatury przedmiotowej, choć moim zdaniem powinna być raczej hipotezą badawczą w rozumieniu „przypuszczenia mającego ułatwić wyjaśnienie zjawiska” oraz „domysłu lub założenia opartego na prawdopodobieństwie, a zatem wymagające sprawdzenia”, a także „myślą/opisem precyzującym przypuszczenie co do istnienia jakiejś zależności, mechanizmu funkcjonowania, prawdopodobieństwa zachodzenia procesu, różnicy, itp.”.

Realizacja przyjętego celu rozprawy oraz związanych z nim zadań, a także weryfikacja sformułowanych tez, wymagała zarówno głębokiej analizy teoretycznej omawianej tematyki, jak również przeprowadzenia przez Doktoranta wielu 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 doświadczalne oraz analizę numeryczną, a jej tytuł jest adekwatny do zawartych w niej treści. Układ rozprawy jest przejrzysty i właściwy. Składa się ona z sześciu rozdziałów obejmujących: wprowadzenie,

przegląd literatury związanej z analizowaną tematyką, badania doświadczalne związane z określeniem właściwości mechanicznych oraz termicznych kleju poddanego analizie w niniejszej pracy, przy czym poszczególne badania doświadczalne dotyczące kleju uzupełnione zostały także analizą MES, badania i analizy numeryczne połączeń klejowych. W ostatnim rozdziale zamieszczono podsumowanie i wnioski.

W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie, w którym zawarto wstęp do analizowanej tematyki rozprawy, zalety oraz wady połączeń klejowych, cel i zakres rozprawy, tezy i ograniczenia, a także plan pracy.

Drugi rozdział dotyczący przeglądu literatury zawiera trzy podrozdziały w brzmieniu: wybrane cechy klejów, krótki przegląd badań w wybranym zakresie oraz analizy numeryczne. Zawarto w nim opis wybranych cech klejów, a także przedstawiono publikacje, zawierające zagadnienia związane z określeniem właściwości klejów metakrylowych. Przedstawiono także wybrane zagadnienia analizy numerycznej połączeń klejowych wraz z problematyką modelowania połączeń klejowych. 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 konkretne wskazanie obszarów znanych oraz tych, które nie są dostatecznie i szczegółowo poznane. Jednakże analiza stanu wiedzy pozwoliła na określenie celu naukowego oraz zadań szczegółowych, które zamieszczono w rozdziale pierwszym, przedstawiając w nim również zakres, tezy oraz plan rozprawy.

Trzeci rozdział rozprawy obejmuje badania doświadczalne związane z określeniem właściwości mechanicznych kleju wykorzystanego do wykonania połączeń klejowych, takich jak: wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałości na ścinanie oraz wytrzymałości na ściskanie. Zamieszczono także badania właściwości reologicznych kleju oraz jego przyczepności do różnych rodzajów powierzchni elementów metalowych. Moim zdaniem należałoby ten rozdział inaczej zatytułować (np.: „Badania wybranych właściwości fizycznych” i dołączyć badania właściwości termicznych) lub podzielić te badania na badania dotyczące właściwości mechanicznych, badania dotyczące właściwości reologicznych oraz badania np. przyczepności. Zarówno właściwości mechaniczne, jak i reologiczne, a także badania przyczepności i badania termiczne są właściwościami fizycznymi. Na uwagę zasługuje przyjęty sposób realizacji badań, w którym to po poszczególnych badaniach doświadczalnych wykonywano także analizą numeryczną. Na podstawie wyników analizy

numerycznej opracowywano modele materiałowe, które wykorzystano w dalszej części rozprawy w bardziej złożonych obliczeniach związanych z analizą MES konstrukcyjnych połączeń klejowych wybranych elementów stalowych, stosowanych w konstrukcjach budowlanych. Jednak pewnym niedostatkim jest brak pełnego przedstawienia istotnych informacji związanych z technologią wykonania próbek klejów do badań wytrzymałościowych i ilością wykonanych próbek. Wprawdzie przedstawiono informacje na temat ilości pomiarów, jednak brak jest literalnego wskazania ilości wykonanych próbek, a uwaga ta dotyczy wszystkich podrozdziałów rozdziału 3 związanych z badaniami laboratoryjnymi. Ponadto w badaniach związanych z przyczepnością kleju do podłoża stalowych warto byłoby umieścić także badania chropowatości powierzchni, gdyż zawarte w podrozdziale 3.6.4 wnioski odnoszące się do chropowatości powierzchni powinny być poparte wynikami niektórych parametrów chropowatości powierzchni.

W czwartym rozdziale zamieszczono metodykę oraz wyniki badań właściwości termicznych kleju metakrylowego, określając zmienność charakterystyki kleju w zależności od temperatury oraz długość (czas?) procesu wiązania.

Rozdział piąty dotyczy badań eksperymentalnych i analiz numerycznych połączeń klejowych, w których wykorzystano zarówno wiadomości teoretyczne na temat modelowania połączeń klejowych (zawartych w podrozdziale 2.3), jak i model materiałowy kleju metakrylowego oraz model materiałowy warstwy kontaktowej, przygotowany na podstawie danych uzyskanych w wyniku badań doświadczalnych zamieszczonych w rozdziale 3. Przeprowadzono także walidację wyników analizy numerycznej na podstawie wyników literaturowych. Analizie numerycznej poddano połączenia zakładkowe (bazując na badaniach doświadczalnych przedstawionych w literaturze), a także ważną częścią tego rozdziału były badania doświadczalne wzmocnionych belek stalowych oraz ich analiza numeryczna. Przedmiotem badań w podrozdziale 5.3 były dwa rodzaje belek stalowych IPE120 wzmocnionych płaskownikowymi (bez uszkodzeń mechanicznych oraz z uszkodzonym pasem dolnym), które to płaskowniki przyklejono za pomocą kleju metakrylowego i poddano badaniom trójpunktowego zginania. Wydaje się, że bardziej poprawnie byłoby stosować wyrażenie: „analiza numeryczna”, zamiast tego wyrażenia w liczbie mnogiej, zawierającego, jako gałąź matematyki, jeden z analizowanych poddziałów – metody numeryczne. Ponadto wydaje się, że zgodnie z nomenklaturą stosowaną w technologii klejenia, zwłaszcza w budowie maszyn czy lotnictwie, powinno raczej stosować się wyrażenia: „połączenia

klejowe” oraz „konstrukcje klejone”, choć oczywiście może to być dyskusyjne, ale jeżeli Doktorant zdecydował się stosować wyrażenie „połączenia klejone”, to powinien je konsekwentnie stosować w całej pracy. Natomiast Doktorant powinien uważniej stosować wyrażenia: „złącze klejowe” i „połączenie klejowe”, gdyż nie są to synonimy. Wynika to przede wszystkim ze specyfiki zjawiska adhezji. Zgodnie z teorią adhezji złącze adhezyjne jest to układ dwóch materiałów (np. układ ciało stałe-ciecz, przechodzący następnie w układ ciało stałe-ciało stałe, a przykładem może być np. element (podłoże) metalowy z powłoką malarską, czy też tworzywo polimerowe z farbą drukarską. Natomiast połączenie adhezyjne (np. klejowe) jest to układ składający się przynajmniej z trzech elementów: ciało stałe-ciecz-ciało stałe, które przechodzi następnie w układ ciało stałe-ciało stałe-ciało stałe i takim przykładem może być połączenie klejowe, składające się z dwóch materiałów (jednoimiennych lub różnoimiennych) połączonych klejem. Zatem konstatując połączenie adhezyjne składa się z dwóch złączy adhezyjnych. Z tego względu w rozważanych przez Doktoranta przypadkach przedmiotów analiz występują połączenia klejowe, a nie złącza klejowe, choć oczywiście w pracy w niektórych fragmentach pracy (np. w pkt. 2.1) wyraz „złącze” jest poprawnie użyty. Podczas analizy numerycznej uwzględniono liniowo lepko-sprężysty model materiałowy kleju, które to 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 piątego jest szczegółowa analiza stanu naprężeń w połączeniach klejowych różnych modeli wzmocnionych belek stalowych, uwzględniając zarówno analizę wyboczeniową w celu określenia występujących w modelu form niestateczności, jak i stosując metodę *Arc-length* (ALM). Na uwagę zasługuje także szczegółowa analiza i dyskusja bardzo obszernych i interesujących wyników badań. Pewnym słabym punktem tego rozdziału jest niewystarczająco szczegółowy opis metodyki wykonania połączeń klejowych dwóch rodzajów belek. Brak jest niektórych istotnych informacji, zwłaszcza dotyczących parametrów technologicznych przygotowania powierzchni belek do klejenia, tj. piaskowania, odłuszczenia oraz nakładania *primeru*. Z punktu widzenia przygotowania powierzchni do klejenia, jako pierwszego etapu technologii klejenia, decydującego w dużej mierze o późniejszej wytrzymałości wykonanego połączenia, jest to niezmiernie istotne. Podobna sytuacja występuje także w przypadku pozostałych etapów technologii klejenia, czyli brak jest wystarczających informacji na temat procesu nakładania kleju, a także etapu

utwardzania. Autor nie przedstawił również informacji na temat warunków wykonywania połączeń klejowych (tj. temperatury i wilgotności). Doktorant wspomniał o czasie sezonowania, ale nie zamieścił informacji dotyczącej wartości nacisku podczas sezonowania oraz nie sprecyzował: czy było to utwardzanie czy sezonowanie? Nie przeprowadzono również kontroli kształtowo-wymiarowej uzyskanych połączeń klejowych.

Ostatni rozdział szósty stanowi podsumowanie wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych i analizy numerycznej, w odniesieniu do przyjętych zadań oraz postawionych w rozprawie tez, w którym sformułowano, na podstawie otrzymanych rezultatów, wnioski zarówno o charakterze kwantytatywnym, jak i kwalitatywnym, a także określono kierunki dalszych badań.

Rozprawa doktorska składa się z 134 stron i zawiera 105 rysunków oraz 15 tabel. W niniejszej rozprawie przedstawiono wybrane oznaczenia i skróty stosowane w pracy, streszczenie w języku polskim (str. 131) oraz angielskim (str. 133). Cytowana literatura liczy 98 pozycji (która została przygotowana zgodnie z kolejnością cytowania w tekście) i obejmuje publikacje polskie oraz pozycje zagraniczne w języku angielskim. W zestawieniu literatury ujęto m.in. 12 norm technicznych i 7 pozycje o charakterze instrukcji technicznych lub materiałów informacyjnych. Nie występują natomiast opisy patentowe. W wykazie literatury znajdują się dwie publikacje Doktoranta, w których jest on autorem (poz. 45 i 64) oraz pięć współautorskich publikacji (poz. 8, 43, 44, 79, 80).

3. Ocena ogólna rozprawy

Cel główny oraz zaplanowane zadania zostały sformułowane jasno i przejrzysto. Dotyczą one zagadnień stosunkowo trudnych, zwłaszcza w rozpatrywanym kontekście, które nie były dostatecznie szczegółowo analizowane, zwłaszcza w odniesieniu do wybranych konstrukcji budowlanych. Przeprowadzone obszerne i interesujące badania eksperymentalne oraz analiza numeryczna pozwoliły lepiej poznać zagadnienia związane z konstrukcyjnymi połączeniami klejowymi elementów stalowych wykonanymi za pomocą wybranego kleju metakrylowego, znajdującymi zastosowanie w konstrukcjach budowlanych. Ma to duże znaczenie zarówno w aspekcie projektowania technologii wykonania połączeń klejowych, wspomaganej metodami numerycznymi, stanowiących element konstrukcyjnych w konstrukcjach budowlanych, jak i eksploatacji tych połączeń z uwzględnieniem ich

wytrzymałości oraz czynników wpływających na tą wytrzymałość, w tym czynników konstrukcyjnych.

Analiza stanu wiedzy przeprowadzona została dość wyczerpująco. Obejmowała ona zakres tematyczny rozprawy, aczkolwiek zabrakło konkretnego podsumowania tej analizy, na podstawie której sformułowane wnioski, ułatwiłyby Doktorantowi określenie celów rozprawy oraz trafnego wyboru metod badawczych, ustalenie odpowiedniego zakresu badań doświadczalnych oraz określonych zagadnień związanych z analizą numeryczną. Wydaje się, że pewne zagadnienia przedstawione w pierwszym rozdziale w połączeniu z informacjami zawartymi w przeglądzie literatury stanowiłyby pełniejszy obraz przesłanek do podjęcia przedstawionej w rozprawie tematyki.

Część numeryczna rozprawy została wykonana w sposób niebudzący zastrzeżeń i umożliwiła realizację założonych poszczególnych celów rozprawy, weryfikację przyjętych tez rozprawy oraz formułowanie wniosków cząstkowych w odniesieniu do poszczególnych badań doświadczalnych. Ponadto zastosowanie opracowanych modeli materiałowych określonych na podstawie wyników badań eksperymentalnych jest poprawne i pozwala na otrzymanie wyników analizy numerycznej uwzględniających rzeczywiste właściwości analizowanych połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu konkretnego kleju metakrylowego. Na podkreślenie zasługuje bardzo obszerny zakres analizy numerycznej związanej z określeniem rozkładu naprężeń w kleju (w tym wykorzystując kryterium liniowego uplastycznienia Druckera-Pragera kleju), przeprowadzonej w odniesieniu do poszczególnych rodzajów badań wytrzymałościowych, a także znaczną ilością wariantów rozpatrywanych różnych modeli połączeń klejowych belek stalowych w różnych konfiguracjach konstrukcyjnych (uwzględniających wzmocnienie w postaci płaskowników wykonane z użyciem kleju metakrylowego), wykorzystując zarówno analizę wyboczeniową w celu określenia występujących w modelu form niestateczności, jak i stosując metodę *Arc-length* (ALM). Na uwagę zasługuje także wyczerpująca analiza i dyskusja bardzo obszernych i interesujących wyników badań oraz zastosowanie analiz numerycznych towarzyszących poszczególnym badaniom wytrzymałościowym. Analiza numeryczna różnych konfiguracji belek stalowych pozwoliła na precyzyjne określenie mechanizmu zniszczenia wraz ze wskazaniem obszarów uplastycznienia kleju.

Niedosyt budzi jednak część doświadczalna związana przede wszystkim z technologią wykonania próbek (o różnych kształtach i wymiarach) zarówno kleju, jak i połączeń

klejowych. Wprawdzie właściwie zostały dobrane poszczególne badawcze metody, normy oraz związane z nimi maszyny i przyrządy pomiarowe, jednakże brak jest opisu technologii wykonania próbek do poszczególnych rodzajów badań. Ponadto w metodyce poszczególnych rodzajów badań brak jest wyartykułowanych ilości próbek zastosowanych do wyznaczania określanych w rozprawie wielkości, choć określona jest ilość badań oraz wartość średnia i inne parametry statystyczne analizowanych wielkości w przypadku wielu eksperymentów. Ponadto wydaje się niewystarczające zastosowanie pojedynczych próbek do określenia szybkości wytrzymałości próbek kleju, co także podkreślił Doktorant, wskazując, że uzyskane wyniki mają charakter orientacyjny. Aczkolwiek Doktorant przeprowadził (co już podkreślano) bardzo obszerne badania laboratoryjne, wykorzystując liczne metody oraz urządzenia.

Praca została wykonana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym, ze względu zarówno na sposób jej wykonania, jak i zakres przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz analiz numerycznych, choć pojawiają się pewne zastrzeżenia dotyczące części metodyki eksperymentów związanych z wykonaniem próbek. Jednak na uwagę zasługuje poprawny dobór metod badawczych podczas prowadzonych badań eksperymentalnych, odnoszących się także do norm badawczych, popartych także analizą numeryczną. Ponadto bardzo ważnym elementem jest także odwoływanie się do rezultatów zamieszczonych w literaturze podczas analizy uzyskanych wyników badań i analiz, często w formie dyskusji, co pozwala także zweryfikować oraz rozszerzyć istniejący stan wiedzy w analizowanym zakresie badań i analiz. Uważam, że takie podejście zasługuje na uznanie.

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

Rozdział 1

1. Doktorant w całej pracy powinien stosować konsekwentnie jednakowe nazewnictwo dotyczące kleju. W pracy występuje w pkt. 1.3 klej polimetakrylowy P(MMA) oraz klej metakrylowy P(MMA), natomiast w dalszej części rozprawy stosowany jest wyrażenie „klej metakrylowy”. Klej metakrylowy posiada skrót MMA, dlatego wydaje mi się, że w początkowej części pracy pojawiło się drobne nieporozumienie językowe. W dostępnych informacjach katalogowych, klej PLEXUS MA 420 jest określany jako klej metakrylowy, stąd wydaje się, że w całej pracy powinno być zastosowane określenie klej metakrylowy (MMA), aczkolwiek być może Doktorant posiada bardziej

szczegółowe dane dotyczące bazy chemicznej zastosowanego w badaniach kleju, choć także Doktorant wspomina w pkt. 2.1.5, że „W pracy rozpatrywano klej metakrylowy Plexus MA 420”.

2. Ponadto Doktorant powinien także konsekwentnie w całej rozprawie stosować jednakowe wyrażenie: „połączenie/a klejowe”, podczas gdy w rozprawie stosowane są wyrażenia: „połączenie klejone”; „połączenie klejowe”; „złącze klejone”. Bardziej szczegółowa uwaga na temat wyżej wspomnianych wyrażen została przedstawiona w pkt. 2 niniejszej recenzji.

Rozdział 2

3. W nomenklaturze naukowej zarówno krajowej, jak i zagranicznej, najczęściej spotykanym wyrażeniem jest kąt zwilżania (ang. *contact angle*), związany ze zwilżalnością powierzchni ciał stałych przez ciecze, choć „kąt kontaktu” może stanowić synonim, ale rzadko stosowany.
4. Doktorant powinien stosować słowo „temperatura” w liczbie pojedynczej, gdyż jest to jedna z podstawowych wielkości fizycznych.
5. Na str. 9 występują niezręczne sformułowania: „Jedną z możliwości poprawienia interakcji międzyfazowych w kleju jest zastosowanie warstwy gruntującej, tzw. *primera*, zazwyczaj w postaci cieczy rozprowadzanej na powierzchni przygotowywanej do klejenia. Zadaniem *primera* jest przed wszystkim zmniejszenia kąta tarcia pomiędzy niezwiązanym klejem a pokrytą powierzchnią.....”. *Primery* stanowią elementy pośredniczące pomiędzy klejem a łączoną powierzchnią. Określa się je jako substancje zwiększające adhezję powierzchni materiałów tworzących połączenie lub też powodujące przyspieszenie procesu sieciowania np. kleju. Środki te zwiększają udział wiązań chemicznych, głównie kowalencyjnych. Energia tych wiązań jest wielokrotnie większa niż podstawowych wiązań występujących w połączeniach adhezyjnych (np. sił Van der Waalsa). Struktura dobrego promotora adhezji powinna zapewniać oddziaływanie zarówno z łączonym materiałem, jak i z substancją pośredniczącą np. klejem. Można wyróżnić dwa rodzaje promotorów adhezji: pierwszy z nich nakładany jest na powierzchnie łączonych materiałów, drugi natomiast jest wprowadzany bezpośrednio do materiałów łączących. Dlatego zdanie przedstawione przez Doktoranta jest niepoprawne, bowiem w badaniach został zastosowany *primer*, nakładany na powierzchnie łączonych materiałów, mający za

zadanie zwiększenie adhezji pomiędzy łączoną powierzchnią a klejem. Ponadto konkludując powyższe informację zadaniem *primera* nie jest „przede wszystkim zmniejszenia kąta tarcia pomiędzy niezwiązanym klejem a pokrytą (*primerem*?) powierzchnią (elementu stalowego?).” Wydaje mi się, że te niezręczności były spowodowane przede wszystkim nieścisłościami i niuansami w tłumaczeniu tekstu z języka angielskiego z literatury [20], której twórcy należą do czołowych badaczy zajmujących się zagadnieniami technologii klejenia.

6. Rys. 2 – brakuje tzw. wstępu od opisu rysunku, np. Schemat: a)...., b).... , przy czym rysunek 2a) jest zbyt wyidealizowany, gdyż najczęściej nierówności, czy też mikronierówności (zwłaszcza elementów wykonanych ze stali, metali czy stopów metali)) mają inny charakter. Ponadto opis rys. 2b) jest niedostatecznie wyjaśniony: znajdują się tam dwa rysunki i oznaczenie Θ_0 , a brak jest objaśnienia. W tekście także powinien znaleźć się także oznaczenie symbolowe kąta zwilżania (np. na str. 9).
7. Podpis rys. 3 jest w pewien sposób niezręcznie sformułowany: siły adhezyjne występują pomiędzy dwoma materiałami, a nie w materiale. W materiale (w kleju, w łączonych materiałach) występują siły kohezyjne (siły spójności).
8. Na rys. 4 przedstawiono w sposób raczej uproszony rodzaje zniszczenia spoiny klejowej i przede wszystkim dotyczy to charakteru zniszczenia połączeń klejowych, ponieważ zgodnie z normą PN-EN ISO 10365 można wyróżnić następujące rodzaje uszkodzeń połączeń klejowych: a) zniszczenie wewnątrz materiału (SF - uszkodzenie jednego lub obu elementów (uszkodzenie podłoża), CFS - zniszczenie łączonych elementów (niszczenie kohezyjne podłoża), (p) DF - zniszczenie delaminacyjne), b) uszkodzenie wewnątrz warstwy kleju (CF - zniszczenie kohezyjne, SCF - specjalne zniszczenie kohezyjne, AF - zniszczenie adhezyjne, ACF (P) - zniszczenie adhezyjne i kohezyjne z odrywaniem).
9. W pracy występuje niezgodne z obowiązującą normą (PN-EN ISO 4287) oznaczenie parametru chropowatości Ra (średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości). Ponadto Ra nie jest „chropowatością powierzchni”, stąd też zdanie, w którym występuje ten parametr powinno być inaczej sformułowane.

Rozdział 3

10. W podrozdziałach związanych z badaniami laboratoryjnymi brak jest pełnego przedstawienia istotnych informacji związanych z technologią wykonania próbek

klejów do badań wytrzymałościowych i ilością wykonanych próbek. Wprawdzie przedstawione są informacje dotyczące ilości pomiarów, ale nie wymieniono ilości wykonanych próbek. Brak jest informacji na temat metody i warunków przygotowania kleju, a także parametrów technologicznych utwardzania. Jaką metodą wykonano próbki wioselkowe? W jaki sposób utrzymano określoną wartość temperatury i wilgotności podczas kondycjonowania? Jaka była metodologia przyjęcia trzech różnych prędkości przyrostu tłoka?

11. Warto jest podać rodzaj lub typ maszyny wykorzystanej w badaniach. Co oznacza wyrażenie: „sterowana przemieszczeniowo prasa hydrauliczna”?
12. Rys. 13 – co oznaczają oznaczenia np. T-001 –T-005 itp.? Podobne oznaczenia znajdują się na kolejnych rysunkach, ale brak jest ich wyjaśnienia w tekście.
13. Rys. 14 – warto podać oznaczenia poszczególnych symboli albo w tekście, albo w wykazie oznaczeń.
14. W tym rozdziale na rysunkach warto ujednolicić opis oznaczenia symbolu ε .
15. Pkt 3.2.3. Czy jedna godzina od czasu uformowania próbek do chwili wykonania próbek kleju oznacza czas utwardzania czy sezonowania? Jaki jest czas utwardzania tego kleju do osiągnięcia pełnej wytrzymałości?
16. Pkt 3.4.1. Brak jest informacji na temat technologii wykonania połączeń klejowych jednozakładkowych SLJ, tzn. parametrów technologicznych procesu przygotowania powierzchni łączonych materiałów, sposobu przygotowania i aplikacji kleju, warunków utwardzania, warunków wykonania połączeń klejowych, a także informacji na temat kontroli kształtowo-wymiarowej wykonanych połączeń. Brak jest informacji na temat rodzaju zastosowanego kleju do wykonania tych połączeń.
17. Rys. 24. Jak było „typowe zniszczenie próbki”?
18. Pkt 3.4.2. Uwagi takie same jak przedstawiane w punkcie 3.4.1.
19. Warto sprecyzować, jakie odkształcenie i naprężenie jest przedstawiane na rys. 24, rys. 26, 29 i 30, gdyż zamieszczone są inne symbole niż na rysunkach wcześniejszych, a także określone jako odkształcenie czy przemieszczenie.
20. Rys. 29, Tabela 6 – co oznaczają symbole P1 i P2, a także pozostałe symbole w tabeli 6 typu S1, S2,... oraz T1, T2... itp. Brak wyjaśnienia w tekście (bądź w tabeli 6) tych oznaczeń.
21. Tabela 6. Dlaczego niektóre liczby dziesiętne zapisane są z użyciem kropki?

22. Rys. 31 i 32. Może lepszy byłby opis np.: Warunki brzegowe przyjęte w modelu numerycznym TAST/ SLJ.
23. Pkt 3.5.1. Uwagi są podobne jak przedstawiane w punkcie 3.4.1, z uwzględnieniem tego, że dotyczą próbek kleju.
24. Podrozdział 3.6. Metodyka badań nie jest przedstawiono w sposób wyczerpujący. Brak informacji na temat konkretnego rodzaju użytych w badaniu przyczepności materiałów. Jaki był rodzaj stali poddanej piaskowaniu i malowaniu? Jaki rodzaj blach stalowych ocynkowanych i jaki był rodzaj powłoki cynkowej (oznaczenie)? Brak informacji na temat parametrów technologicznych sposobu przygotowania powierzchni wykorzystanych w badaniach materiałów, co jest niezwykle istotne w teście przyczepności. Warto byłoby przedstawić schemat badania wraz z wymiarami stempla. Niektóre informacje na temat wymiarów próbek wykorzystanych w badaniach zamieszczono dopiero w podrozdziale związanym z analizą numeryczną badań przyczepności, a przecież takie informacje powinny być umieszczone w części metodycznej. Jaki był rodzaj *primera*? Jakie były parametry technologiczne procesu wykonania połączenia? Jaka była grubość spoiny klejowej? W jaki sposób ją uzyskano? Jakie zastosowano urządzenia w badaniach przyczepności? Co oznacza wyrażenie „ stemple pomiarowe przed klejeniem były uszorstnione”? Czy w normie PN-EN ISO 4624 występuje/ą ograniczenie/wytyczne odnośnie wartości grubości podłoża? Konieczne jest wyjaśnienie oznaczeń X, Y, A, B, C, gdyż pozwoli to na pełniejsze zrozumienie opisu wyników badań laboratoryjnych. W opisie wyników (Tabela 8) występują następujące rodzaje przygotowania powierzchni: malowanie – wadliwe i malowanie – poprawne, natomiast w metodyce badań brak jest informacji na temat wymienionych wariantów przygotowania powierzchni, stąd trudno jest ocenić różnice we wspomnianych sposobach przygotowania powierzchni. Jakie było uzasadnienie przyjęcie analizowanych w analizie MES grubości podłoża? Wnioski odnoszące się do chropowatości powierzchni analizowanych w badaniach przyczepności materiałów powinny być poparte wynikami wybranych parametrów chropowatości powierzchni.

Rozdział 4

25. Na jakiej podstawie przyjęto zakres temperatury od -70 do +180°C podczas analizy DMTA, podczas gdy temperatura pracy tego kleju wynosi -55 do +121°C [79]?

26. W rozdziale tym pojawiło się pewne niezręczne sformułowanie: „próbka stygła”, raczej jest to proces utwardzania kleju.
27. W odniesieniu do przeprowadzonych badań warto byłoby odnieść się do deklarowanych przez producenta wartości dotyczących czasu utwardzania oraz tzw. czasu życia kleju, a także maksymalnej jednorazowej ilości aplikowanego kleju, co jest istotne z punktu widzenia opracowania metodyki wykonania próbek kleju oraz interpretacji uzyskanych rezultatów.
28. Brak informacji na temat masy próbek podczas wykonywania analizy DSC, przy czym Doktorant wspominał w punkcie 4.2.3, że „interpretując uzyskane wyniki należy mieć świadomość, że dotyczą one próbki kleju o określonym kształcie i masie...”, ale brak jest na ten temat informacji.
29. Podobne uwagi dotyczące metodyki badań dotyczą także analizy DMTA oraz TGA.
30. Str. 70 – występuje niezręczne sformułowanie: „związaną próbkę kleju”.

Rozdział 5

31. Podobnie jak w rozdziale 3 i 4, pewien niedosyt budzi część metodyki badań związana przede wszystkim z technologią wykonania próbek (o różnych kształtach i wymiarach) zarówno kleju, jak i połączeń klejowych. Ze względu na to, że powyżej zamieszczono kilka uwag związanych ze wspomnianymi niedociągnięciami, w tym punkcie zostaną one pominięte.
32. Czy w badaniach przyczepności także wykorzystano stal 18G2A oraz Domex 700?
33. Jaka była ilość wykonanych próbek połączeń klejowych? W jaki sposób uzyskano grubość kleju wynoszącą 1,2 mm i ile wynosi tolerancja tego wymiaru? Czy nie uzyskano żadnych odchyłek wymiarowych tego wymiaru?
34. Pkt 5.3. Dlaczego została przyjęta grubość spoiny klejowej o wartości 1 mm? Z dostępnym danym literaturowym wynika, że optymalna grubość spoiny klejowej w aspekcie uzyskiwanej wytrzymałości konstrukcyjnych połączeń klejowych powinna wynosić od 0,05 do 0,15 (0,20) mm. Ponadto w przypadku połączeń klejowych zakładkowych przyjęto wspomnianą grubość spoiny klejowej 1,2 mm. Z kolei w pkt. 3 4 przyjęto grubość spoiny klejowej 0,2 mm. Jakie były przesłanki do przyjęcia takich grubości spoin klejowych?

Rozdział 6

35. Str. 112 - wspomniano, że „czas wiązania kleju wynosi 36 minut...”, a jaki jest czas utwardzania deklarowany przez producenta?
36. Doktorant stosuje wyrażenie $\sim 23^{\circ}\text{C}$, sugerujące pewne przybliżenie określonej wartości temperatury, podczas gdy w poprzednich rozdziałach występuje jednoznaczna wartość 23°C .

4. Uwagi dotyczące edycji rozprawy

Rozprawa napisana jest w sposób przejrzysty. Na uwagę zasługuje staranność wykonanych rysunków i tabel, choć występują nieliczne drobne błędy.

1. Wykaz oznaczeń i skrótów (str. VII) nie obejmuje niektórych oznaczeń i symboli zamieszczonych w rozprawie, zwłaszcza podstawowych, np. takich jak: ε i σ , które pojawiają się kilkakrotnie w pracy.
2. Powinno być: ν - współczynnik Poissona.
3. Warto dodać w przypadku oznaczenia modułu Younga: E - moduł sprężystości wzdłużnej.
4. W rozdziale 3 występuje błędna numeracja zależności (wzorów) – brak jest numeru oznaczenia zależności (6), stąd też dalsza numeracja zależności (wzorów) jest nieprawidłowa.
5. Brak przecinków przed niektórymi wyrażeniami, typu: „w którym”; „na którym” (np. str. 61, 65), „aby” (np. str. 112).
6. Na str. 84 występuje niezręczne sformułowanie „Na podstawie tabeli 12 zauważyć można....”, raczej powinno być: „Na podstawie wyników zawartych w tabeli 12 zauważyć można.....”.
7. Może warto byłoby na rys. 77 zaznaczyć „płaszczyznę o zerowej grubości” (str. 100).
8. Co oznacza wyrażenie „niemalejąca półka plastyczna”?
9. W odniesieniu do drobnych uwag edycyjnych bibliografii występuje różny styl zapisu literatury (np. poz. 19, 36, 26, 65), a także w niektórych pozycjach literaturowych brak jest:
 - a) miejsca – miasta (ewentualnie kraju) wydania literatury (np. poz. 2,3, 4),
 - b) numeru stron pozycji bibliograficznej (np. poz. 32, 33, 34, 41, 43, 44, 46, 48, 49 i inne),

- c) jednakowego stylu zapisu nazwy czasopisma (np. poz. 46, 10 i 39, 79, 81,98),
- d) błędna i niepełna nazwa wydawnictwa (np. poz. 30, 31),
- e) błędna nazwa nazwiska poz. 20 – powinno być Öchsner.

Przedstawione powyżej uwagi formalne nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy i nie wpływają znacząco 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 możliwości modelowania połączeń klejowych elementów stalowych, wykonanych za pomocą kleju metakrylowego, znajdujących zastosowanie w konstrukcjach budowlanych. Pewną niedoskonałością rozprawy jest brak literalnego wskazania, czy przyjęte tezy zostały potwierdzone lub ewentualnie w jakiej części zostały one zweryfikowane, choć oczywiście w podsumowaniu przedstawiono odniesienie uzyskanych wyników do tez rozprawy.

Podczas analizy numerycznej wykazano bardzo dobrą zbieżność przyjętego modelu materiałowego kleju, bazującego na kryterium Druckera-Pragera oraz warstwie kontaktowej, z wynikami badań eksperymentalnych. Dzięki przyjęciu odpowiednich założeń umożliwiono zamodelowanie procesu degradacji zgodnie z zasadami mechaniki pęknięcia.

Podkreślono, że doklejenie płaskowników do belek dwuteowych (wykonanych w dwóch wersjach) przyczynia się do istotnego zwiększenia nośności doraźnej, zachowując pełną integralność spoiny klejowej. Dodatkowo, wykazano, że zastosowanie analizy numerycznej rozważanych belek dwuteowych, pozwoliło na precyzyjnie określenie mechanizmu zniszczenia, wraz ze wskazaniem obszarów uplastycznienia kleju.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają słuszność sformułowanego celu rozprawy i tez rozprawy oraz stanowią weryfikację założonych tez badawczych rozprawy. Na uznanie zasługuje obszerny zakres badań eksperymentalnych i analizy numerycznej, towarzyszącej każdemu z rodzaju badań wytrzymałościowych, wykonanej także z uwzględnieniem danych materiałowych uzyskanych na drodze doświadczalnej, choć pewne zastrzeżenia budzą niektóre elementy metodyki badań doświadczalnych dotyczące przed wszystkim wykonania próbek.

Podsumowując, recenzowaną rozprawę doktorską mgr. inż. Arkadiusza Buli oceniam bardzo pozytywnie. Doktorant w konsekwentny sposób zrealizował przyjęte cele i zaplanowane zadania rozprawy, wykazując pozytywny wpływ przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń klejowych belek stalowych na zwiększenie nośności analizowanych konstrukcji, a także na precyzyjne modelowanie i określenie mechanizmu zniszczenia wraz ze wskazaniem obszarów uplastycznienia kleju.

Niniejsza rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne, a uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w praktyce, zwłaszcza w kontekście wykorzystania połączeń klejowych elementów stalowych wykonanych klejem metakrylowym w budownictwie.

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Buli p.t.: „Analiza doświadczalno-numeryczna połączeń klejonych w konstrukcjach stalowych” oceniam, że rozprawa ta spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późniejszymi zmianami) w odniesieniu do rozpraw doktorskich. Upoważnia mnie to do przedstawienia wniosku o dopuszczenie Pana mgr. inż. Arkadiusza Buli, po spełnieniu pozostałych wymogów, do publicznej obrony tej rozprawy w Dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport.

Anna Rudawska