

Dr hab. inż. Bogusław Zając, prof. PK
Katedra Geofizyki i Wytrzymałości Materiałów
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Krakowska
bozajac@pk.edu.pl

Kraków, 15 Września 2020r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Analiza doświadczalno-numeryczna połączeń klejonych w konstrukcjach stalowych

Autor rozprawy: mgr inż. Arkadiusz Bula

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Jacek Hulimka, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Kozłowski

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Śląskiej dra hab. inż. Grzegorza Wojnara, prof. PŚ z dnia 14.07.2020
- znak l.dz.RDIT/101/2019/2020

Recenzję opracowano na podstawie dostarczonego manuskryptu dysertacji.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Arkadiusza Buli. Promotorem jest dr hab. inż. Jacek Hulimka, prof. PŚ, promotorem pomocniczym jest dr inż. Marcin Kozłowski. Rozprawa ma charakter doświadczalno - obliczeniowy z modelowaniem, z użyciem programu metody elementów skończonych. Składa się z 6 rozdziałów i liczy 134 strony. Zawiera bibliografię, spis tabel i rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Układ pracy i sposób przedstawienia treści jest logiczny. Praca jest bardzo starannie zredagowana i nie budzi większych zastrzeżeń redakcyjnych, kolorowe rysunki wykonane są starannie, przedstawione w pracy tabele są czytelne, zdjęcia dobrej jakości. W kilku przypadkach można by było zastosować większą i bardziej czytelną czcionkę lub zwiększyć prezentowane wykresy. Zauważone drobne usterki redakcyjne nie mają istotnego znaczenia w całości pracy i są szczegółowo omówione w uwagach krytycznych. Dobór literatury jest odpowiedni. Zestawienie literatury zawiera łącznie 98 pozycji bibliograficznych, w tym 12 norm polskich i zagranicznych. W tekście nie ma do niektórych pozycji odwołania, szczegóły zostały przedstawione w dalszej części recenzji.

Pragnę zachęcić jeszcze Autora do zapoznania się z pracami prof. M. Piekarczyka, a w szczególności z pracą: *"Zastosowanie technologii klejenia w metalowych konstrukcjach budowlanych"*, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. – Kraków, Wydaw. PK, 2013 oraz prof. J. Smardzewskiego: *"Wpływ niejednorodności drewna i spoiny klejowej na rozkład naprężeń stycznych w połączeniach meblowych"*, Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe, Zeszyt 282, Poznań 1998.

3. Układ i treść rozprawy

Rozprawa doktorska złożona jest z 6 rozdziałów zawierających odrębne zagadnienia związane z tematem pracy.

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do badań, charakterystykę połączeń klejonych oraz określenie i zdefiniowanie problematyki pracy. Przedstawiono w nim również cele oraz zakres tematyki rozprawy. Zawiera postawione przez autora trzy tezy, wraz z ograniczeniami przeprowadzonych badań i analiz.

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury, opis wybranych właściwości klejów, możliwe typy zniszczenia połączenia zakładkowego, kryteria podziału klei wraz z ich krótką charakterystyką, wykaz i krótki opis publikacji związanych z badaniami klejów metakrylowych ze szczególnym uwzględnieniem publikacji związanych z klejem Plexus MA 420 wykorzystanym w rozprawie. Przedstawione zostały również zagadnienia związane z możliwościami oraz ograniczeniami analiz numerycznych w odniesieniu do modelowania tego typu połączeń. Opisane zostały również skrótowo kryteria zniszczenia.

Rozdział 3 zawiera opis zakresu badań kleju metakrylowego Plexus MA 420 przeprowadzonych na normowych próbkach wioselkowych przy trzech różnych prędkościach przyrostu przemieszczeń: 1, 10 i 100 mm/min. Wyznaczone zostały podstawowe parametry materiałowe, na podstawie których zaproponowany został uproszczony model ciała liniowo-sprężystego. Przedstawiony został także wpływ czasu na przyrost nośności. Opisane zostały również badania parametrów reologicznych w próbie relaksacji przy 4 wartościach obciążenia. Rozdział zawiera opis prób ścinania i ściskania wybranego kleju oraz przyczepności do różnych podłoży. Po każdym podrozdziale jest zamieszczona analiza numeryczna w programie ABAQUS dotycząca przeprowadzonych badań.

Rozdział 4 zawiera wyniki analiz termicznych przeprowadzonych na próbkach wybranego kleju z zastosowaniem termowizji, różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC oraz analizę dynamiczno-mechaniczno-termiczną DMTA, która pozwala na określenie parametrów reologicznych kleju z uwzględnieniem wpływu m.in. temperatury i częstotliwości obciążeń. Oszacowano zmienność charakterystyki kleju w zależności od temperatury oraz określono długość procesu wiązania.

Rozdział 5 przedstawia założenia do modelu numerycznego kleju metakrylowego oraz walidację wyników analiz numerycznych na podstawie obcych badań modelowych prezentowanych w cytowanej literaturze. Parametry wyznaczone w rozdziale 3 są podstawą założeń modelu materiałowego kleju. Omówiono sposób przyjęcia parametrów dla elementów stalowych. Przedstawiona została geometria połączeń zakładkowych. Przedstawiono schematy badania próbek

dwuteowych bez uszkodzeń wstępnych oraz z uszkodzeniami. Przedstawione zostały też wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na wzmocnionych belkach i wyniki analiz numerycznych oraz wnioski.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wnioski końcowe powiązane z tezami pracy. Autor przedstawia również plan dalszych planowanych badań związanych z połączeniami klejonymi.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Opiniowaną rozprawę doktorską Pana magistra inżyniera Arkadiusza Buli oceniam pozytywnie. Za taką oceną przemawiają poniższe argumenty:

- Temat rozprawy jest dobrany trafnie, ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i bezpośrednie odniesienie do inżynierskiej praktyki projektowej i wykonawczej. Jest to, w moim pojęciu, szczególnie cenne, świadczy bowiem o umiejętności sformułowania przez Autora tematu badawczego powiązanego z rzeczywistymi problemami konstrukcyjnymi.
- Autor wykazał dobrą znajomość poruszanej tematyki, wyrażoną w krytycznym przeglądzie stanu wiedzy. Wnioski z tego przeglądu posłużyły Autorowi do sformułowania tez i zaplanowania badań.
- Program badań i obliczeń został prawidłowo dobrany i umiejętnie zrealizowany. Na szczególne podkreślenie zasługuje tutaj wykonanie szczegółowych badań własnych.
- Wyniki badań i analiz numerycznych zostały przedstawione w sposób szczegółowy, co pozwala na ich wykorzystanie przez innych badaczy.
- Bardzo szczegółowe i zaawansowane badania kleju metakrylanowego.
- Autor wykazał się umiejętnością prawidłowego i logicznego wnioskowania na podstawie uzyskanych wyników badań i analiz.
- Wykazanie dobrej zgodności wyników numerycznych (MES) z wynikami badań laboratoryjnych, a tym samym wiarygodności metod obliczeniowych, oraz przyjętych modeli.
- Wykazanie w sposób praktyczny możliwości naprawy i wzmocnienia konstrukcji stalowych z zastosowaniem kleju metakrylanowego.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi merytoryczne

1. Str. 4: Jak oddziałuje promieniowanie UV na klej pomiędzy warstwami stalowymi?
2. Str. 4: Wyjaśnić; prędkości przyrostu obciążenia czy przemieszczenia w kontekście badań doświadczalnych w odniesieniu do geometrii próbek.

3. Str. 12: Brak w opisie klei epoksydowych wzmianki o ważnym zjawisku, jakim jest przemiana szklista oraz jaki ma wpływ na istotne parametry mechaniczne i zakres temperatury zastosowania.
4. Str. 19: Rys. 9 powinien być poparty cytacją literatury.
5. Str. 25: Wyjaśnić / skomentować: jak odnosi się prędkość przyrostu przemieszczania tłoka prasy 1, 10 i 100 mm/min do normowego odcinka pomiarowego 50 mm (rys. 12a) i zaleceń zawartych w normie?
6. Str. 25: Wyjaśnić / skomentować: typ i parametry prasy hydraulicznej, typy szczęk, czy zastosowane było połączenie przegubowe?
7. Str. 25: Wyjaśnić / skomentować: jakie ekstensometry były zastosowane, podać ich typ i parametry. Jak były zamocowane? Brak zdjęcia z badań.
8. Str. 26: Rys. 12a taki sam jak w pracy [44], brak cytowania.
9. Str. 27: jak w pkt.5.
10. Str. 28: Rys. 14 taki sam jak w pracy [44], brak cytowania.
11. Str. 28-29: Chaotyczny opis. Wyjaśnić / skomentować: ile wynosiła rzeczywista wartość przyrostu przemieszczenia w pracy przy wyznaczaniu współczynnika Poissona?
12. Str. 29: pkt. 3.2.3 analogicznie jak w pkt.5.
13. Str. 30: Czy Autor rozważał badania pełzania, dobór modeli i wyznaczenia parametrów zarówno w przypadku kleju oraz belek?
14. Str. 35: Rys. 20 taki sam jak w pracy [44], brak cytowania.
15. Str. 37: Wyjaśnić / skomentować: czy badanie SLJ dla geometrii z rys. 23 to badanie do wyznaczenia parametrów kleju czy połączenia?
16. Str. 38: Wyjaśnić / skomentować: jakie ekstensometry były zastosowane, podać ich typ i parametry. Jak były zamocowane? Brak zdjęcia z badań. Może autor stosował tensometry, ale to inny typ przyrządu pomiarowego i zestawu rejestrującego nie opisanego w pracy. Jak równocześnie zsynchronizowane były mierzone wielkości? Co Autor obliczył?
17. Str. 38: Wyjaśnić / skomentować: dlaczego Autor nie przeprowadził badania referencyjnego na samych płaskownikach aluminiowych z zestawem czujników (nie zdefiniowanych pkt.7 i pkt.14). W prosty sposób zweryfikowane by zostało stanowisko pomiarowe i aparatura badawcza. Zostałyby wyznaczone rzeczywiste parametry płaskowników niezbędne do obliczeń i modelowania, które można porównać z danymi deklarowanymi przez producenta. Mam duże wątpliwości co do wyników obliczeń zaprezentowanych w tabeli 6 i danych na rys. 24 oraz wyników analizy numerycznej dla tego przypadku.
18. Str. 39-40: Wyjaśnić / skomentować: jak wyznaczono odkształcenie γ połączenia. Zdjęcie rys 7.4b przedstawia szeregowy układ pomiarowy o niezdefiniowanej długości. Tu zastosowanie ekstensometru byłoby bardzo wskazane.
19. Str. 42: Rys. 30 - uwagi z pkt.14 i pkt.16.
20. Str. 43: tabela 6 - uwagi z pkt.14 i pkt.16.
21. Str. 43: Wyjaśnić / skomentować stwierdzenie: *"...że istotny wpływ na rozwój naprężeń w spoinie musiała mieć jej grubość."*
22. Str. 49: Wyjaśnić / skomentować: jakie kryteria zostały zastosowane przy doborze wielkości ściskanej próbki oraz proporcji pomiędzy wysokością i średnicą. Czy ta proporcja ma istotny wpływ na wynik badania? Czy zastosowany został środek poślizgowy pomiędzy próbką a szczękami?
23. Str. 50: Wyjaśnić / skomentować: jak wykonano warstwy kleju o deklarowanej grubości 0,1 mm? Dlaczego nie zastosowano warstwy primera do próbek farby? Czy autor rozważał

- uzyskanie dodatkowych informacji poprzez zastosowanie grubszej warstwy kleju np. 1 mm analogicznej do grubości zastosowanej dla belek opisanych w rozdziale 5 oraz modelowaniu numerycznym? Czy grubość warstwy kleju ma wpływ na badane wielkości i deformację blach?
24. Str. 51-52: Wyjaśnić / skomentować: jakie były kryteria oceny jakości wykonania warstw malarskich: "przeciętnie wykonana / bardzo dobrze wykonana"?
 25. Str. 59-60: Autor wykonał badania termowizyjne dla 5-gramowej próbki kleju w pełni potwierdzając dane i wykres umieszczony w karcie produktu dla próbki 10-gramowej. Dlaczego Autor nie zastosował tej metody podczas wykonywania dużych belek do wzmocnienia? Byłoby to bardzo interesujące i w istotny sposób podniosłoby walor poznawczy zagadnień omawianych w rozprawie i wyjaśniłoby wątpliwości Autora przedstawione na stronach 62-63 w rzeczywistych warunkach.
 26. Str. 63-67: Autor wykonał bardzo dokładne analizy w szerokim zakresie temperatury i częstotliwości istotne z punktu praktycznego zastosowania. W przeprowadzonych obliczeniach Autor ograniczył się do wykorzystania części otrzymanych wyników w temperaturze pokojowej do analizy numerycznej. Czy Autor podejmował próby szerszego wykorzystania wyników do symulacji w innej temperaturze lub wymuszeniach dynamicznych?
 27. Str. 78: W odniesieniu do Stali Domex700 w rozprawie powinny być podane, chociaż skrótowo, dane podstawowe oraz norma PN-EN ISO 6892: 1-2009, według której zostały wyznaczone, zamiast odsyłania czytelnika do publikacji, do której nie każdy zainteresowany ma dostęp.
 28. Str. 79: Wyjaśnić / skomentować: Jak przez Autora definiowane są "tradycyjne tensometry do stali"? Czy Autor miał na myśli typ 1-LY-11-6/120A? [41]
 29. Str. 79: Autor podał: $1,27 \text{ mm/min}$, a w pracy jest $1,27 \text{ mm/s}$ oraz odniesienie do normy ASTM D3528-9, nie cytowanej w tekście rozprawy.
 30. Str.79: Wyjaśnić / skomentować: "*W trakcie badania odkształcenia były badane na dwa sposoby: tradycyjnymi tensometrami do stali, naklejanymi na nakładkę stalową oraz metodą optyczną DIC*". Brak jakiegokolwiek informacji zastosowania metody DIC w pracy [41]. Co Autor rozumie pod pojęciem "tradycyjnego tensometru"? (pkt.27)
 31. Str. 81: Wyjaśnić / skomentować: Brak objaśnień oznaczeń A.1, A.2, A.3, B.1, B.2, B.3, których trzeba szukać w dalszym tekście pracy i domyślać się, co oznaczają oraz analizować pracę [41] w języku angielskim, posiadającą inne oznaczenia dla tych próbek, co do których nie ma do końca pewności czy są właściwe. Dokładny opis, dane i oznaczenia powinny być precyzyjnie przedstawione w rozprawie nie pozostawiając miejsca na jakiegokolwiek wątpliwości.
 32. Str. 82, 83: Tabela 10 oraz tabela 11: Wyjaśnić / skomentować: Skąd Autor zaczerpnął tak precyzyjne dane przemieszczeń, odchylenia standartowego i współczynnika zmienności, aby dokonać porównania z wynikami analiz własnych? Nie ma tych informacji w cytowanej pracy [41].
 33. Str.84 Wyjaśnić / skomentować: "*Optyczne odczyty odkształceń wykonywane podczas badań laboratoryjnych pozwalały na analizę widocznych powierzchni zewnętrznych. Ze względu na dużą zbieżność wyników laboratoryjnych i analiz numerycznych, zestawiono mapy stref uplastycznionych kleju oraz przyczepności między klejem a płaskownikami 90 x 6 mm i 50 x 6 mm, w punktach oznaczonych jako A.1, A.2 i A.3 na rys. 72 oraz B.1, B.2 i B.3 na rys. 74.*" Brak takich informacji w cytowanej pracy [41].
 34. Str. 83-85: Wyjaśnić / skomentować: "*Strefa odkształceń uzyskanych w badaniach [41] dla przemieszczenia 3,42 mm, pokazanych na rys. 75a, pokrywa się z wynikami analiz*

numerycznych rys. 75b. Odkształcenia w nakładkach na odcinku pomiędzy płaskownikami podstawowymi wyniosły od 2,7 do $3,2 \times 10^{-3}$, podczas gdy w obliczeniach numerycznych było to $3,0 \times 10^{-3}$ ". Nie znalazłem wymienionych informacji w pracy [41]. Co Autor porównywał?

35. Str. 85: Wyjaśnić / skomentować: Rys. 75a nie jest prezentowany w cytowanej pracy [41], dodatkowo brak objaśnień w odniesieniu do skali, jakie wielkości przedstawia.

Rys. 75b Brak w opisie kierunku analizowanych odkształceń. Czy występują odkształcenia w innych kierunkach? Brak opisu w języku polskim.

36. Str. 85: Rys.76a nie jest prezentowany w cytowanej pracy [33] ani pracy [41], dodatkowo brak objaśnień w odniesieniu do skali, jakie wielkości przedstawia.

Rys. 76b Brak w opisie kierunku analizowanych odkształceń. Czy występują odkształcenia w innych kierunkach? Brak opisu w języku polskim.

37. Str. 86: Brak opisu w języku polskim.

38. Str. 87: Wyjaśnić / skomentować: Rys. 74 Skąd Autor zaczerpnął dane do rysunku, cytując pracę [41]? W pracy [41] są wprowadzone rysunki Fig.4 i Fig.5 o małej rozdzielczości i prezentowanym zakresie do 40 mm, ale są tylko pogładowe.

39. Str. 87: Wyjaśnić / skomentować: Pkt. 5.2.4. Czego dotyczą przedstawione wnioski?

40. Str. 88: Wyjaśnić / skomentować: Czym Autor kierował się w doborze płaskowników wzmacniających do belek wykonanych z IPE120, a w szczególności dla przypadku B, w którym płaskownik 600x80x6 posiada przekrój poprzeczny istotnie większy od półek? Czy była przeprowadzona analiza wstępna ugięć i rozkłady naprężeń oraz wpływ istotnego wzrostu pola przekroju na możliwe osiągnięcie granicy plastyczności związanego ze zmianą geometrii oraz proporcji nośności pomiędzy półkami a środnikiem?

41. Str. 92: Wyjaśnić / skomentować: Rys. 85 przedstawia znaczne wypłytki kleju. Dlaczego nie dochowano odpowiedniej staranności w trakcie wykonywania belek, krytykowanej przez Autora na stronie 81 oraz Rys. 73 tej rozprawy? Czy ten fakt był uwzględniony w analizie numerycznej i porównawczej?

42. Str. 93: Wyjaśnić / skomentować: "Dwukrotny wzrost wyężenia tych belek nie spowodował relaksacji w połączeniu klejowym..." Porównać z tekstem ze str.108.

43. Str. 96: Wyjaśnić / skomentować: "W zakresie plastycznych odkształceń stali, zależność siła - ugięcie w analizie numerycznej przebiegała równoległe do wyników badań laboratoryjnych, natomiast w analizie numerycznej pokazano..." Analizując zdjęcia z badań, a w szczególności Rys. 78, 83, 85 mam spore wątpliwości. Czy przemieszczenie odczytane z maszyny jest tożsame z ugięciem analizowanych belek? Deformacje plastyczne na Rys. 83 i 85 są znaczne.

44. Str. 97-98-101: Wyjaśnić / skomentować: Rys. 91, 93, 97, 98. Jaką zależność przedstawiają: "siła - ugięcie" czy "siła - przemieszczenie"?

45. Str. 108: Jak definiowany jest: "mały i średni stopień wyężenia spoin"?

46. Str. 121: Brak odwołania w tekście rozprawy do literatury: [91], [93], [94], [95], [96], [97], [98].

Uwagi redakcyjne i formalne

1. Str. VII: Poprawić "temperatur" na "rozważanych wartości temperatury"
2. Str. VIII: Poprawić "temperatur" na "rozważanych wartości temperatury"
3. Str. 4: Zamienić "wielkości" na "wartości"
4. Str. 4: Zamienić "różnych temperaturach" na "rozważanych wartości temperatury"
5. Str. 9: Zamienić "w podwyższonych temperaturach" na "w podwyższonej temperaturze"

6. Str. 13: Zamienić "w niższych temperaturach" na "w niższej temperaturze"
7. Str. 13: Zamienić "w podwyższonych temperaturach" na "w podwyższonej temperaturze"
8. Str. 25: Zamienić "Zbadano też parametry reologiczne..." na "Wyznaczone zostały..."
9. Str. 25: Zamienić "Zbadano też graniczne naprężenia..." na "Wyznaczone zostały..."
10. Str. 37: Rys.35 nieczytelny, opis na mapach naprężeń.
11. Str. 39: Zamienić: "zbadanie" na "wyznaczenie"
12. Str. 98: Poprawić: "GMNA" na "GMNIA"
13. Str. 107: Zamienić: "zbadane" na "wyznaczone"
14. Str. 108: Zamienić: "zbadanie" na "wyznaczenie"
15. Str. 113: Zamienić: "zbadanych" na "analizowanych"

6. Wnioski końcowe

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Arkadiusza Buli w udany sposób przedstawia problem wzmocnienia belek stalowych poprzez doklejanie zewnętrznego wzmocnienia w postaci płaskowników stalowych połączonych z konstrukcją klejem metakrylanowym. Założone w rozprawie cele zostały osiągnięte, a tezy udowodnione. Praca pomimo uwag krytycznych, które przedstawiłem w rozdziale 5 stanowi istotne rozwiązanie postawionego problemu i wnosi wkład w dalszy rozwój dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport, posiada znaczenie dla praktyki inżynierskiej. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną oraz praktycznym przeprowadzeniem analiz numerycznych oraz planowaniem i przeprowadzeniem badań laboratoryjnych.

W związku z powyższym uważam, że przedłożona przez Pana mgra inż. Arkadiusza Buli rozprawa doktorska pt. **"Analiza doświadczalno-numeryczna połączeń klejonych w konstrukcjach stalowych"** spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003r.

Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

