

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Edyty Bernatowskiej

pt. „Nośność graniczna rozciąganych kształowników mocowanych jedną ścianką”

1. Podstawy formalne opracowania recenzji

Podstawą do wykonania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 17 czerwca 2020 roku, zgodnie z którą powołano recenzentów w przedmiotowym przewodzie doktorskim. Pismo z informacją w tej sprawie wystosował w dniu 24 czerwca 2020 r. Przewodniczący ww. Rady Pan Profesor dr hab. inż. Tomasz Siwowski.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Bernatowskiej pt. „Nośność graniczna rozciąganych kształowników mocowanych jedną ścianką”. Praca została opublikowana w formie manuskryptu w Katedrze Konstrukcji Budowlanych na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej w roku 2020. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. uczelni.

Dysertacja liczy 192 strony, składa się z wprowadzenia i 6 rozdziałów zasadniczych, bibliografii zawierającej 103 pozycje literaturowe, załączników oraz streszczeń w j. polskim i angielskim.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje tematykę określenia nośności granicznej jednego z rodzajów śrubowych połączeń zakładkowych, w którym kształowniki łączone są ze sobą jedną ścianką. Przeanalizowano styk rozciągany w postaci kątowników skręcanych z blachami jednym rzędem śrub, rozwiązanie bardzo powszechnie stosowane w metalowych konstrukcjach budowlanych.

Głównym problemem naukowym podjętym w pracy było określenie form zniszczenia rozciąganych kątowników łączonych jednym ramieniem za pomocą śrub oraz oszacowanie nośności granicznej tego typu styków. Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły na weryfikację oraz korektę podawanych w literaturze oraz normach technicznych formuł do szacowania nośności granicznej rozpatrywanych połączeń, co jednocześnie określono jako cel naukowy dysertacji.

We wprowadzeniu, będącym pierwszym rozdziałem rozprawy, scharakteryzowano ogólnie jej przedmiot, tj. śrubowe połączenia zakładkowe stosowane do łączenia elementów konstrukcji stalowych. W zwięzły sposób określono sposoby zniszczenia tego typu styków, w tym zjawisko tzw. *szerokiego pasa* determinujące ich nośność. Pod tym kątem omówiono również szczególny przypadek śrubowych połączeń zakładkowych stosowanych w połączeniach kątowników mocowanych jednym ramieniem, będący przedmiotem dysertacji.

W rozdziale drugim zawarto przegląd stanu zagadnienia nośności granicznej kształtowników łączonych jedną ścianką. Dokonując przeglądu piśmiennictwa omówiono problematykę nośności rozciąganych kształtowników walcowanych, profilowanych na zimno jak również kształtowników łączonych za pomocą spoin. Szczegółowo przeanalizowano normowe procedury obliczania nośności kształtowników rozciąganych, opierając się na krajowej normie PN-B-03200, eurokodach PN-EN 1993-1 i PN-EN 50341-1, jak również normie amerykańskiej ANSI/AISC 360-10 i kanadyjskiej CAN/CSA S16-01. Na koniec dokonano szczegółowego porównania modeli nośności granicznej przyjętych wg ww. norm.

Problem i zakres pracy przedstawiono w rozdziale trzecim, gdzie postawiono również następujące tezy:

- a) *nierównomierny rozkład naprężeń w osłabionym przekroju poprzecznym rozciąganego kątownika łączonego jednym ramieniem, wpływający na nośność graniczną przekroju netto (tzw. efekt „shear lag”), wynika przede wszystkim z równoczesnego zginania i rozciągania przekroju,*
- b) *wynik mimośrodowego działania wypadkowej obciążenia oraz jego wpływ na efektywność przekroju netto i nośność kształtownika jest najbardziej uzależniony od ułożenia łączników – ich rozstawu w kierunku działającej siły oraz odległości od krawędzi (mierzonej w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia),*
- c) *oprócz zniszczenia rozciąganego kątownika przez rozerwanie przekroju netto pojawiają się inne formy zniszczenia wpływające na jego nośność graniczną.*

W czwartym rozdziale omówiono badania eksperymentalne wykonane przez Autorkę. Opisano w nim program badawczy, analizowane elementy, właściwości mechaniczne materiałów, przebieg badań oraz uzyskane rezultaty. Dokonano analizy i dyskusji uzyskanych wyników, porównując je z rezultatami uzyskanymi na podstawie modeli proponowanych do wyznaczania nośności rozpatrywanych połączeń.

W rozdziale piątym przedstawiono analizy numeryczne, w ramach których modelowano pracę elementów i połączeń badanych podczas eksperymentów. Omówiono zagadnienie modelowania połączeń śrubowych oraz stosowane modele materiałowe. Następnie przedstawiono budowę numerycznego modelu analizowanego połączenia oraz jego walidację.

Kolejny rozdział poświęcono analizom parametrycznym, w których przeanalizowano wpływ szerokiego spektrum czynników (parametrów) na nośność przedmiotowych połączeń.

Ostatni rozdział to podsumowanie uzyskanych wyników, gdzie rozpatrzono kątowniki łączone na jedną lub więcej śrub, jak również podano uwagi końcowe. Przedstawiono propozycję modeli analitycznych i wzorów empirycznych służących do obliczania nośności rozciąganych kątowników mocowanych jednym ramieniem.

Na koniec zestawiono wykorzystaną w pracy bibliografię, załączniki, jak również zamieszczono streszczenia pracy w j. polskim i angielskim.

4. Ocena trafności wyboru tematyki

Analizując stosowane rozwiązania połączeń kształowników mocowanych jedną ścianką, można by stwierdzić, że są one na tyle nieskomplikowane, że dokładny opis ich zachowania podczas rozciągania nie stanowi większego problemu naukowego. Wydaje się, że kwestia określenia w takim przypadku nośności jest na tyle trywialna, że niewarta dalszego i pogłębionego zbadania. Jednakże mechanizmy zniszczenia determinujące dokładne określenie nośności tego typu styków wcale nie są do końca jasne, oczywiście i możliwe do przewidzenia w prosty sposób. Tym samym w wielu, niekoniecznie specyficznych, rodzajach styków stosowanych w praktyce konieczne jest dokładne określenie ich nośności tak, aby zapewnić wymagany stopień bezpieczeństwa, a jednocześnie zbytnio ich nie przewymiarować.

Choć normy techniczne podają metodologię i odpowiednie procedury obliczeniowe pozwalające na obliczanie nośności styków śrubowych rozciąganych kształowników mocowanych jedną ścianką, to zauważa się pewne rozbieżności porównując poszczególne podejścia i modele. Jak wykazano w pracy, w pewnych przypadkach skutkuje to zauważalnymi różnicami nośności połączeń obliczanych wg różnych norm.

Zakładkowe połączenia śrubowe kształowników łączonych jedną ścianką są często stosowane w wielu typach konstrukcji metalowych, dlatego z tego choćby powodu pełna wiedza o ich pracy jest istotna zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Jak wspomniano powyżej, kluczowe jest tu określenie mechanizmów zniszczenia.

Uwzględniając powyższe należy stwierdzić, że tematyka podjęta przez mgr inż. Edytę Bernatowską w dysertacji jest zagadnieniem istotnym i wymagającym przeprowadzenia pogłębionej analizy. Należy bardzo pozytywnie ocenić trafność i ważkość problematyki podjętej w pracy, tj. określenia nośności granicznej rozciąganych kształowników mocowanych jedną ścianką. Dotyczy to zarówno zagadnień ściśle naukowych (określenie form zniszczenia i modeli analitycznych) jak i praktycznych (wytyczne, metodologia oraz wzory empiryczne pozwalające na szacowania nośności tego typu połączeń).

5. Ocena merytoryczna pracy

Opiniując merytorycznie przedmiotową pracę należy przede wszystkim zacząć od bardzo pozytywnej oceny rozpoznania literatury przedmiotowej, jakim wykazała się mgr inż. Edyta Bernatowska przystępując do określenia zakresu i celu badań, jak również postawienia określonych tez. Przenalizowała ona z jednej strony samo zagadnienie rozciąganych kształowników łączonych jedną ścianką, jak również problem dokładnego wyznaczenia ich nośności granicznej. Oparto się tutaj na literaturze naukowej oraz normach krajowych i zagranicznych. Przytoczone informacje literaturowe w tym zakresie są obszerne i traktują przedmiotowe zagadnienie w sposób kompleksowy i wyczerpujący. Bardzo istotna jest tutaj analiza porównawcza nośności połączeń określanych wg różnych modeli i norm, która pozwoliła na zidentyfikowanie samego problemu szacowania nośności, jak i konieczności zbadania zjawisk zachodzących podczas ich pracy. Kluczowe w tym zakresie jest określenie mechanizmu lub mechanizmów zniszczenia, które determinują nośność rozciąganych kształowników łączonych za pomocą śrub jedną ścianką. Na tle przedstawionego aktualnego stanu wiedzy oraz różnic w nośnościach określanych zgodnie z różnymi modelami jasno zarysowuje się konieczność poszerzenia badań właśnie w zakresie określonym w pracy.

W konsekwencji Autorka dokonała wyboru konkretnych przypadków wymagających przeanalizowania, gdzie różnice określonych nośności były największe, co należy ocenić bardzo pozytywnie. Zakres prac obejmował badania trzech grup elementów badawczych, tj. płaskowników z otworami wierconymi (GB1), kątowników łączonych jedną śrubą (GB2)

i kątowników łączonych większą liczbą śrub (GB3). W badaniach analizowano elementy ze stali S275 i S355. Należy tu zaznaczyć, że stal typu S355 jest jedną z najpowszechniej stosowanych w konstrukcjach metalowych. Tak dobrane spektrum elementów badawczych pozwoliło na rozszerzenie stanu przedmiotowej wiedzy na połączenia stosowane w praktyce, co ma bardzo istotny walor aplikacyjny.

Zasadnicza część prac wykonanych przez Autorkę obejmowała badania eksperymentalne, obliczenia numeryczne i analizę parametryczną połączeń. Takie kompleksowe podejście pozwoliło na dogłębne potraktowanie tematu oraz uzyskanie szeregu istotnych i interesujących wyników, które zostały poddane walidacji i weryfikacji.

Badania eksperymentalne obejmowały próby statyczne rozciągania płaskowników z otworami i modeli połączeń z kątowników łączonych śrubami z płaskownikami. Program badań został zaplanowany w sposób poprawny i przemyślany. Liczba elementów i próbek w poszczególnych grupach była znaczna, bo dla elementów grupy GB1 przyjęto liczebność na poziomie 10 elementów, w grupie GB2 było to 24 elementy, a w grupie GB3 18 elementów. Pozwoliło to na zbadanie zachowania się zróżnicowanych połączeń, a tym samym uzyskanie wyników dla szerokiego zakresu typów elementów o różnej geometrii i ilości łączników. Część eksperymentalna obejmowała badania połączeń elementów w skali naturalnej, co pozwoliło na uzyskanie wyników, których nie należało podawać żadnej obróbce z uwagi na brak efektu skali. Jest to istotne z naukowego, ale także praktycznego punktu widzenia, gdyż w bezpośredni sposób pozwala na analizę nośności konkretnych rodzajów połączeń stosowanych w rzeczywistości bez konieczności ich przeliczania. Uzyskane w opisanych powyżej badaniach wyniki zostały poddane obszernej i szczegółowej analizie, która z jednej strony pozwoliła na zbadanie ścieżek równowagi w relacji siła-przemieszczenie dla pełnego zakresu pracy połączeń, od obciążenia aż do ich całkowitego zniszczenia, jak również wyznaczenia nośności granicznej w sposób bezpośredni.

Należy tutaj bardzo wysoko ocenić warsztat naukowo-badawczy mgr inż. Edyty Bernatowskiej, która realizując obszerny zakres eksperymentów zakończonych analizą uzyskanych wyników w przemyślany, metodyczny i kompleksowy sposób potraktowała określony w pracy problem badawczy. Dzięki takiemu podejściu udało się z jednej strony zbadać w szerokim zakresie pracę statyczną analizowanych elementów, określić ich nośność graniczną, ale także porównać i zweryfikować uzyskane rezultaty.

Jest to o tyle istotne, że w pewnych przypadkach nie do końca udało się określić eksperymentalnie zachodzące procesy i mechanizmy zniszczenia analizowanych połączeń, co określiło konieczność poszukiwania i zastosowania innych metod. W tym celu Autorka przeprowadziła szereg zaawansowanych symulacji numerycznych.

Dopiero one rzuciły nowe światło na zagadnienie nośności kształtowników łączonych jedną ścianką, a dokładniej zachodzące podczas ich rozciągania mechanizmy zniszczenia. W tym zakresie mgr inż. Edyta Bernatowska przeprowadziła symulacje numeryczne i walidację połączeń modelowych, co pozwoliło na opracowanie metodyki prowadzenia obliczeń numerycznych przedmiotowych połączeń, niezbędnej do wykonania analizy parametrycznej przedstawionej w dalszej części pracy. Najistotniejsze jest tutaj zastosowanie zaawansowanych metod modelowania procesu niszczenia elementów i materiałów opartych na mechanice zniszczenia. W tym celu zastosowano model materiału porowatego Gursona-Tvergaarda-Needlemana (model GTN), który umożliwia modelowanie procesów jakie zachodzą na poziomie mikrostruktury w czasie deformacji materiału. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie symulacji w pełnym zakresie pracy materiału, od obciążenia aż do jego dekohezji. Pozwoliło to na analizę zmian pól naprężeń i odkształceń, jak i deformacji analizowanych elementów połączeń w sposób ciągły w czasie. Dzięki przeprowadzonym symulacjom określono w szerszym stopniu procesy, mechanizmy i formy zniszczenia połączeń decydujące w największym stopniu o ich

nośności. Dotyczy to zidentyfikowanych form zniszczenia typu rozerwanie blokowe, rozerwanie przekroju osłabionego i forma mieszana.

Ostatnią częścią przeprowadzonych prac była analiza parametryczna. To bardzo istotna część rozprawy, o wysokim walorze naukowym, który w opinii Recenzenta jest równie istotny co walor praktyczny. Określono w niej wpływ szeregu czynników, które determinują nośność połączeń rozciąganych kątowników łączonych jedną ścianką. W efekcie zidentyfikowano najistotniejsze z nich, tj. długość połączenia, odległość osi śruby od krawędzi kątownika w kierunku prostopadłym do działającej siły e_2 , ułożenie kątowników nierównoramiennych oraz parametry mechaniczne materiału.

Podsumowaniem prac jest zestawienie wszystkich uzyskanych wyników, gdzie Autorka syntetyzuje i grupuje rezultaty osobno w odniesieniu do elementów łączonych na jedną i więcej niż jedną śrubę. Głównym celem była tu analiza nośności połączeń w odniesieniu do procedur normowych oraz autorska, oryginalna propozycja korekt wzorów do wyznaczania nośności w postaci:

a) elementy łączone na więcej niż jedną śrubę:

$$N_{ult,Rd} = \min \left\{ \frac{0,75A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}; \frac{A_{nt} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{A_{nv} \cdot f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} \right\} \quad (7.2)$$

b) elementy łączone na jedną śrubę:

$$N_{ult,Rd} = 2,0(e_2 - 0,5d_0) \cdot t \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad (7.3)$$

Analizując powyższe propozycje wydaje się, że dość dobrze odwzorowują one pracę analizowanych połączeń, a w szczególności uwzględniają formy zniszczenia determinujące nośność graniczną, które zostały zidentyfikowane w badaniach przeprowadzonych przez Autorkę. W porównaniu do niektórych normatywów formuły te dają również lepsze jakościowo wyniki, które w większym stopniu są zbliżone do rezultatów określonych eksperymentalnie i numerycznie. Tym samym można stwierdzić, że propozycje nośności opisane zależnościami 7.2 i 7.3 zostały pozytywnie zweryfikowane podczas badań.

Podsumowując, należy wysoko ocenić kompetencje mgr inż. Edyty Bernatowskiej w zakresie prowadzenia prac naukowo-badawczych. Dała ona wyraz temu w trakcie przygotowywania recenzowanej rozprawy doktorskiej, gdzie wykazała się dużą samodzielnością w realizacji badań oraz rozwiązywaniu problemów naukowych.

Głównym osiągnięciem recenzowanej rozprawy jest rozwiązanie postawionego w niej problemu badawczego, tj. określenie nośności granicznej rozciąganych kształtowników mocowanych jedną ścianką. Jak już zaznaczono wcześniej, problem ten jest istotny z naukowego punktu widzenia, a jego rozwiązanie poszerza stan wiedzy w dziedzinie konstrukcji metalowych, a w szczególności szacowania nośności połączeń śrubowych. Należy również podkreślić, że bardzo ważny jest tutaj inżynierski aspekt przeprowadzonych badań, analiz i uzyskanych w ich wyników, w tym propozycja formuł pozwalających na szacowanie nośności analizowanych połączeń. W tym zakresie należy wysoko ocenić rezultaty uzyskane przez mgr inż. Edytę Bernatowską z uwagi na fakt, że mogą one znaleźć bezpośrednie zastosowanie w praktyce inżynierskiej.

Uwzględniając wyniki przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że główne tezy postawione w pracy zostały udowodnione, choć Autorka mogłaby w dysertacji dokonać w tym zakresie krótkiej dyskusji i podsumowania.

W opinii Recenzenta kilka elementów pracy zasługujące na wysoką ocenę i wyróżnienie. Przede wszystkim należy pochwalić mgr inż. Edytę Bernatowską za próbę dokonania analizy nośności połączeń w szerokim zakresie obejmującym dużą liczbę różnych typów połączeń o zmiennych parametrach. Zostały one umiejętnie dobrane tak, aby sprawdzić

wszystkie możliwe czynniki determinujące nośność badanych styków. Pozwoliło to na uzyskanie rezultatów, które można odnieść do połączeń niejako uniwersalnych, modelowych, które nie są ograniczone np. geometrią czy ilością łączników. Następnym walorem pracy to podejście kompleksowe, gdzie punktem wyjścia była obszerna analiza literatury przedmiotowej, na podstawie której określono cel i zakres badań. Same badania eksperymentalne również zasługują na wysoką ocenę, bo przeprowadzono je dogłębnie, tak aby uzyskać maksimum rezultatów niezbędnych do osiągnięcia zakładanego w pracy celu naukowego. Kompleksowe podejście obejmowało również zaawansowaną analizę numeryczną, gdzie w oparciu o metody mechaniki zniszczenia symulowano zachowanie się połączeń w całym zakresie ich pracy statycznej. Było to z jednej strony poszukiwanie brakujących elementów, których nie udało się w pewnych przypadkach uzyskać w badaniach eksperymentalnych, z drugiej strony pozwoliło na przeprowadzenie bardzo szerokiej analizy parametrycznej. W jej wyniki określono czynniki i parametry determinujące nośność graniczną analizowanych połączeń. Należy tu podkreślić bardzo dużą liczbę przedstawionych i przeanalizowanych przez Autorkę danych, co wymagało od niej z jednej strony tytanicznej pracy, ale również szerokiej, interdyscyplinarnej wiedzy, wykraczającej daleko poza analizę choćby ścieżek równowagi zarejestrowanych podczas badań. Finalnie opracowane propozycje korekt wzorów do określenia nośności to element podsumowujący i zamykający w sposób spójny, logiczny a przede wszystkim efektywny całość prac, co zasługuje na docenienie.

Podsumowując, należy bardzo wysoko ocenić uzyskane przez mgr inż. Edytę Bernatowską wyniki badań, które cechują się wysokim walorem poznawczym. Jest to z jednej strony obszerny zbiór danych, które mogą być wykorzystane bezpośrednio, ale także stanowią punkt wyjścia do prowadzenia dalszych prac, których program można by w opinii Recenzenta odwrócić. Mając wiedzę zdobytą podczas przeprowadzonych już analiz należałoby określić pewne modelowe, reprezentatywne połączenia i podjąć próbę dokładnego prześledzenia i opisu mechanizmów ich zniszczenia. Sterując poszczególnymi parametrami można numerycznie określić warunki niezbędne dla wystąpienia konkretnego typu zniszczenia determinującego nośność graniczną. Walidacją tego powinny być tym razem badania eksperymentalne. Wydajnym narzędziem, które mogłoby znaleźć tu zastosowanie jest system optycznej rejestracji i analizy odkształceń (np. typu Aramis), który pozwoliłby na identyfikację zjawisk zachodzących w czasie prób wytrzymałościowych w sposób ciągły. Dzięki takiemu podejściu możliwe byłoby szacowanie nośności granicznej w zależności od parametrów połączenia z uwzględnieniem jego mechaniki zniszczenia.

Odnosząc się do przygotowania recenzowanej pracy pod względem edytorskim należy ocenić ją bardzo wysoko. Przyjęty podział na poszczególne rozdziały jest sensowny i spójny. Ciąg prezentowania treści jest logiczny, prowadząc czytelnika od wprowadzenia, przez omówienie wykonanych badań, symulacji i analiz oraz uzyskanych w nich wyników do podsumowania, gdzie dokonano syntezy całości prac. W szczególności należy pochwalić mgr inż. Edytę Bernatowską za opracowanie dysertacji w sposób bardzo czytelny i przejrzysty, gdyż zamieszczone wzory i ilustracje, a przede wszystkim wykresy i wyniki symulacji numerycznych są zaprezentowane w sposób bardzo przejrzysty i atrakcyjny dla czytelnika. Należy docenić dbałość Autorki o wygląd, formę i czytelność ocenianej pracy.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Pomimo wysokiej oceny ogólnej recenzowanej pracy, analizując szczegółowo poszczególne jej części pod kątem merytorycznym, nasuwa się kilka uwag krytycznych oraz kwestii dyskusyjnych, które zestawiono poniżej.

1. W podsumowaniu badań eksperymentalnych znajdujemy stwierdzenie, że *przeprowadzone badania doświadczalne połączeń kątowników jednoznacznie nie rozstrzygnęły, jakie formy zniszczenia wystąpiły w analizowanych elementach*. Szersze informacje w tym zakresie udało się uzyskać w wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych. Uwzględniając wysoką zgodność form zniszczenia określonych podczas symulacji FEM oraz badań wytrzymałościowych nasuwa się naturalne pytanie, czy mając łączne wyniki można jednoznacznie określić jakie są mechanizmy i formy zniszczenia dla poszczególnych typów połączeń? Jeśli jest to możliwe, to czy można określić warunki determinujące zaistnienie danej formy zniszczenia (rozerwanie blokowe, rozerwanie przekroju osłabionego, czy forma mieszana), a dalej jakie są wartości graniczne kluczowych parametrów, które będą wpływać na sposób niszczenia połączeń?
2. W podsumowaniu w rozdziale 7 brakuje krótkiego i jasnego opisu, w którym prześledzono by poszczególne etapy oraz formy zniszczenia analizowanych połączeń w kontekście tej pracy.
3. W jakim dokładnie celu przeprowadzono badania eksperymentalne połączeń typu D, w których zastosowano podwójne kątowniki? W pracy trudno znaleźć zwięzłą informację na ten temat.
4. We wszystkich grupach badawczych tj. GB1, GB2 i GB3 przyjęto jednostkowe liczby elementów danego typu, tj. liczba próbek w danej grupie była $n = 1$. Z uwagi na fakt, że w pracy prowadzono zarówno analizy jakościowe jak i ilościowe obejmujące analizy statystyczne, należałoby wykazać, że takie podejście jest zasadne i uprawnione, np. na podstawie analizy wyników badań wstępnych.
5. Dlaczego zdecydowano się na zastosowanie stali S275 jako gatunku, który jednak nie jest bardzo często stosowany w budownictwie? Analogiczna uwaga dotyczy gatunku S450, który dodatkowo jest zaliczany do grupy stali wysokiej wytrzymałości.
6. Należy krótko wyjaśnić zasadnicze różnice w wytrzymałościach stali gatunków S275 i S355, które scharakteryzowano w tabeli 4.9. Przykładowo, dla elementów wykonanych ze stali S275 granica plastyczności f_y wynosi od 288 MPa do 325 MPa. Podobne różnice są dla elementów ze stali S355, gdzie $f_y = 362 - 424$ MPa.
7. Dlaczego nie zastosowano modelu GTN do zdefiniowania płaskowników, dla których przyjęto model materiału sprężysto-plastycznego? Przy takim podejściu trzeba być pewnym, że zniszczenie będzie zachodziło jedynie w kątownikach, a płaskowniki będą w relatywnie niewielkim stopniu jedynie odkształcone.
8. Jak można wyjaśnić różnice w sile maksymalnej uzyskane eksperymentalnie i numerycznie podczas analizy wpływu poszczególnych parametrów materiału GTN na zależność siła-wydłużenie, widoczne na krzywych pokazanych na rys. 5.3b?
9. Należałoby doprecyzować i przedstawić graficznie jaki model (modele) materiału sprężysto-plastycznego zastosowano do opisu poszczególnych gatunków stali przyjętych na etapie walidacji materiału, co opisano w rozdziale 5.3.3? Jak wiadomo krzywe σ - ϵ dla stali gatunków S275 i S355 w zakresie płynięcia różnią się zasadniczo.
10. Na rys. 5.4 pokazano porównanie wykresów siła-wydłużenie uzyskanych podczas badań eksperymentalnych i analiz numerycznych. Można tam zauważyć wcześniejszy spadek krzywych symulowanych w porównaniu do krzywych

wyznaczonych eksperymentalnie. Jest to typowy efekt, związany z przyjęciem parametrów modelu GTN determinujących osłabienie materiału (zjawisko *material softening*) i finalnie jego całkowite zniszczenie. W opinii Recenzenta można byłoby przeanalizować i przetestować wyższe wartości krytycznego udziału objętościowego pustek odpowiadającego zniszczeniu materiału f_F , co pozwoliłoby niejako na przesunięcie momentu osłabienia materiału, a tym samym chwili całkowitego jego zniszczenia.

11. Czy w wyniku symulacji numerycznych w pełni potwierdzono mechanizmy zniszczenia obserwowane podczas badań eksperymentalnych dla wszystkich typów połączeń, czy w niektórych przypadkach obserwowano różne jakościowo zachowanie elementów?
12. Abstrahując od analizy wpływu parametrów mechanicznych stali na nośność połączeń nasuwa się pytanie dlaczego zastosowano cztery różne i akurat takie gatunki stali, tj. S235, S275, S355 i S450? Czy nie lepiej było ograniczyć się do gatunków S235 i S355, jako stali z których póki co najczęściej wykonywane są konstrukcje metalowe, w tym analizowane w pracy połączenia? Dodatkowo są to stale różne pod względem parametrów mechanicznych i w pewnym zakresie zachowania.
13. Dlaczego w przywołanej powyżej analizie wpływu parametrów mechanicznych na nośność połączeń opisanej w rozdziale 6.11 pominięto de facto stal gatunku S355, skoro była ona używana do wykonania elementów badanych eksperymentalnie? Jeśli blachy modelowano ze stali S355, a kątowniki z gatunków S235, S275 i S450 to jest tutaj pewna niespójność w podejściu do pożądanego zachowania się poszczególnych elementów. W rozdziale 4.4 podano założenia, na podstawie których przyjęto, że blachy dla grupy trzeciej wykonane zostały ze stali S355, a kształtowniki ze stali S275, tak aby uzyskać mechanizm zniszczenia kątowników przez rozerwanie. Dlaczego więc w analizie parametrycznej rozpatrywano stal S450, skoro jest ona o wiele wytrzymalsza od stali S275 i wyraźnie wytrzymalsza niż S355, a tym samym może dochodzić zarówno do ścinania śrub jak i uplastycznienia blach i kątowników?
14. W jaki dokładnie sposób uzyskano i opisano krzywe naprężenie-odkształcenie stali S235, S275 i S450, które przyjęto podczas analizy parametrycznej w zakresie wpływu materiału na nośność połączeń elementów grupy A8? W szczególności na jakiej podstawie modelowano zakres płynięcia stali S450?
15. W rozdziale 6.4 dotyczącym analizy wpływu stosunku szerokości ramienia przylgowego do jego grubości (b/t), Autorka stwierdza, że wpływ ten na nośność jest znikomy. Należałoby to właściwie doprecyzować, gdyż z danych podanych w tab. 6.1 oraz widocznych na rys. 6.5 wcale to nie wynika. Przykładowo nośność w grupie kątowników od A.9 do A.12 waha się od 56,10 kN do 98,88 kN. Tak duże różnice trudno zakwalifikować jako znikome. Stwierdzenie Autorki jest zasadne, ale w odniesieniu do wskaźnika efektywności U_{eff} , który jest determinantą efektywności połączenia w odniesieniu do jego nośności. W poszczególnych grupach elementów z taką samą liczbą śrub wskaźnik ten jest podobny, z wyłączeniem elementów od A.9 do A.12.
16. W opinii Recenzenta należałoby przedyskutować i ew. sprawdzić wpływ samej grubości (t) ramienia przylgowego analizowanych kątowników w odniesieniu do średnicy otworu śrub z uwagi na wpływ panującego w otoczeniu otworu stanu naprężenia (płaski stan naprężenia, płaski stan naprężenia) w zależności od grubości. Efekt ten wpływa na zjawisko inicjacji, propagacji oraz charakter pęknięcia (kruche, plastyczne), co przekłada się na formę zniszczenia, a dalej odporność na pęknięcie materiału i nośność graniczną elementu.

W pracy zauważono również kilka drobniejszych mankamentów, o charakterze porządkowym i uzupełniającym, które należałoby poprawić.

1. W celu lepszego zaprezentowania tematyki podjętej w pracy dobrze byłoby zamieścić jakieś przykłady uszkodzonych połączeń kształtowników łączonych jedną ścianką.
2. Choć w pracy podano bardzo dużo informacji na temat badanych elementów, to analizując uzyskane rezultaty można mieć pewne wątpliwości co do tego, z jakich dokładnie gatunków stali wykonano poszczególne części analizowanych połączeń. Informacje te podano w opisach poszczególnych grup badawczych na stronach 53-54 oraz w tabeli 4.9, jednakże w opinii Recenzenta w każdej z tabel zestawionych w rozdziale 4.3 powinna być umieszczona dodatkowa kolumna, gdzie określony byłby gatunek stali, analogicznie jak ma to miejsce na przykład w rozdziale 6.11.
3. Brakuje doprecyzowania gatunków poszczególnych stali w zakresie oznaczenia odmian plastyczności oraz ew. stanu ich dostawy.
4. Należy doprecyzować pewne parametry symulacji numerycznych, takie jak choćby czas analizy, a dokładnie prędkość przyrostu odkształcenia (zakres statyczny, quasi-statyczny?), możliwość stosowania niektórych procedur w tym zakresie jak choćby skalowanie masy, czy określić optymalne rozmiary elementów skończonych.
5. Należałoby dokonać krótkiego podsumowania, w którym w jasny sposób odniesiono by się do tez postawionych w pracy.

Przedstawione powyżej uwagi nie wpływają w istotny sposób na wyniki uzyskane w pracy i nie podważają jej zasadniczych osiągnięć, natomiast stanowią kwestie, które należałoby przedyskutować, doprecyzować i ewentualnie poprawić pod kątem przyszłych publikacji.

7. Wniosek końcowy

Dokonując całościowego podsumowania recenzowanej rozprawy należy zacząć od wysokiej oceny jej wartości naukowej. W umiejętny, nowoczesny i kompleksowy sposób rozwiązano w niej oryginalny problem naukowy, obejmujący zagadnienie nośności granicznej rozciąganych kształtowników mocowanych jedną ścianką. Uprawnia to do stwierdzenia, że przedmiotowa dysertacja stanowi bardzo wartościowe opracowanie naukowe. Postawiony w dysertacji cel naukowy został w opinii Recenzenta osiągnięty, a uzyskane wyniki należy ocenić jako istotne i wartościowe. Na podkreślenie zasługuje również praktyczny aspekt przeprowadzonych badań, obliczeń i analiz, z uwagi na fakt, że osiągnięte wyniki i proponowane w pracy procedury posiadają walor jak najbardziej aplikacyjny i mogą w bezpośredni sposób znaleźć zastosowanie inżynierii budowlanej.

Również ocena kompetencji Autorki, którymi wykazała się podczas przygotowywania rozprawy jest wysoka. Dobór tematyki jest trafny, a znajomość literatury przedmiotowej bardzo dobra. W ramach dysertacji mgr inż. Edyta Bernatowska przeprowadziła dobrze przemyślane i zaplanowane badania eksperymentalne, które obejmowały próby wytrzymałościowe połączeń analizowanych elementów w skali pełnowymiarowej oraz określenie właściwości mechanicznych materiałów. Przeprowadziła skomplikowane obliczenia numeryczne, w ramach których modelowała pracę elementów w całym zakresie pracy statycznej, od momentu ich obciążenia, aż do całkowitego zniszczenia. Umożliwiło to identyfikację mechanizmów i form zniszczenia determinujących określenie nośności

granicznej. Mgr inż. Edyta Bernatowska dokonała krytycznej analizy, walidacji modeli numerycznych i weryfikacji uzyskanych wyników, co pozwoliło na ostateczne określenie poszczególnych etapów procesu deformacji i niszczenia badanych połączeń. W wyniku przeprowadzonej analizy parametrycznej zbadała wrażliwość nośności granicznej elementów na zmiany poszczególnych parametrów. Finalnie zaproponowała formuły do szacowania nośności połączeń będących przedmiotem rozprawy. Należy zatem stwierdzić, że Kandydatka wykazała się w pełni umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań i rozwiązywania problemów naukowych, co potwierdza Jej wysokie predyspozycje do prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Bernatowskiej pt. „Nośność graniczna rozciąganych kształtowników mocowanych jedną ścianką” spełnia wymagania ustawowe, określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 roku, Nr 65, poz. 595, wraz z późn. zm.) oraz Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. 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 roku, nr 204, poz. 1200, wraz z późn. zm.). Przedmiotowa praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Kandydatka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport, obejmującą zakres zagadnień wytrzymałościowych elementów konstrukcji stalowych, a także wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uwzględniając wszystko co powyżej, wnioskuję o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Edyty Bernatowskiej do publicznej obrony.

Jednocześnie mając na uwadze wysoką ocenę recenzowanej pracy wnioskuję o jej wyróżnienie.

Paweł Kossakowski