

dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni
Katedra Konstrukcji Inżynierskich
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
e-mail: piwicki@pg.edu.pl

Gdańsk, 09.01.2026

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I TRANSPORTU

Data Wpt. 10-01-2026

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Adama Dybizbańskiego
pt. „Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego
do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 7.10.2025 roku oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport prof. dr. hab. inż. Jacka Pielechy z dnia 8.10.2025 roku. Do pisma została dołączona rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Adama Dybizbańskiego pt. „Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma”, której promotorem jest prof. dr hab. inż. Katarzyna Rzeszut.

2. Ogólna charakterystyka pracy. Tematyka i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy zastosowania jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma. W pracy przedstawiono wyniki badań mających na celu analizę możliwości zwiększenia odporności na deformacje dystorsyjne belek stalowych poprzez odcinkowe zamknięcie przekroju poprzecznego za pomocą naklejanej tkaniny z włókna węglowego CFT (ang. *carbon fibre textile*).

Rozprawa została napisana w języku polskim, liczy 184 strony formatu A4 i składa się ze wstępu i siedmiu numerowanych rozdziałów. Na początku podano wykaz oznaczeń, streszczenia w języku polskim i w języku angielskim.

We wstępie, obejmującym dwie strony, Doktorant uzasadnił potrzebę przeprowadzenia zaplanowanych badań. Szeroko stosowane kształtowniki profilowane na zimno typu sigma, mogą wymagać wzmocnienia w przypadku ich uszkodzenia lub przeciążenia. Tradycyjne metody zwiększenia nośności konstrukcji, wykorzystujące połączenia spawane lub łączniki mechaniczne, powodują osłabienie przekroju poprzecznego elementów i dlatego

alternatywnym i bezpiecznym sposobem wzmacniania może być zastosowanie kompozytów polimerowych z włóknem węglowym.

Rozdział pierwszy, o objętości 31 stron, składa się z pięciu podrozdziałów, w których zostało przedstawione wprowadzenie do tematyki badawczej. Rozdział zawiera przegląd literatury dotyczącej stalowych konstrukcji cienkościennych, teorii belek cienkościennych z naciskiem na zjawisko dystorsji przekroju poprzecznego. Doktorant opisał metody wzmacniania konstrukcji za pomocą kompozytów CFRP (ang. *Carbon Fibre Reinforced Polymers*), ze szczególnym uwzględnieniem aplikacji na elementach stalowych. Przedstawił stosowane modele analityczne połączeń klejonych. Doktorant zwrócił uwagę na fakt, że niewielka liczba publikacji dotyczy wzmacniania cienkościennych, monosymetrycznych elementów stalowych, w szczególności o przekroju typu sigma.

Rozdział drugi składa się z czterech podrozdziałów obejmujących łącznie 10 stron. W rozdziale tym Autor opisał motywację i przedmiot badań. Szczegółowo przedstawił metody badawcze, obejmujące przygotowanie próbek, program badań doświadczalnych oraz założenia przyjęte do analiz numerycznych.

Przeprowadzone analizy miały określić, jaki wpływ ma zaproponowany sposób wzmocnienia na odkształcenia, przemieszczenia, nośność, rozkład naprężeń i mechanizmy zniszczenia belek. Ponadto celem badań było wyznaczenie wartości parametrów wytrzymałościowych wzmocnienia kompozytowego, składającego się z elementu stalowego, kleju i tkaniny z włókna węglowego.

Doktorant sformułował tezę pracy i przedstawił szczegółowy zakres badań doświadczalnych i analiz numerycznych.

W **rozdziale trzecim** (25 stron), składającym się z czterech podrozdziałów, Autor opisał wyniki badań połączeń klejonych, takie jak nośność i postacie zniszczenia. Właściwości mechaniczne stali oraz połączeń klejonych zostały wykorzystane do analiz numerycznych.

Rozdział czwarty (37 stron), składający się z dziewięciu podrozdziałów, poświęcono omówieniu wyników badań laboratoryjnych belek stalowych typu sigma, poddanych czteropunktowemu zginaniu ze szczególnym uwzględnieniem wpływu wzmocnienia na nośność, sztywność, formy zniszczenia i ograniczenie dystorsji. Badano cienkościenne belki stalowe o przekrojach $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ i $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$, ze stali S350GD. Przeanalizowano trzy typy wzmocnienia belek. Szczegółowo opisano schematy statyczne badanych konstrukcji, rozmieszczenie czujników pomiarowych, szczegóły podparcia i obciążenia elementów.

Rozdział piąty o objętości 17 stron, składający się z czterech podrozdziałów, zawiera opis przeprowadzonych analiz teoretycznych i numerycznych z zastosowaniem metody elementów

skończonych (MES), w ramach których opracowano i zweryfikowano modele połączeń klejonych. Wyznaczono parametry materiałowe dla każdego z trzech zaobserwowanych w badaniach laboratoryjnych mechanizmów zniszczenia: kohezyjnego, zerwania tkaniny oraz adhezyjnego. Zbadano podwójne oraz pojedyncze zakładkowe połączenie klejone.

Rozdział szósty (28 stron) został podzielony na pięć podrozdziałów, w których opisano przeprowadzone w pracy analizy numeryczne belek z profili sigma. Przedstawiono porównanie wyników numerycznych i doświadczalnych. Wykonano analizy odkształceń i naprężeń w belkach wzmocnionych oraz referencyjnych. W rozdziale przedyskutowano wyniki badań doświadczalnych i numerycznych w celu oceny efektywności proponowanych typów wzmocnienia. Zidentyfikowano najbardziej korzystny sposób wzmocnienia belek.

Rozdział siódmy (4 strony) zawiera wnioski końcowe, podsumowanie prowadzonych badań oraz ocenę uzyskanych wyników w nawiązaniu do postawionych hipotez badawczych. Doktorant przedstawił kluczowe wnioski potwierdzające tezę rozprawy, wskazał oryginalne osiągnięcia pracy oraz perspektywy dalszych badań.

Pracę uzupełniają spis tablic, ilustracji, wykaz literatury i 1 załącznik liczący 8 stron z wynikami pomiarów geometrii przekroju poprzecznego na długości badanych belek. Praca zawiera 52 wzory, 107 rysunków, 26 tabel oraz 192 pozycji literatury uporządkowanych w kolejności alfabetycznej. Rysunki, tablice i wzory są numerowane w ramach rozdziałów.

4. Ocena rozprawy

Cienkościenne elementy stalowe formowane na zimno (ang. Thin walled, cold-formed steel; TWCFs) znalazły bardzo szerokie zastosowanie w budownictwie. Profile te są stosowane jako drugorzędne elementy nośne, takie jak płatwie czy rygle ścienne, ale również jako główne elementy nośne hal stalowych. Wśród kształtowników profilowanych na zimno popularne są profile typu sigma, które są przedmiotem badań pracy doktorskiej. Głównym celem recenzowanej pracy było określenie skuteczności wzmocnienia realizowanego w postaci naklejanych jednokierunkowych tkanin z włókien węglowych na stalowe cienkościenne belki typu sigma. Tematyka pracy została dobrze dobrana i wpisuje się w aktualny nurt badawczy konstrukcji cienkościennych.

Doktorant rozpoczął pracę od analizy aktualnego stanu wiedzy w zakresie mechaniki belek cienkościennych. Opisał klasyczną teorię Własowa (1961), w której pola przemieszczeń pręta cienkościennego odpowiadają zginaniu i skręcaniu oraz teorię Jonssona (1999), która stanowi rozszerzenie klasycznej teorii Własowa o uwzględnienie postaci dystorsyjnej przekroju pręta. Innowacja Jonssona (1999) polegała na analitycznym zdefiniowaniu i włączeniu do tego zbioru

dotatkowej, postaci dystorsyjnej jako niezależnego pola przemieszczeń. Zdaniem recenzenta w analizie literatury dotyczącej zagadnienia dystorsji przekroju powinno się wspomnieć o pracach Chudzikiewicza (1960)^{1,2} poświęconych teorii prętów cienkościennych z uwzględnieniem odkształcalności przekroju. Były to jedne z pierwszych prac, w których badano deformację przekroju poprzecznego pręta.

Doktorant przedstawił stan wiedzy na temat wzmacniania konstrukcji za pomocą kompozytów CFRP, połączeń klejonych oraz badania połączeń klejonych stal-CFRP, modeli analitycznych oraz modelowania numerycznego połączeń. Opisał pracę połączeń klejonych od strony zjawisk fizykochemicznych. Na podstawie przeglądu literatury wykazał, że potrzebne są dalsze badania w celu lepszego zrozumienia zachowania wzmocnionych prętów cienkościennych w złożonych stanach naprężeń, wynikających z jednoczesnego działania momentu zginającego, sił tnących, skręcania swobodnego i nieswobodnego oraz sił dystorsyjnych. W literaturze przedmiotu brakuje publikacji dotyczących wzmacniania cienkościennych elementów stalowych poprzez przeciwdziałanie dystorsji przekroju. Potrzebne są opracowania wytycznych projektowych i metod postępowania umożliwiających wdrażanie technik wzmacniania elementów stalowych przy użyciu kompozytów CFRP w warunkach rzeczywistych. Autor zwrócił uwagę, że brakuje badań połączeń klejonych tkanin z włókna węglowego ze stalą ocynkowaną. Na tle aktualnego stanu wiedzy Doktorant zaprezentował autorską metodę wzmacniania elementów cienkościennych poprzez odcinkowe zamknięcie przekroju poprzecznego za pomocą naklejanych tkanin z włókna węglowego. Jest to oryginalny element pracy, gdyż dotąd wzmacnianie konstrukcji za pomocą taśm CFRP polegało na tym, że maty przyklejane były wzdłuż belek.

Doktorant sformułował następującą tezę pracy doktorskiej:

„Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego naklejonej w kierunku poprzecznym na ustalonym odcinku w środku rozpiętości cienkościennej belki o przekroju typu sigma jest skuteczną metodą jej wzmacniania.”.

Celem rozprawy było udowodnienie efektywności zaproponowanej metody wzmacniania belek. Szczegółowe zadania badawcze dotyczyły jakościowej oceny wpływu zastosowania tkanin z włókna węglowego na odkształcenia, przemieszczenia, nośność, naprężenia

¹Chudzikiewicz A., Ogólna teoria stateczności prętów cienkościennych z uwzględnieniem odkształcalności przekroju poprzecznego, Część I - Pręty o prostym przekroju poprzecznym, Rozprawy Inżynierskie, T. VIII, 1960, Z. 3, 423-459

²Chudzikiewicz A., Ogólna teoria stateczności prętów cienkościennych z uwzględnieniem odkształcalności przekroju poprzecznego, Część II - Pręty o złożonym przekroju poprzecznym, Rozprawy Inżynierskie, 1960, T. VIII, Z. 4, 805-841

i mechanizmy zniszczenia cienkościennych belek stalowych o przekroju sigma. Wyznaczono również parametry wytrzymałościowe wzmocnienia kompozytowego składającego się z elementu stalowego, kleju i tkaniny.

Do osiągnięcia założonych celów i udowodnienia postawionej tezy Doktorant zaplanował serię badań doświadczalnych oraz symulacje numeryczne.

Autor wykonał badania doświadczalne cech mechanicznych stali S350GD, takich jak granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie lub moduł Younga. Wyniki badań próbek o grubości 2 mm były podobne, natomiast dla próbek z blachy o grubości 2,5mm występowały większe różnice. Zdaniem recenzenta zabrakło komentarza lub próby wyjaśnienia różnic w pomierzonych wynikach i opisu, w jaki sposób przygotowywano próbki do badań?

Drugi etap badań dotyczył połączeń klejonych stali i taśm węglowych. Celem doświadczeń było określenie właściwości mechanicznych połączenia klejonego. Wyznaczono zależność obciążenia od przemieszczeń aż do zniszczenia próbek. Najpierw zbadano próbki o podwójnych klejonych połączeniach zakładkowych (ang. Double Lap Joint (DLJ)) składających się z tkaniny jednokierunkowej z włókna węglowego, ocynkowanej blachy stalowej i warstwy kleju. Elementem oryginalnym była zaproponowana przez Doktoranta próbka do testowania połączeń. Do próbki stalowej podzielonej na pół naklejono obustronnie tkaninę SikaWrap 230 C przy użyciu kleju SikaDur 330. Zaobserwowane zniszczenie połączenia następowało stopniowo wraz z odrywaniem się kolejnych fragmentów tkaniny od powierzchni stali. Wystąpiły różne mechanizmy zniszczenia, takie jak: adhezyjne lub adhezyjne na styku stal/klej, któremu towarzyszyło zniszczenie kohezyjne w warstwie kleju, lub delaminacja włókien wraz z częściowym zniszczeniem adhezyjnym. Wartości maksymalnej, minimalnej siły niszczenia były w przedziale od 6,806 kN do 9,475 kN.

W kolejnym etapie zmodyfikowano próbki badawcze. Zbadano pojedyncze połączeniach zakładkowe (SLJ), gdzie tkanina była naklejana z jednej strony płytek stalowych. Takie próbki odpowiadały planowanej metodzie wzmacniania belek z profili sigma, w której taśmę z włókna naklejano tylko po jednej stronie blachy. Badano połączenia różniące się długością zakładu. We wszystkich badaniach uzyskano duży rozrzut wyników, zarówno pod względem maksymalnej siły niszczącej (nośności), jak i przemieszczenia przy tej sile. Wartości siły granicznej wahały się w szerokim zakresie od ok. 3,5 kN do blisko 8,9 kN (seria A), od 2,40 kN do 7,47 kN (seria B) i od około 3,0 kN do blisko 10,0 kN (seria C). Doktorant uznał, że główną przyczyną różnic w wynikach było występowanie mieszanych mechanizmów zniszczenia – część próbek uległa zniszczeniu adhezyjnemu na styku stal-klej, inne poprzez zerwanie tkaniny, a jeszcze inne w sposób mieszany. Zachowanie połączenia było

zdominowane przez złożone i trudne do kontroli czynniki, takie jak nieuniknione imperfekcje wykonawcze oraz różne mechanizmy zniszczenia. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem grubości kleju, średnia nośność połączenia maleje oraz, że sztywność i wytrzymałość połączenia wzrosły proporcjonalnie do długości zakładu. Zaobserwowany rozrzut wyników powinien być dokładniej wyjaśniony. Jeżeli przyczyną była technologia naklejania wzmocnień, to należałoby ją tak dopracować, aby różnice w nośności poszczególnych próbek były mniejsze. Zadanie badawcze było złożone, ale ostateczne wnioski z badań próbek posłużyły do skutecznego i efektywnego zaprojektowania wzmocnień belek.

Kolejnym etapem programu eksperymentalnego były doświadczenia wytrzymałościowe cienkościennych belek stalowych z profili sigma o przekrojach $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ i $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$ ze stali S350GD obciążane w schemacie czteropunktowego zginania. Badaniom poddano zarówno belki referencyjne, jak i belki wzmocnione w trzech różnych wariantach różniących się długością zakładu z taśmy z włókna węglowego. W czasie realizacji doświadczeń najpierw badano belki z możliwością deplanacji (spaczenia) przekroju na podporach. Potem wprowadzono modyfikację stanowiska badawczego, w której deplanacja na podporach została całkowicie zablokowana. Zdaniem recenzenta modyfikacja podpory powoduje głównie blokadę dystorsji, natomiast deplanacja jest ograniczona poprzez siły tarcia belki o blokujące przekładki drewniane. Jak stwierdzono, że deplanacja została całkowicie zablokowana? Dla żadnej z przedmiotowych belek nie doszło do zniszczenia połączenia klejonego stal tkanina lub tkaniny z włókna węglowego, co świadczy o tym, że wzmocnienie zaprojektowane zostało z uwzględnieniem wniosków z badań połączeń w małej skali.

W przypadku belek $\Sigma 200 \times 70 \times 2$, każdy typ wzmocnienia miał widoczny wpływ na nośność belek oraz na redukcję przemieszczeń. Doktorant stwierdził, że najbardziej obiecującym rozwiązaniem dla belek $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ jest wzmocnienie z zakładem mocowanym do usztywnień krawędziowych. Faktycznie taki sposób wzmocnienia jest najłatwiejszy od strony wykonawczej, ale biorąc pod uwagę rozrzut pomierzonych wyników nośności, powinien być również uzupełniony pewnymi wytycznymi dotyczącymi nośności stosowanych połączeń. W przypadku belek $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$ wszystkie typy wzmocnienia miały minimalny wpływ na redukcję przemieszczeń oraz ich nośność. W badaniach doświadczalnych punkty przyłożenia sił w schemacie czteropunktowego zginania na skutek tarcia podpór trawersy o belkę mogą blokować przemieszczenia poziome prostopadłe do płaszczyzny belki, zwiększając nośność belki na zwichrzenie.

W badaniach laboratoryjnych wykorzystano maszyny wytrzymałościowe INSTRON Satec 300 DX oraz INSTRON 8505, wzmacniacz pomiarowy HBM MGCplus, system ARAMIS

6M, skaner 3D Artec Leo – umożliwiający wykonywanie skanów 3D z dokładnością do 0,1 mm, czujniki LVDT i skaningowy mikroskop elektronowy Tescan VEGA3 o rozdzielczość 3 nm. Zaawansowana aparatura badawcza gwarantowała wysoką precyzję pomiarów.

Przeprowadzone badania laboratoryjne zostały wykorzystane do opracowania i walidacji modeli numerycznych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES). Modelowano zarówno połączenia klejone, jak i całe belki ze wzmocnieniami.

Celem symulacji numerycznych połączeń klejonych było określenie sposobu modelowania wzmocnienia stal-klej-tkanina. Proces ten podzielono na etapy odpowiadające obserwowanym w laboratorium mechanizmom zniszczenia. W pierwszej kolejności opracowano model numeryczny podwójnego połączenia zakładkowego (DLJ). Prace te obejmowały dobór odpowiednich warunków brzegowych i typów elementów skończonych, a także analizę wrażliwości siatki MES. Po sprawdzeniu poprawności modelu określono parametry wytrzymałościowe dla zniszczenia kohezyjnego w warstwie kleju. Następnie opracowano kolejne modele dla pojedynczego połączenia zakładkowego (SLJ). Po ich weryfikacji i walidacji modelu na podstawie badań doświadczalnych określono parametry wytrzymałościowe odpowiadające zniszczeniu adhezyjnemu (na styku stal-klej) oraz zerwaniu tkaniny z włókna węglowego. Do opisu teoretycznego zastosowano model de Bruyne'a i model Volkersena. Symulacje numeryczne połączeń klejonych wykonano w programie Abaqus. Stwierdzono, że zaproponowany model numeryczny połączenia klejonego dobrze opisuje badania laboratoryjne w zakresie naprężeń rozciągających aż do osiągnięcia punktu granicznego. Jednak po przekroczeniu punktu granicznego model ten okazał się niewystarczający i wymagał dalszych poprawek i ulepszeń, których jednak nie zaproponowano. Mankamentem modelu numerycznego było to, że po osiągnięciu punktu granicznego ścieżka równowagi urywa się z powodu braku zbieżności rozwiązania numerycznego. Na podstawie analizy naprężeń ścinających zaobserwowano, że wyniki otrzymane z modelu numerycznego i zmodyfikowanego modelu analitycznego Volkersena są porównywalne. Wnioski te wyciągnięto na podstawie rysunku 5.3. Z analizy krzywych na tym rysunku wynika, że naprężenia wyznaczone za pomocą modelu Volkersena różnią się od wyników z obliczeń MES dla współrzędnej x w zakresie 20-30 mm. Skąd więc wynikają wnioski dotyczące poprawności porównania modeli teoretycznych z analizami numerycznymi?

W symulacjach numeryczne zniszczenia połączeń zakładkowych pojedynczych (SLJ) uzyskano wyniki zgodne z eksperymentem i również niewrażliwe na zagęszczenie siatki.

W kolejnym etapie zbadano pojedyncze połączenie zakładkowe, koncentrując się na modelowaniu zerwania tkaniny. Zastosowano model zniszczenia typu Hashin, który

uwzględnia cztery główne mechanizmy: zerwanie włókien, zmiążdżenie włókien, rozerwanie matrycy i zmiążdżenie matrycy. Wykazano, że model jest wrażliwy na gęstość siatki, szczególnie przy mniejszych jej gęstościach, gdzie inicjacja zniszczenia następowała szybciej, co powodowało trudności w obliczeniach numerycznych.

Druga część analiz numerycznych dotyczyła belek cienkościennych. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych, które wskazały, że najbardziej obiecującym jest wzmocnienie typu 1 (naklejenie tkaniny na zagięciach brzegowych) dla belek o przekroju $\Sigma 200 \times 70 \times 2$, opracowano dwa modele numeryczne: belki referencyjnej (niewzmocnionej) oraz belki wzmocnionej. Wzmocnienia z tkaniny modelowano za pomocą dyskretnych sprężyn o charakterystyce nieliniowej. Sztywność sprężyny K_R obliczono na podstawie wartości przez producenta równaniem $K_R = EA/\Delta L$, a w przypadku ściskania $K_R = 0$ N/mm. Ten uproszczony sposób modelowania kompozytu, choć nie oddaje w pełni złożoności jego pracy, okazał się wystarczający do symulacji głównych efektów wzmocnienia. Nasuwa się pytanie dlaczego w analizach numerycznych belek nie zastosowano modeli opracowanych przy analizie próbek. Ponadto nie podano, jakie były siły w taśmie wzmacniającej.

Odpowiedź mechaniczna belki została wymuszona poprzez zdefiniowanie pionowej siły skupionej skierowanej w dół. Wydaje się, że dokładniejsze byłoby modelowanie obciążenia belki w formie wymuszenia kinematycznego.

W analizach numerycznych MES belek, w celu uwzględnienia niedoskonałości geometrycznych belki, zastosowano równoważną siłę poziomą, która powodowała imperfekcję łukową równą 11,8 mm. Zdaniem recenzenta imperfekcje powinno się zmierzyć za pomocą pomiaru - skanów 3D i niedokładności geometrii implementować tak, aby nie wprowadzać dodatkowych naprężeń.

Warunki brzegowe i obciążenia zostały zdefiniowane w punktach odniesienia (rys. 6.1 i 6.2). Założono, że w punktach referencyjnych $U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}$, a w punkcie przyłożenia obciążenia $U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$. Brakuje więc blokady na kierunku X. Ponadto nie wyjaśniono, jak punkty referencyjne były połączone z belką, a także jak przykładane jest obciążenie pomiędzy punktem w środku trawersy a belką.

Program badawczy obejmował testy laboratoryjne belek stalowych typu sigma o dwóch różnych przekrojach poprzecznych ($\Sigma 200 \times 70 \times 2$ oraz $\Sigma 140 \times 70 \times 2.5$), natomiast analizy numeryczne wykonano tylko dla belek z profilu $\Sigma 200 \times 70 \times 2$. Uzasadniono to faktem, że dla belek $\Sigma 140 \times 70 \times 2.5$ nie odnotowano wpływu wzmocnienia na nośność konstrukcji. Zdaniem recenzenta analiza numeryczna powinna zostać przeprowadzona również dla przypadku profilu $\Sigma 140 \times 70 \times 2.5$, gdyż przy obciążaniu SBLT1.2 uzyskano zwiększenie nośności widoczne na

rysunku 4.22. Dla tej belki trawers pozostał w pozycji pionowej i nie obracał się wraz z pasem górnym belki, jak to było dla pozostałych przypadków serii. Przypadek ten nie został wzięty pod uwagę w trakcie analiz i przy formułowaniu wniosków. Wzmocnienie profili za pomocą taśm z włókien węglowych jest efektywne w przypadku, kiedy przekrój ulega dystorsji w taki sposób, że taśmy są rozciągane czyli półki rozszerzają się do zewnątrz. Jeżeli dystorsja przekroju nie występuje lub półki przemieszczają się do środka (zmniejszając kąt względem środka), to taśmy będą ściskane i wzmocnienie nie będzie skuteczne. Zdaniem recenzenta należało wyjaśnić, dlaczego nie zaobserwowano wzrostu nośności belek $\Sigma 140 \times 70 \times 2.5$. W rzeczywistych obiektach płatwie są obciążane za pomocą połączonej do nich blachy lub płyt warstwowych, co ma wpływ na dystorsję profilu a tym samym efektywność wzmocnienia.

Zgromadzony przez Doktoranta materiał badawczy może posłużyć do dalszych analiz w celu określenia zakresu stosowania zaproponowanej metody.

Doktorant wykazał znaczący, pozytywny wpływ zastosowanego wzmocnienia na ograniczenie zarówno odkształceń całkowitych, odkształceń plastycznych, jak i redukcję naprężeń w analizowanych belkach. Redukcja ta była szczególnie znacząca w środkowej części rozpiętości. Wzmocnienie wpłynęło na zmianę mechanizmu pracy elementu, prowadząc do bardziej równomiernego rozkładu naprężeń oraz efektywnego przeciwdziałania deformacjom dystorsyjnym. Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych można jednoznacznie stwierdzić, że wzmocnienie poprawia nośność belek a tym samym, że założona teza została udowodniona.

Część wyników badań z pracy doktorskiej zostało opublikowanych w czterech artykułach naukowych cytowanych w pracy: Dybizbański & Rzeszut (2023b), Rzeszut & Dybizbański, (2023), Dybizbański & Rzeszut (2023a), Dybizbański i in. (2024) i jednym, który nie był cytowany w pracy doktorskiej (Dybizbański i in., 2025³). Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w nurt badawczy konstrukcji cienkościennych rozwijanych pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Katarzyny Rzeszut na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analiz numerycznych poszerzają wiedzę w zakresie wzmocniania belek z profili typu sigma za pomocą tkanin z włókna węglowego.

³ Dybizbański, M., Katarzyna Rzeszut, K., Pasternak, H., (2025). Experimental investigation on thin-walled steel sigma beams restrained with CFRP textiles, Archives Of Civil Engineering, Vol. LXXI ISSUE 2, 159 –175

Oryginalne osiągnięcia naukowe rozprawy są następujące:

- Opracowanie i weryfikacja metody wzmacniania belek typu sigma z wykorzystaniem tkanin z włókna węglowego, która jest układana w kierunku zmniejszającym dystorsję przekroju.
- Identyfikacja najbardziej efektywnego sposobu wzmacniania belek, którym jest naklejenie tkaniny jedynie na zagięciach brzegowych pól. Sposób ten charakteryzuje się minimalizacją zużycia materiału wzmacniającego i łatwością aplikacji w przypadku istniejących konstrukcji.
- Opis mechaniki kompozytowego połączenia stal-klej-tekstyla dla badanych materiałów.
- Analiza wpływu wzmocnienia na zachowanie statyczne belek typu sigma w zakresie nośności, sztywności, odkształceń, rozkładu naprężeń i mechanizmów zniszczenia.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Adama Dybizbańskiego stanowi rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego i zawiera istotne wartości poznawcze w zakresie zastosowania jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma. Doktorant wykazał się umiejętnością planowania i prowadzenia badań naukowych. Przedstawione w recenzji uwagi dyskusyjne nie obniżają dobrej oceny pracy. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Dybizbańskiego pt. „Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2024, poz. 1571). Rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie: inżynieria lądowa, geodezja i transport. Stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr. inż. Macieja Dybizbańskiego do jej publicznej obrony.



dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni