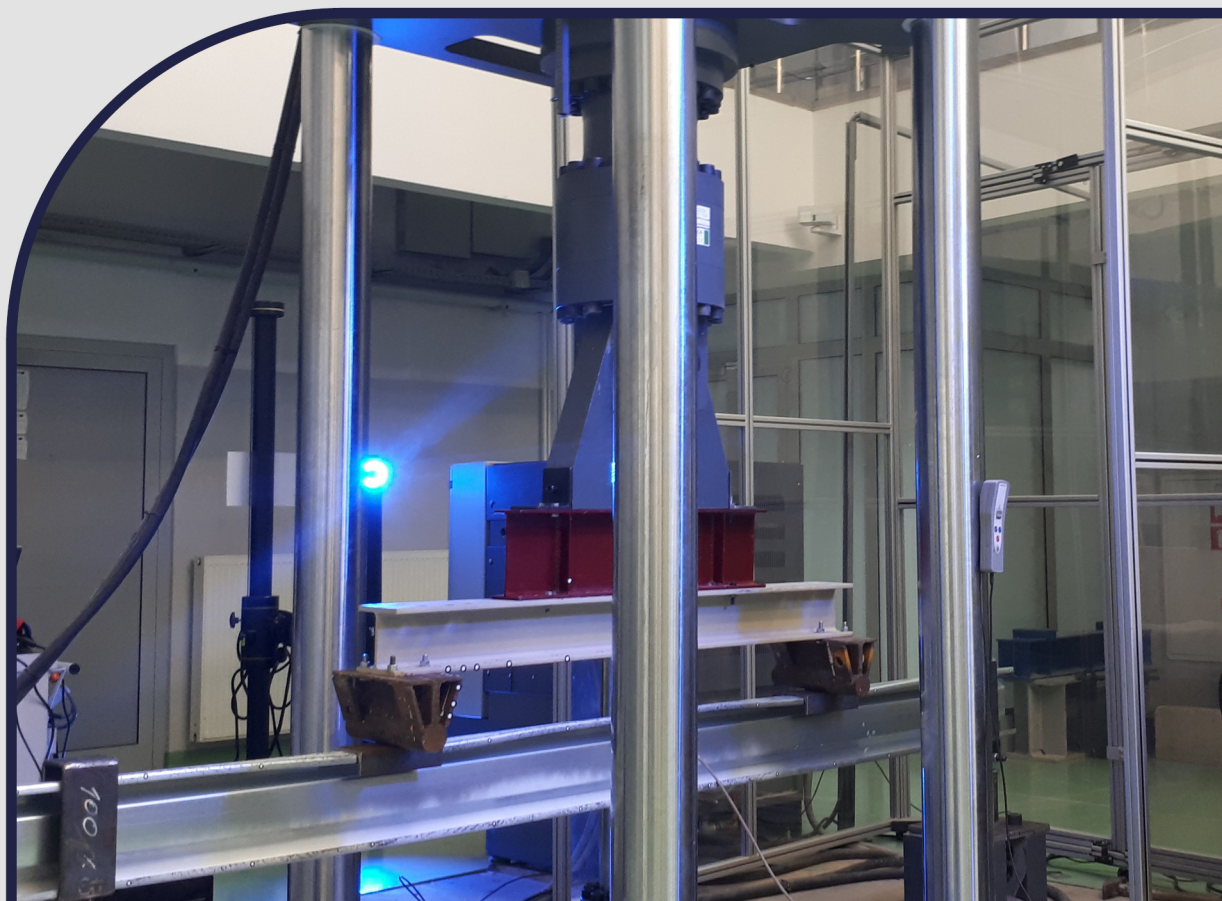
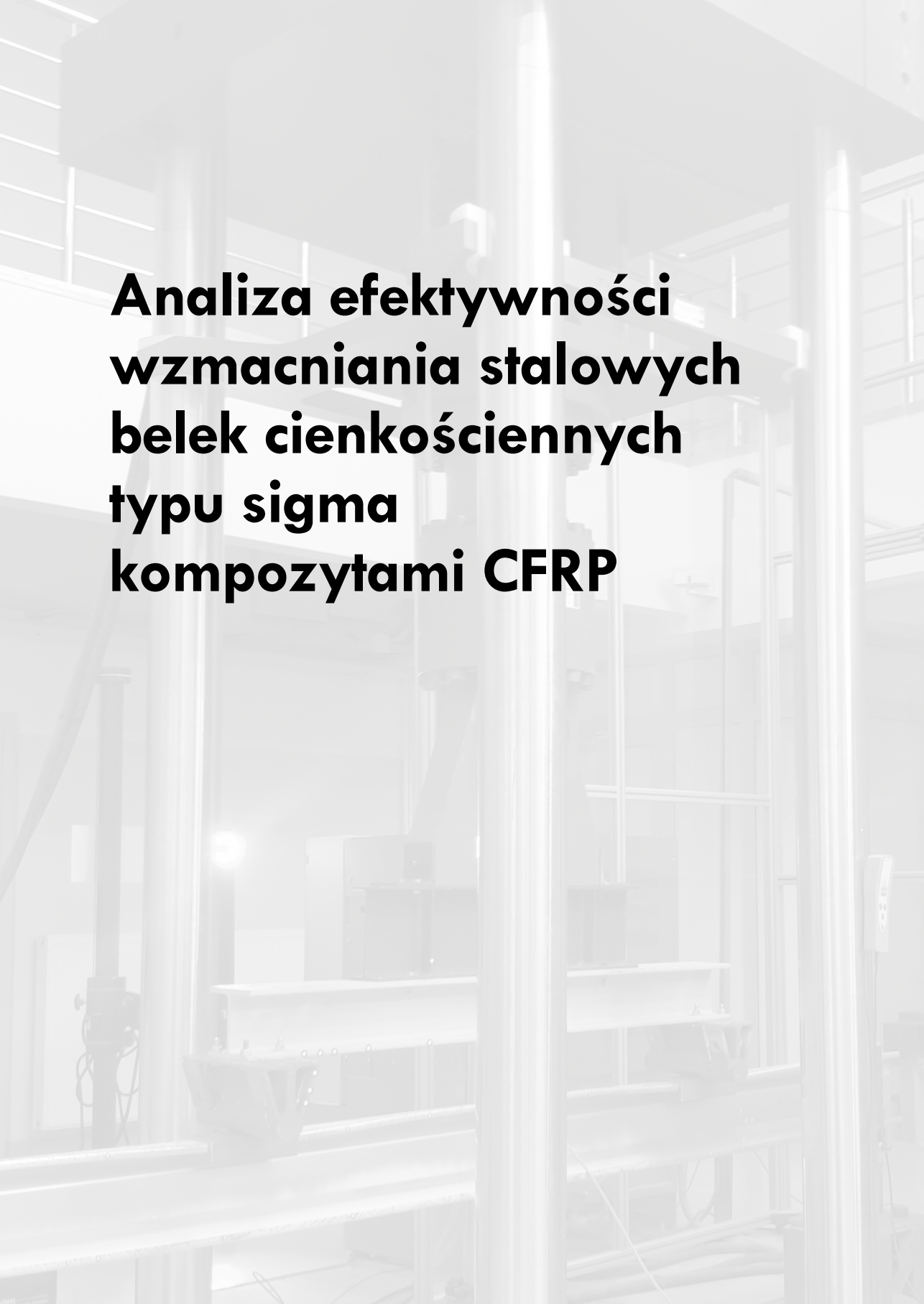


Analiza efektywności wzmacniania stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP

Ilona Szewczak



The background image shows a laboratory setting with a large testing machine. A horizontal steel beam is positioned within the machine's frame. A section of the beam is reinforced with a dark, textured material, likely CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). The machine has vertical support columns and various mechanical components. The text is overlaid on the left side of the image.

Analiza efektywności wzmacniania stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:

Agnieszka RZEPKA

Dyrektor CINT:

Katarzyna WEINPER

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena CHOŁOJCZYK

Karolina FAMULSKA-CIESIELSKA

Jarosław GAJDA

Anna KOŁTUNOWSKA

Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK

Anna STROJEK

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna DUDZIŃSKA

Małgorzata FRANUS

Arkadiusz GOLA

Paweł KARCZMAREK

Beata KOWALSKA

Anna KUCZMASZEWSKA

Jarosław LATALSKI

Tomasz LIPECKI

Zbigniew ŁAGODOWSKI

Joanna PAWŁAT

Lucjan PAWŁOWSKI

Natalia PRZESMYCKA

Magdalena RZEMIENIAK

Mariusz ŚNIADKOWSKI

Przedstawiciele honorowi:

Zhihong CAO, Chiny

Miroslav GEJDOŠ, Słowacja

Karol HENSEL, Słowacja

Hrvoje KOZMAR, Chorwacja

Frantisek KRCMA, Czechy

Sergio Lujan MORA, Hiszpania

Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan

Sirgii PAWŁOW, Ukraina

Natalia SAVINA, Ukraina

Natia SHENGELIA, Gruzja

Daniele ZULLI, Włochy

Analiza efektywności wzmacniania stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP

Ilona Szewczak



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Lublin 2024

RECENZENCI:

dr hab. inż. **Robert Studziński**, prof. PP, Politechnika Poznańska

dr hab. inż. **Artur Piekarczyk**, prof. ITB, Instytut Techniki Budowlanej

AUTOR:

dr inż. **Ilona Szewczak**, ORCID: 0000-0002-4953-0104

Politechnika Lubelska – ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Redaktor prowadzący: Magdalena Chołojczyk

Korekta językowa: Małgorzata Stepuch

Skład i łamanie: Łukasz Maj

Projekt graficzny serii: Łukasz Maj

Autorem wszystkich zdjęć oraz rysunków w monografii jest dr inż. Ilona Szewczak.

Publikacja wydana za zgodą **Rrektora Politechniki Lubelskiej**

ISBN: 978-83-7947-618-3 (wersja drukowana)

ISBN: 978-83-7947-619-0 (wersja elektroniczna)

DOI: 10.35784/9788379476190

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.wpl.pollub.pl
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa
– na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Spis ważniejszych oznaczeń	9
Skróty	10
1. Wprowadzenie	11
1.1. Podstawowe informacje dotyczące stalowych konstrukcji cienkościennych	13
1.1.1. Definicja pręta cienkościennego	13
1.1.2. Zastosowanie stalowych konstrukcji cienkościennych profilowanych na zimno	14
1.1.3. Ogólne informacje o postaciach utraty stateczności stalowych prętów cienkościennych i klasycznych metodach ich analizy	16
1.1.4. Imperfekcje stalowych elementów cienkościennych	18
1.2. Podstawowe informacje dotyczące materiałów kompozytowych	22
2. Wykorzystanie materiałów CFRP do wzmocnień konstrukcji stalowych	27
2.1. Wzmacnianie konstrukcji stalowych przy użyciu CFRP	27
2.2. Badania stalowych konstrukcji cienkościennych	30
2.3. Wzmacnianie stalowych konstrukcji cienkościennych przy użyciu materiałów CFRP	32
2.4. Długość zakotwienia taśm CFRP	36
3. Geneza tematu	39
3.1. Wzmacnianie stalowych profili cienkościennych o przekroju sigma	39
3.2. Cel pracy	41
4. Metody pomiarowe wykorzystywane w badaniach	43
4.1. Nowoczesne i tradycyjne metody pomiarowe – przegląd literatury	43
4.2. Metody wykorzystywane do pomiaru wstępnych imperfekcji geometrycznych	48
4.3. Metody pomiarowe wykorzystane w pracy	48
5. Program badań	55
5.1. Metodyka badań	55
5.1.1. Program badań laboratoryjnych	56
5.1.2. Program badań numerycznych	58
5.1.3. Urządzenia pomiarowe wykorzystane w badaniach laboratoryjnych	59
6. Badania laboratoryjne – część I	61
6.1. Badania materiałowe	61
6.1.1. Badania wytrzymałościowe stali	61
6.1.2. Taśmy CFRP	63
6.1.3. Klej	64
6.2. Badania pilotażowe	64
6.2.1. Stanowisko do badań pilotażowych	65
6.2.2. Przygotowanie próbek do badań	68
6.2.3. Wyniki badań pilotażowych	69
6.2.4. Wnioski	74
7. Badania laboratoryjne – część II	77
7.1. Opis badań właściwych	77
7.1.1. Stanowisko badawcze	78
7.1.2. Przygotowanie próbek do badań	81
7.1.3. Pomiar wstępnych imperfekcji geometrycznych	82

7.2. Pierwszy etap badań	84
7.2.1. Zakres badań	84
7.2.2. Postacie zniszczenia próbek	86
7.2.3. Analiza odkształceń	88
7.2.4. Analiza przemieszczeń	93
7.2.5. Wnioski z pierwszego etapu badań	101
7.3. Drugi etap badań	103
7.3.1. Zakres badań	103
7.3.2. Postacie zniszczenia próbek	104
7.3.3. Analiza odkształceń	105
7.3.4. Analiza przemieszczeń	109
7.3.5. Wnioski z drugiego etapu badań	114
7.4. Porównanie wyników badań z pierwszego i drugiego etapu	116
7.4.1. Odkształcenia	116
7.4.2. Przemieszczenia	118
7.5. Trzeci etap badań	119
7.5.1. Zakres badań	119
7.5.2. Postacie zniszczenia próbek	121
7.5.3. Analiza odkształceń	122
7.5.4. Analiza przemieszczeń	126
7.5.4.1. Przemieszczenia w kierunku pionowym	126
7.5.4.2. Przemieszczenia w kierunku poziomym	129
7.5.5. Wnioski z trzeciego etapu badań	131
8. Analiza numeryczna	135
8.1. Wstęp	135
8.2. Pilotażowe analizy numeryczne	136
8.2.1. Opis modelu numerycznego	136
8.2.2. Zastosowane analizy numeryczne	139
8.2.3. Wpływ warunków brzegowych i rodzaju elementu skończonego	139
8.2.4. Wpływ rozmiaru siatki w modelu numerycznym	142
8.3. Model numeryczny do pierwszego etapu badań	145
8.3.1. Wyniki analiz numerycznych – odkształcenia	147
8.3.2. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia	151
8.3.3. Wnioski	156
8.4. Analiza wpływu długości zakotwienia taśm CFRP	157
8.5. Model numeryczny – drugi etap badań	159
8.5.1. Wyniki analiz numerycznych – odkształcenia	160
8.5.2. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia	163
8.5.3. Wnioski	167
8.6. Model numeryczny – trzeci etap badań	167
8.6.1. Wyniki analiz numerycznych – odkształcenia	168
8.6.2. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia	170
8.6.3. Wnioski	171
9. Podsumowanie i wnioski	173
9.1. Uwagi i wnioski dotyczące metod pomiarowych	174
9.2. Uwagi końcowe	175
9.3. Kierunki dalszych badań	177
Literatura	179

Analiza efektywności wzmacniania stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP

W niniejszej pracy przedstawiono analizę efektywności wzmacniania stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP, opartą na wynikach badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych. Omówiono proces przygotowania i prowadzenia badań laboratoryjnych, obejmujących stalowe belki cienkościenne typu sigma o dwóch różnych wysokościach przekroju, oraz sposób opracowania modeli numerycznych w programie Abaqus. Wyniki badań laboratoryjnych porównano z wynikami badań numerycznych. Dodatkowo zakres badań laboratoryjnych rozszerzono o analizę efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych typu sigma taśmami stalowymi, a badania numeryczne wzbogacono o analizę efektywnej długości zakotwienia taśm CFRP.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów. Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie, w którym przedstawiono podstawowe informacje dotyczące stalowych elementów cienkościennych profilowanych na zimno, tj. definicję, zakres zastosowania oraz wybrane zagadnienia dotyczące ich analizy. Ponadto omówiono podstawowe kwestie dotyczące materiałów kompozytowych CFRP, podkreślając zalety i wady wykorzystania ich do wzmacniania konstrukcji stalowych.

Rozdział drugi stanowi przegląd literatury w zakresie aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie badań stalowych elementów cienkościennych oraz wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych taśmami CFRP. Przedstawiono w nim także opublikowane badania naukowe dotyczące wpływu długości zakotwienia taśm CFRP na nośność wzmocnionych belek.

W rozdziale trzecim opisano genezę tematu pracy, omawiając przyczyny, dla których podjęto tematykę badań związaną ze wzmacnianiem stalowych belek cienkościennych typu sigma taśmami CFRP.

W rozdziale czwartym zamieszczono przegląd literatury dotyczący nowoczesnych i tradycyjnych metod pomiarowych wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych. Ponadto zwrócono uwagę na metody pomiaru wstępnych imperfekcji geometrycznych elementów stalowych i opisano metody pomiarowe wykorzystane w niniejszej pracy.

Rozdział piąty zawiera program badań. Na schematach blokowych przedstawiono kolejne czynności i metody dotyczące sposobów wykonywania badań naukowych (laboratoryjnych i numerycznych), które autorka zaplanowała w celu uzyskania odpowiedzi na postawione w pracy pytania.

W rozdziale szóstym opisano pierwszą część badań laboratoryjnych, na którą składają się badania materiałowe oraz badania pilotażowe. Opisano sposób przygotowania próbek do badań, przebieg badań oraz omówiono uzyskane wyniki.

Rozdział siódmy zawiera opis drugiej części autorskich badań laboratoryjnych, składających się z trzech etapów. Opisano w nim zakres badań, sposób przygotowania próbek, model stanowiska badawczego, a także przedstawiono wyniki badań i sformułowano wnioski. W rozdziale ósmym scharakteryzowano modele numeryczne analizowanych belek. Ponadto przedstawiono w niej rezultaty symulacji komputerowych oraz porównano wyniki badań doświadczalnych i analiz numerycznych.

Rozdział dziewiąty stanowi podsumowanie pracy. Przedstawiono w nim wnioski wynikające z przeprowadzonych badań laboratoryjnych i numerycznych oraz omówiono kierunki dalszych badań. Na końcu zamieszczono zestawienie pozycji literaturowych przywołanych w pracy.

Słowa kluczowe: pręty cienkościenne, konstrukcje stalowe, CFRP, wzmacnianie

Analysis of the efficiency of strengthening thin-walled sigma-type steel beams by CFRP composites

In this dissertation an analysis of the reinforcement efficiency of sigma thin-walled cold-rolled steel beams using CFRP tapes was performed. In addition, the process of preparing and conducting laboratory tests including steel thin-walled sigma beams with two different cross-section heights, and the method of developing numerical models in the Abaqus program was presented. The results of laboratory tests were compared with the results of numerical tests. Moreover, the scope of laboratory tests was expanded through the analysis of the efficiency of strengthening sigma steel thin-walled beams using steel tapes, and the numerical tests were enriched by the analysis of the effective length of anchoring CFRP tapes.

The dissertation consists of nine chapters. The first chapter contains an introduction, which presents basic information about cold-formed steel thin-walled elements, i.e. definition, scope of their application and selected issues concerning analysis of such elements. In addition, basic information on CFRP composite materials was discussed, highlighting the advantages and disadvantages of using them to reinforce steel structures.

The second chapter provides an overview of the literature concerning the current state of knowledge in the field of testing thin-walled steel elements and strengthening them using CFRP tapes.

The third chapter describes the genesis of the topic of the thesis, discussing the reasons for which research related to the reinforcement of sigma thin-walled steel beams with CFRP tapes were undertaken.

The fourth chapter contains an overview of the literature concerning modern and traditional methods of measurement used in the laboratory tests. Particular attention was paid to methods for measuring of initial geometrical imperfections of steel elements and the measurement methods used in this work were described.

The fifth chapter presents the research program. The block charts show the subsequent actions and methods related to scientific research (laboratory test and numerical analysis), which the author planned in order to prove the theses stated in the dissertation.

Chapter six describes the first part of the laboratory tests, which consists of material coupon tests and full scale pilot tests. The method of preparing samples for tests, the scope of tests and the obtained results were described.

Chapter seven contains a description of the second part of the full scale laboratory tests, consisting of three stages. It describes the scope of research, method of sample preparation, model of the test stand, as well as the results of research.

In the chapter eight, numerical models referring to the tested beams are characterized. In addition, the results of numerical simulations were presented and the results of experimental tests and numerical analyses were compared.

Chapter nine summarizes the publication. It presents the conclusions resulting from laboratory and numerical analyses, and discusses the directions of further research. At the end there is a list of literature references cited in the paper.

Keywords: thin-walled profiles, steel structures, CFRP, strengthening

Spis ważniejszych oznaczeń

ε_i	– odkształcenie danej belki
ε_{ref}	– średnia arytmetyczna z wartości odkształceń dwóch belek referencyjnych
λ	– mnożnik obciążenia
ν	– współczynnik Poissona
ρ_{ei}	– ograniczenie lub przyrost odkształceń danej próbki wyrażony w procentach
ρ_{ui}	– ograniczenie lub przyrost przemieszczeń danej próbki wyrażony w procentach
e_{yy}	– współrzędna środka ciężkości przekroju względem osi y
e_{zz}	– współrzędna środka ciężkości przekroju względem osi z
f_y	– granica plastyczności stali
f_u	– wytrzymałość na rozciąganie
i_y	– promień bezwładności przekroju względem osi y
i_z	– promień bezwładności przekroju względem osi z
s	– odchylenie standardowe
u_i	– przemieszczenie danej belki
u_{ref}	– przemieszczenie belki referencyjnej
A_0	– początkowe pole przekroju
E	– moduł Younga
FA	– pole przekroju
J_y	– moment bezwładności względem osi y
J_z	– moment bezwładności względem osi z
L_{CFRP}	– długość taśmy CFRP
L_p	– rozstaw podpór
L_z	– efektywna długość zakotwienia taśmy CFRP
W_y	– wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi y

- W_z – wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi z
- K^O – macierz sztywności liniowej
- K^G – początkowa macierz geometryczna
- K^U – macierz sztywności przemieszczeniowej
- ΔP – przyrost wektora obciążenia zewnętrznego
- U – wektor własny, reprezentuje kształt postaci wyboczenia
- ΔU – przyrost wektora przemieszczenia

Skróty

- FRP – materiał kompozytowy wykonany z polimerowej matrycy wzmocnionej włóknami
(ang. *fiber reinforcement polymers/plastics*)
- CFRP – kompozyt polimerowy z włóknami węglowymi
(ang. *carbon fiber reinforced polymer*)
- GFRP – kompozyt polimerowy z włóknami szklanymi
(ang. *glass fiber reinforced polymer*)
- AFRP – kompozyt polimerowy z włóknami
(ang. *aramid fiber reinforced polymer*)
- MES – Metoda Elementów Skończonych
- LSB – belki ze stali lekkiej (ang. *lightweight steel beam*)
- DIC – cyfrowa korelacja obrazu (ang. *digital image correlation*)
- ICS – optyczny system korelacji obrazu
(ang. *image correlation system*)
- DLT – metoda bezpośredniej transformacji liniowej
(ang. *direct linear transformation*)

Wprowadzenie

W odpowiedzi na potrzeby rynku budowlanego i wymagania inwestorów, projektanci konstrukcji stalowych nieustannie dążą do projektowania konstrukcji bezpiecznych i zarazem ekonomicznych. Wiąże się to z ograniczeniem masy konstrukcji i umożliwieniem szybkiego jej montażu przy równoczesnym spełnieniu wymaganych warunków nośności i użytkowości. Realizacja powyższych wymagań możliwa jest m.in. poprzez zastosowanie lekkich konstrukcji stalowych kształtowanych na zimno z blach stalowych lub aluminiowych. Kształtowanie głównych elementów nośnych konstrukcji budowlanych z kształtowników profilowanych na zimno pozwala nie tylko spełnić wymagania nośności, trwałości, niezawodności, estetyki i funkcjonalności, ale również wymagania związane z ideą budownictwa zrównoważonego, w ramach strategii zrównoważonego wzrostu gospodarczego, przy odpowiedzialnej konsumpcji i produkcji uwzględniającej wpływ budownictwa na zmiany klimatu. Należy podkreślić, że stosowanie konstrukcji z kształtowników profilowanych na zimno wiąże się z produkcją stali, która jest bardzo energochłonna, tak na etapie pozyskiwania surowców, jak i wytwarzania materiałów i produktów, co generuje bardzo wysokie nakłady finansowe oraz wysoki poziom emisji zanieczyszczeń. Jednakże zastosowanie nowoczesnych, wysoce zautomatyzowanych procesów gięcia, cięcia i wiercenia do produkcji stalowych konstrukcji profilowanych na zimno, opisanych chociażby przez Jana Bródkę i in. (2006) powoduje znaczną redukcję tych kosztów. Ponadto, poprzez zastosowanie zunifikowanych systemów i typowych rozwiązań węzłów oraz zapewnienie szybkiego i łatwego montażu, konstrukcje te stają się niezwykle korzystne pod względem ekonomiki pracochłonności, a co za tym idzie społecznym i środowiskowym. Kolejną ich zaletą jest łatwość profilowania kształtowników giętych, co sprawia, że do dyspozycji projektantów

jest prawie nieograniczony typoszereg kształtowników o odpowiednich cechach wytrzymałościowych i użytkowych umożliwiających projektowanie optymalnych układów konstrukcyjnych, tj. o zminimalizowanym zużyciu stali przy równoczesnej maksymalizacji nośności. W porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, elementy profilowane na zimno mają jeden z najwyższych wskaźników określających stosunek wytrzymałości do masy materiału zużytego do ich wykonania. J. Bródka i in. (1978) autorzy zauważyli, że rozwój konstrukcji cienkościennych przyczynił się do zmniejszenia zużycia stali do nawet 50% w stosunku do tradycyjnych konstrukcji z kształtowników walcowanych na gorąco, ograniczył czas montażu do 60%, a koszty budowy do 25%. Zalety te sprawiły, że w ostatnich latach stalowe konstrukcje cienkościenne znalazły coraz szersze zastosowanie, nie tylko jako elementy obudowy budynków, ale również jako główne elementy konstrukcji nośnej. Należy jednak pamiętać, że tak szerokie ich zastosowanie konstrukcyjne może także generować ewentualną potrzebę ich wzmacniania, wynikającą np. z błędów projektowych lub wzrostu obciążeń zewnętrznych w stosunku do projektu. Niestety konstrukcje wykonane ze stalowych elementów cienkościennych charakteryzuje ograniczona możliwość ich wzmacniania. Z uwagi na bardzo cienkie ścianki przekroju poprzecznego, których grubość zawiera się w przedziale od 1 mm do 3 mm, nie ma praktycznie możliwości wykonania połączeń spawanych, a realizacja połączeń z zastosowaniem łączników mechanicznych jest także w znacznym stopniu utrudniona. W związku z tym koniecznym staje się poszukiwanie skutecznej i łatwej metody wzmacniania tego typu belek.

Jedną z nich jest zastosowanie taśm z materiałów kompozytowych (FRP – *fiber reinforcement polymers/plastics*), których bazą są wysokowytrzymałościowe włókna niemetaliczne zatopione w matrycy epoksydowej, np. taśm CFRP, GFRP i AFRP, wykonanych odpowiednio z włókien węglowych, szklanych i aramidowych. Taśmy te klejone są do konstrukcji, co zapewnia szybkie oraz efektywne jej wzmocnienie, praktycznie bez ograniczenia ciągłości eksploatacji. Chociaż taśmy CFRP są już szeroko stosowane w konstrukcjach żelbetowych, wciąż nie są popularne we wzmocnieniach stalowych belek cienkościennych. W opracowaniach naukowych coraz częściej pojawiają się badania dotyczące wzmacniania taśmami CFRP stalowych zginanych lub ściskanych elementów cienkościennych. Zdecydowana większość publikacji dotyczy przekrojów kwadratowych lub ceowych, natomiast

publikowane badania nawet niewzmacnianych cienkościennych belek o przekroju typu sigma nadal są rzadkością.

W odpowiedzi na brak powszechnie stosowanych i rozpoznanych nowoczesnych metod wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych profilowanych na zimno, w niniejszej pracy podjęto próbę przeprowadzenia badań eksperymentalnych i analiz numerycznych stalowych profili cienkościennych typu sigma wzmacnianych taśmami CFRP.

1.1. Podstawowe informacje dotyczące stalowych konstrukcji cienkościennych

1.1.1. Definicja pręta cienkościennego

Pręty cienkościenne cechuje określony stosunek wymiarów geometrycznych. Grubość ścianki przekroju jest dużo mniejsza od jego wymiarów poprzecznych, a długość elementu jest znacznie większa od wymiarów przekroju poprzecznego. W praktyce inżynierskiej za pręt cienkościenny uznaje się element, którego wymiary geometryczne, takie jak grubość, szerokość i długość, różnią się o rząd wielkości. Zgodnie z tą definicją do prętów cienkościennych można zaliczyć niemal wszystkie kształtowniki stosowane w konstrukcjach stalowych, tak walcowane na gorąco, spawane, nitowane, jak i profilowane na zimno. Nieco precyzyjniej opisuje pręt cienkościenny W. Własow, twórca teorii prętów cienkościennych o przekrojach otwartych, który stwierdza, że pręt można uważać za cienkościenny, jeśli grubość ścianki jest co najmniej osiem razy mniejsza niż najdłuższa odległość mierzona po linii środkowej pomiędzy dwoma skrajnymi punktami położonymi na konturze przekroju poprzecznego pręta, a ta z kolei jest co najmniej osiem razy mniejsza niż długość pręta. Szczegółowe wytyczne dotyczące granicznych wartości wymiarów poprzecznych dla elementów cienkościennych wskazane zostały przez Bronisława Gosowskiego (2004, 2015) oraz Stefana Piechnika (2000). Zgodnie z nimi do prętów cienkościennych można zaliczyć te pręty, które spełniają zależność:

$$\frac{t}{b} \leq 0,1 \text{ oraz } \frac{b}{l} \leq 0,1 \quad (1.1)$$

gdzie:

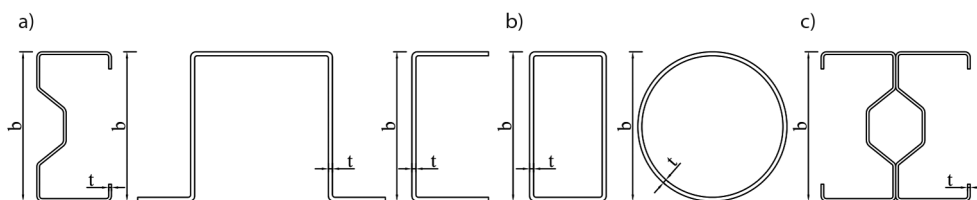
t – grubość ścianki przekroju poprzecznego,

b – charakterystyczny wymiar przekroju poprzecznego,

l – długość pręta.

Należy podkreślić, że dwa ostatnie kryteria spełnione są przez wszystkie pręty wykonane ze stalowych przekrojów profilowanych na zimno, a jedynie przez niektóre wykonane z kształtowników walcowanych na gorąco.

Pręty cienkościenne dzieli się z uwagi na geometrię przekroju na: otwarte, zamknięte i otwarto-zamknięte (tzw. mieszane). Przykłady prętów cienkościennych przedstawiono na rycinie 1.1.



Ryc. 1.1. Przykłady prętów cienkościennych o przekrojach:
a) otwartych, b) zamkniętych, c) otwarto-zamkniętych

Podział ten nie tylko pozwala na określenie odrębnego kształtu przekroju poprzecznego prętów cienkościennych, ale także wyznacza granice stosowania poszczególnych hipotez wytrzymałościowych i procedur obliczeniowych, znacząco różniących się w przypadku przekrojów otwartych, zamkniętych czy otwarto-zamkniętych.

1.1.2. Zastosowanie stalowych konstrukcji cienkościennych profilowanych na zimno

Stalowe konstrukcje cienkościenne mogą być stosowane w postaci prętów (różnego typu profile cienkościenne) lub powłok (blachy trapezowe, kasety, kasetony), nie tylko jako elementy o drugorzędym znaczeniu, ale również jako samodzielne konstrukcje nośne. Zdzisław Kurzawa i in. (2015) wyróżnili trzy grupy zastosowania kształtowników giętych: elementy detali architektoniczno-budowlanych (np. ościeżnice, konstrukcje balustrad itp.), elementy konstrukcyjne o znaczeniu

drugorzędnym (np. rygle, płatwie dachowe, stężenia, konstrukcje fasad, regałów i rusztowań) oraz samodzielne konstrukcje nośne (np. układy ryglowo-słupowe czy wiązary kratowe).

W grupie elementów powłokowych najbardziej rozpowszechnione są blachy trapezowe, które zapewniają dużą elastyczność rozwiązań oraz łatwość i szybkość montażu, a w połączeniu z odpowiednimi elementami wykończeniowymi stanowią kompletne rozwiązanie elewacji. Blachy trapezowe o niskim profilu (14 mm–60 mm), określane jako blachy pierwszej generacji, wykorzystywane są do krycia powierzchni elewacyjnych i dachowych, natomiast blachy o wyższym profilu (135 mm–160 mm), stanowiące blachy drugiej generacji, z uwagi na ich nośność, stosuje się w konstrukcjach nośnych o znacznych rozpiętościach, np. na bezpłatwowych dachach dużych obiektów przemysłowych, handlowych i usługowych oraz do wykonywania stropów zespolonych. Blachy trapezowe trzeciej generacji, z uwagi na zastosowane przegięcia pośrednie ścianek tak w kierunku podłużnym, jak i poprzecznym, stosowane są jako nośne elementy konstrukcyjne. Równie szerokie zastosowanie jako obudowy ścian i dachów mają płyty warstwowe składające się z dwóch okładzin z blachy stalowej o grubości od 0,5 mm oraz rdzenia konstrukcyjno-izolacyjnego wykonanego z poliuretanu, styropianu lub wełny mineralnej. Wysoką jakość wykonania elewacji, wyróżniających się ciekawym efektem wizualnym oraz różnorodną kolorystyką, można uzyskać poprzez zastosowanie systemów paneli i kaset. Panele wykonuje się z blach o grubości od 0,5 mm do 0,7 mm. Mogą one osiągać maksymalną rozpiętość nawet do 8 m natomiast minimalna rozpiętość nie może być mniejsza niż 1 m. W systemach kaset stosuje się blachy ocynkowane powlekane o grubości od 1 mm do 1,5 mm lub blachę aluminiową o grubości 1,2 mm.

Szerokie możliwości profilowania prętowych elementów cienkościennych pozwalają na niemal dowolne formowanie kształtu przekroju, a w związku z tym ich wytrzymałości i cech użytkowych. Liczne przykładowe przekroje poprzeczne stalowych elementów profilowanych na zimno można zobaczyć w pracy Mieczysława Łubińskiego i in. (2006) oraz w normie Eurocode 3 (2004).

Bogactwo dostępnych kształtów przekrojów cienkościennych stwarza projektantom konstrukcji stalowych nie tylko szerokie możliwości doboru elementów, ale równocześnie, jak zauważają Marian Oswald i in. (2008), przyczynia się do powstawania coraz to nowych problemów projektowych ze względu na interakcję globalnych i lokalnych

form utraty stateczności. Paradoksalnie im więcej czasu i uwagi poświęca się analizie laboratoryjnej i numerycznej stalowych konstrukcji cienkościennych, tym więcej pojawia się interesujących problemów badawczych. Dlatego też w wielu ośrodkach naukowych nadal trwają intensywne prace badawcze związane z problematyką naukową dotyczącą stalowych konstrukcji cienkościennych.

1.1.3. Ogólne informacje o postaciach utraty stateczności stalowych prętów cienkościennych i klasycznych metodach ich analizy

Kształtowniki profilowane na zimno z cienkich blach są zaliczane do prętów cienkościennych. Z uwagi na dużą smukłość ścianki, tzn. znaczną wysokość ścianki w stosunku do jej grubości (b/t), charakterystyczną cechą stalowych konstrukcji cienkościennych jest ich podatność na różne postaci utraty stateczności. Zagadnienia dotyczące stateczności stalowych przekrojów cienkościennych od dawna są przedmiotem badań i publikacji naukowych, a autorami najważniejszych prac podejmujących tę tematykę są R. Kappus (1937), Stephen Timoshenko (1963), Herbert Wagner (1929), George Winter (1944) oraz W. Własow (1940). Wyróżnia się dwie podstawowe formy wyboczenia (Ostwald i in., 2008): ogólną (globalną) oraz lokalną (miejscową).

Ogólna forma utraty stateczności ma miejsce, gdy pręt jest ściskany osiowo (wyboczenie) albo zginany (zwichrzenie) przy czym zachowany zostaje pierwotny kształt przekroju poprzecznego. Zwichrzenie stalowych belek cienkościennych charakteryzuje utrata płaskiej postaci zginania polegająca na jednoczesnym skręcaniu i zginaniu elementu. Miejscowa utrata stateczności związana jest z deformacją przekroju poprzecznego belki i może wystąpić pod dowolnym obciążeniem, wywołującym naprężenia normalne ściskające lub styczne. Ponadto wyróżnia się szczególnie przypadek lokalnej utraty stateczności, w którym półka ulega wyboczeniu przy jednoczesnej deformacji środnika (tzw. dystorsyjna utrata stateczności). Gregory J. Hancock (2003) opisuje ten przypadek jako lokalne wyboczenie z przemieszczeniem osi połączeń pomiędzy ściankami, a Marian Ostwald i in. (2008) jako obrót półki wokół osi jej połączenia ze środnikiem przy zachowaniu przekroju poprzecznego półki i deformacji środnika.

W teorii prętów cienkościennych wydzielono dwie klasy problemów. Pierwsza z nich, stateczność ogólna prętów cienkościennych,

analizowana jest według teorii W. Własowa, w której uwzględnia się skręcanie i spaczenie pręta, nie rozpatruje się natomiast stateczności miejscowej. Druga klasa dotyczy utraty stateczności płyt i rozpatrywana jest na gruncie teorii nośności nadkrytycznej ścianek prętów cienkościennych.

Z uwagi na zastosowanie pewnych uproszczeń matematycznych, w procesie projektowania koniecznym staje się rozróżnienie stateczności ogólnej i stateczności miejscowej (Kurzawa i in., 2015). Rozpatrując stateczność ogólną, przyjmuje się model pręta, którego przekrój poprzeczny spełnia warunki hipotezy sztywnego konturu. W przypadku analizowania stateczności miejscowej zakłada się, że oś pręta pozostaje nieodkształcona, ale kontur ulega zniekształceniu. Aby jednocześnie analizować obie formy utraty stateczności należy np. zastosować model powłokowy MES (Metoda Elementów Skończonych). Analiza całej konstrukcji w takim ujęciu jest jednak bardzo czasochłonna. W związku z tym w zastosowaniach inżynierskich osobno przeprowadza się analizę ze względu na skręcanie pręta i stateczność płytową.

Wspomniana hipoteza sztywnego konturu stanowi podstawowe założenie teorii prętów cienkościennych W. Własowa (1940). W procesie skręcania pręta przekrój nie pozostaje płaski, ale ulega spaczeniu zwanym też deplanacją (Kurzawa i in., 2015).

Zwicherung, czyli utrata stateczności ogólnej belki, może pojawić się pod wpływem działania momentu zginającego, pod warunkiem, że zginanie następuje względem mocniejszej osi bezwładności przekroju poprzecznego oraz występuje duży rozstaw usztywnień bocznych belki. Jeżeli obciążenie działa w płaszczyźnie przekroju belki, to ulega ona zginaniu w płaszczyźnie działania obciążenia do chwili, w której obciążenie osiągnie wartość krytyczną. W przypadku przekroczenia obciążenia krytycznego belka równocześnie doznaje przemieszczeń w płaszczyźnie pionowej i poziomej oraz skręcania, a w konsekwencji traci płaską postać zginania. Na wartość obciążenia krytycznego ma wpływ kształt przekroju poprzecznego belki i przede wszystkim stosunek szerokości do długości swobodnej belki na zwicherung, która jest określana jako odległość pomiędzy przekrojami zabezpieczonymi przed obrotem.

Ogólna teoria utraty stateczności pręta cienkościennego o przekroju otwartym sformułowana przez W. Własowa jest oparta na następujących założeniach: kontur pręta jest nieodkształcalny, występuje

płaski stan naprężenia i obciążenie zewnętrzne przechodzi przez oś skręcania pręta. Wykorzystując warunki równowagi pręta, który podczas obciążenia krytycznego przechodzi z giętnego stanu równowagi w stan giętno-skrętny, W. Własow wyprowadził układ trzech równań różniczkowych równowagi. Badacz przedstawił rozwiązania tylko dla najprostszych przypadków ściskania osiowego i mimośrodowego, a także dla niektórych schematów obciążeń dla prętów jednoprzęsłowych poddanych zginaniu, stosując metodę Galerkina (Kurzawa i in., 2015). Procedury obliczeniowe i tablice niezbędne do obliczenia siły i momentu krytycznego zostały zawarte np. w normie PN-90/B-03200.

Podsumowując, należy podkreślić, że prętowa teoria W. Własowa umożliwia analizę skręcania i spaczenia pręta, bez uwzględnienia utraty stateczności miejscowej ścianek bazującej na teorii płyt. Przy czym zagadnienia stateczności płyt rozwiązuje się, stosując modele bifurkacyjne na gruncie teorii nośności nadkrytycznej płyt, zaproponowanej przez Theodora Karmana (1932) i rozwijanej później przez G. Wintera (1944). Należy jednak zauważyć, że klasyczna teoria stateczności płyt nie uwzględnia skutków skręcania. Dlatego też, powszechnie stosowane, rozdzielne rozpatrywanie lokalnej i globalnej utraty stateczności może być niebezpieczne, gdyż w konsekwencji uproszczeń wynikających z założeń poszczególnych teorii w przypadku kształtowników profilowanych na zimno obserwuje się zmniejszenie rzeczywistego obciążenia krytycznego w stosunku do obciążenia krytycznego uzyskiwanego na podstawie rozważań teoretycznych. W związku z tym w niniejszej pracy nie przeprowadzono analiz na gruncie powyżej wskazanych teorii, a co za tym idzie nie przytoczono podstawowych równań dotyczących skrępowanego skręcania i wyznaczania obciążenia krytycznego pręta cienkościennego oraz nie przedstawiono procedur dotyczących określania przekroju współpracującego. Szczegółowe informacje w tym zakresie można znaleźć np. w pracy Jerzego Ruteckiego (1966) czy Jana Bródki i in. (1978). W niniejszej pracy skoncentrowano się na badaniach laboratoryjnych i analizach zaawansowanych modeli numerycznych belek ulegających skręcaniu i deformacjom przekroju poprzecznego.

1.1.4. Imperfekcje stalowych elementów cienkościennych

W przypadku stalowych konstrukcji cienkościennych bardzo istotny jest wpływ niedoskonałości rzeczywistego obiektu na wartość obciążenia lub

naprężenia krytycznego. Owe niedoskonałości, nazwane imperfekcjami, to nieuniknione odchyłki konstrukcji rzeczywistych od konstrukcji idealnych (Rzeszut, 2015). Wyróżnia się trzy typy imperfekcji: fizyczne, geometryczne oraz technologiczne. Imperfekcje fizyczne to niedoskonałości dotyczące cech materiałowych, np. granicy plastyczności stali, lub dotyczące naprężeń własnych pojawiających się na skutek procesu walcowania czy spawania. Imperfekcje geometryczne są związane z odchyleniami kształtu konstrukcji lub jej elementu. Imperfekcje technologiczne pojawiają się w procesach montażu lub produkcji i skutkują powstaniem luzów w połączeniach.

Początkowe imperfekcje geometryczne w przypadku stalowych elementów cienkościennych mają znaczący wpływ na odpowiedź konstrukcji w zakresie stateczności. W związku z tym w wielu publikacjach podjęto próbę znalezienia najbardziej efektywnej metody wprowadzenia wstępnych imperfekcji geometrycznych do modelu numerycznego. Janusz Murzewski (1989), Aleksander Kozłowski (2008) i Zbigniew Mendera (1997) uwzględnili początkowe imperfekcje geometryczne poprzez zastosowanie w modelu odpowiedniego obciążenia równoważnego albo początkowego wygięcia. Inna metoda, oparta na koncepcji równoważnej sztywności pręta, została zaproponowana w pracy Anny Barszcz i in. (2007). Polega ona na tym, że modelowany pręt jest traktowany jako element hipotetycznie prosty, ale jego sztywność określa się na każdym poziomie obciążenia. Każda z przytoczonych metod może być z powodzeniem stosowana w przypadku imperfekcji globalnych. Pojawienie się imperfekcji lokalnych wymusza zastosowanie modelu powłokowego i wprowadzenie do modelu rzeczywistej geometrii analizowanego elementu lub tolerancji określonych w normach, co jest działaniem bardzo pracochłonnym. Powłokowy model numeryczny pozwala generować zaburzoną siatkę MES, która może odwzorowywać imperfekcje globalne i lokalne. Najlepsze odwzorowanie imperfekcji w modelu numerycznym występuje wtedy, gdy zdeformowana geometria odpowiada rzeczywistym imperfekcjom, rozpoznany na podstawie przeprowadzonych pomiarów elementu lub konstrukcji. Należy jednak podkreślić, że modelowanie konstrukcji za pomocą elementów powłokowych skutkuje dużą liczbą elementów skończonych i stopni swobody, co wiąże się z bardzo długim czasem obliczeniowym. Przykładowo Andrzej Garstecki i in. (2002) opisali wyniki pomiarów wstępnych imperfekcji geometrycznych cienkościennych kształtowników o przekroju

typu sigma. Dokonali oni pomiaru szerokości ścianek przekroju i ich wzajemne usytuowanie w celu określenia deformacji konturu. Na tej podstawie opracowali zdeformowaną siatkę geometryczną konstrukcji, która posłużyła do nieliniowej analizy numerycznej, tak jak przedstawili to Katarzyna Rzeszut i in. (2009). Z kolei w innych publikacjach (Rzeszut i in., 2004, Rzeszut i in., 2005) zaproponowano metodę modelowania początkowych imperfekcji geometrycznych polegającą na automatycznym tworzeniu sygnału imperfekcji w postaci serii funkcji własnych otrzymanych podczas liniowej analizy stateczności. Metoda ta pozwala modelować imperfekcje przy użyciu niewielkiej liczby najbardziej niekorzystnych postaci własnych i przy ograniczonej liczbie punktów pomiaru imperfekcji rzeczywistej konstrukcji. Analizując wpływ lokalnych imperfekcji geometrycznych na stateczność krótkich słupów i belek, Dan Dubina i in. (2001, 2002) podjęli próbę opracowania metod wprowadzania wskazanych imperfekcji do nieliniowych modeli MES.

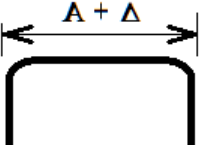
Inną metodą pozwalającą uwzględnić imperfekcje w modelu numerycznym jest generowanie pierwotnego kształtu zdeformowanej geometrii konstrukcji, który jest przyjmowany w analizie nieliniowej jako liniowa superpozycja postaci wyboczenia uzyskiwanych poprzez rozwiązanie liniowego zagadnienia własnego (Rzeszut, 2015). Przy użyciu współczynników proporcjonalności, które określa się na podstawie tolerancji normowych lub też pomiarów rzeczywistych, skaluje się amplitudy postaci wyboczenia. Warto podkreślić, że kształt imperfekcji i amplituda bardzo silnie wpływają na stateczność konstrukcji, dlatego prawidłowe zamodelowanie sygnału imperfekcji geometrycznych odgrywa decydującą rolę w analizie i projektowaniu prętów cienkościennych.

W celu dokonania analizy stanu granicznego nośności, w normach do projektowania konstrukcji metalowych PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-3 wyszczególniono obliczeniowe imperfekcje geometryczne, które wprowadza się do modelu obliczeniowego w postaci zastępczych deformacji lub obciążeń imperfekcyjnych. Z kolei w normach PN-EN 10162:2005 i PN-EN 1090-2 dotyczących odbioru konstrukcji podane są wykonawcze imperfekcje geometryczne. Ostatnią grupą są imperfekcje odbiorowe, które są związane z tolerancjami, tzn. z dopuszczalnymi wartościami odchyłek geometrycznych konstrukcji. Pojęcie tolerancji zawiera tolerancje podstawowe, które określają wymagania stawiane

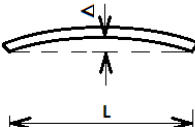
podczas analizy stanu granicznego nośności i tolerancje funkcjonalne związane ze stanem granicznym użytkowości oraz wyglądem i możliwością należytego zmontowania i użytkowania konstrukcji (Rzeszut, 2015). W tabeli 1.1 zestawiono dopuszczalne wartości tolerancji podstawowych dla kształtowników formowanych na prasach zgodnie z normą PN-EN 1090-2.

Bardziej szczegółowe wymagania dotyczące odchyłki kąta gięcia, długości, prostoliniowości elementu, skręcenia i wklęsłości lub wypukłości płaskich boków elementu dla kształtowników wytwarzanych na urządzeniach profilujących zawarto w normie PN-EN 10162:2005. Natomiast w normie PN-EN 1090-2 wartości tolerancji uzależniono od klasy tolerancji. Wyróżniono dwie klasy tolerancji. Klasa druga, zawierająca bardziej zaostrzone wymagania, jest zarezerwowana dla konstrukcji stalowych bardzo wrażliwych na wpływ odchyłek geometrycznych, jak np. dla konstrukcji współpracujących z elewacją szklaną. W przypadku braku zaostrzonych wymagań przyjmuje się tolerancje określone dla klasy pierwszej. Ponadto z tolerancjami związane jest pojęcie klasy wykonania konstrukcji.

Tab. 1.1. Podstawowe tolerancje wytwarzania kształtowników giętych na zimno na prasach (PN-EN 1090-2)

Kryterium	Parametr	Dopuszczalna odchyłka Δ
Szerokość ścianki przęsłowej		$\Delta = A / 50$ (nie określa się dopuszczalnej odchyłki dodatniej)
Szerokość ścianki wspornikowej		$\Delta = B / 80$ (nie określa się dopuszczalnej odchyłki dodatniej)

Tab. 1.1. Podstawowe tolerancje wytwarzania kształtowników giętych na zimno na prasach (PN-EN 1090-2)

Kryterium	Parametr	Dopuszczalna odchyłka Δ
Prostoliniowość elementu na odcinku swobodnym (bez stężeń)	 strzałka wygięcia Δ względem cięciwy	$\Delta = \pm L / 750$

Wyróżnia się cztery klasy (od EXC1 do EXC4). Wraz ze wzrostem klasy wzrastają wymagania stawiane konstrukcji i są one uzależnione od klasy konsekwencji zniszczenia elementu CC, kategorii użytkowania SC i kategorii produkcji PC (PN-EN 1090-2). Szeroka dyskusja na temat tolerancji technologicznych w budownictwie została zaprezentowana w pracach Elżbiety Urbańskiej-Galewskiej (1994, 2002, 2005). Interesujące rozważania odnośnie wpływu odchyłek wykonania na nośność i sztywność połączenia doczołowego autorka przedstawiła w pracy z 2006 r. (Urbańska-Galewska, 2006). Natomiast klasyfikację wymiarów konstrukcji, w świetle ich prawidłowego montażu z uwzględnieniem kosztów wytwarzania konstrukcji stalowych, zawarła w pracy z 2008 r. (Urbańska-Galewska, 2008). Zagadnienia dotyczące stateczności i imperfekcji stalowych konstrukcji cienkościennych, a także sposobu modelowania elementów z uwzględnieniem wstępnych imperfekcji są tematem podejmowanym przez wiele ośrodków naukowych na świecie. Badania nad zachowaniem belek stalowych formowanych na zimno poddanych skręcaniu i zginaniu opisano w pracy B.P. Gotluru i in. (2000). Z kolei odnosząc się do elementów ściskanych na podstawie badań różnych przekrojów słupków, John Tromblin i in. (1994) przedstawili procedury redukcji danych, które wykorzystano do uzyskania lokalnych obciążeń wyboczeniowych.

1.2. Podstawowe informacje dotyczące materiałów kompozytowych

Materiały kompozytowe (FRP – *fiber reinforcement polymers/plastics*) to materiały, których bazą są wysokowytrzymałe włókna niemetaliczne,

zatopione w matrycy epoksydowej (Kałuża i in., 2015). W budownictwie powszechnie stosowane są obecnie trzy rodzaje materiałów kompozytowych, różniące się pomiędzy sobą materiałem, z którego wykonane są włókna, a mianowicie: CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*), GFRP (*glass fiber reinforced polymer*) i AFRP (*aramid fiber reinforced polymer*) (odpowiednio włókna węglowe, szklane i aramidowe).

Taśmy i maty CFRP z matrycami na bazie włókien węglowych są najczęściej stosowanym materiałem kompozytowym do wzmocnień konstrukcji budowlanych, co wynika z bardzo dobrych parametrów wytrzymałościowych włókien węglowych w porównaniu z pozostałymi materiałami.

Producenci materiałów kompozytowych deklarują bardzo szeroki zakres możliwości zastosowania taśm CFRP (Alexandrowicz, 2005). Można je stosować wszędzie tam, gdzie wymagane jest wzmocnienie istniejącej konstrukcji z uwagi na zwiększenie obciążeń użytkowych (np. z uwagi na zmianę przeznaczenia obiektu) lub pojawienie się nowych obciążeń wynikających np. z montażu ciężkich urządzeń. Znajdują one także zastosowanie w przypadku konieczności wzmocnienia elementów nośnych konstrukcji uszkodzonych w wyniku korozji, pożaru lub oddziaływań mechanicznych, jak i w przypadku konieczności poprawy warunków ich użytkowania, tzn. ograniczenia odkształceń, zwiększenia nośności zmęczeniowej, redukcji naprężeń, zmniejszenia rozwartości rys. Montaż taśm CFRP umożliwia także przystosowanie konstrukcji do ewentualnej zmiany schematu statycznego, np. na skutek usunięcia ścian czy słupów. Taśmy CFRP mogą okazać się bardzo pomocne w razie potrzeby podniesienia nośności konstrukcji na wypadek wystąpienia obciążeń wyjątkowych, takich jak wybuchy czy uderzenia spowodowane przez pojazdy, a także w przypadku wystąpienia błędów projektowych lub wykonawczych.

Główne właściwości kompozytów CFRP uzależnione są od rodzaju i kierunku ułożenia włókien węglowych, parametrów zastosowanej żywicy epoksydowej i jej procentowego udziału w finalnym materiale oraz warunków suszenia (Tawfik i in., 2010). Na podstawie badań prowadzonych przez producentów taśm CFRP (Alexandrowicz, 2005) do podstawowych zalet materiałów kompozytowych CFRP można zaliczyć następujące cechy: ponad dziesięciokrotnie większą wytrzymałość taśm na rozciąganie w kierunku ułożenia włókien w porównaniu z typową stalą konstrukcyjną, bardzo wysoką wytrzymałość zmęczeniową, wysoką

trwałość spowodowaną dużą odpornością na czynniki agresywne, odporność na korozję i brak konieczności konserwacji. Niewątpliwą zaletą taśm CFRP jest też niewielki ciężar ($1,6\text{--}2,0\text{ g/cm}^3$) i mały przekrój pozwalający na wzmocnienie konstrukcji w sposób prawie niewidoczny oraz dodatkowo umożliwiający pokrywanie taśm powłokami dekoracyjnymi. Ponadto istnieje możliwość stosowania taśm o niemalże nieograniczonych długościach, nawet do 250 m. Dzięki szerokiemu asortymentowi umożliwiającemu dobór taśmy o odpowiednim module sprężystości, wytrzymałości na rozciąganie czy wymiarze przekroju poprzecznego, taśmy CFRP można stosować do wzmacniania konstrukcji wykonanych z różnych materiałów (beton, stal, drewno). Bardzo istotna jest także możliwość wzmocnienia konstrukcji za pomocą naprężonych taśm, mocowanych za pomocą systemów kotwiących. Wszystkie te zalety wieńczy łatwość i szybkość aplikacji, niski koszt robocizny oraz łatwy transport.

Pomimo tak wielu zalet materiały te nie są pozbawione wad, które ograniczają możliwość ich zastosowania. Właściwości wytrzymałościowe taśm z jednokierunkowym włóknem węglowym są anizotropowe. Wzdłuż włókien sztywność i wytrzymałość taśm jest bardzo wysoka, natomiast w kierunku prostopadłym do włókien parametry te są dużo słabsze (Linghoff i in., 2009). Cechują się one małą wytrzymałością na ściskanie, stanowiącą około 10% wytrzymałości na rozciąganie i jeszcze mniejszą na ścinanie międzywarstwowe (ang. *debonding*; Mażulis i in., 2011). Ponadto z uwagi na kruchość i wrażliwość na koncentrację naprężeń taśmy CFRP nie należy nacinać, wiercić ani zginać. Aby umożliwić skuteczną współpracę taśm z konstrukcją, w celu umożliwienia przejmowania obciążeń, taśmy muszą ściśle przylegać do konstrukcji. Brak możliwości naruszania struktury taśm, poprzez np. otwory, powoduje, że jedynym sposobem ich montażu może być metoda polegająca na klejeniu bądź też kotwieniu do konstrukcji z wykorzystaniem specjalnych rozwiązań technologicznych. Montaż taśm powinien być prowadzony w określonych warunkach atmosferycznych – temperatura otoczenia nie może być niższa niż $+5^{\circ}\text{C}$ i nie wyższa niż $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$ (w zależności od deklaracji producenta). Ponadto montaż taśm powinien być wykonany przez osoby, które odbyły odpowiednie szkolenie i posiadają doświadczenie w danej technologii. Przyklejone taśmy należy zabezpieczyć przed działaniem promieniowania słonecznego oraz wody i wilgoci.

Kolejną wadą materiałów kompozytowych jest brak odporności na wysokie temperatury, z powodu obecności żywic epoksydowych (Kałuża i in., 2015). Maksymalna temperatura pracy wzmocnienia wykonanego taśmami CFRP nie może przekraczać 50°C. W przypadku zagrożenia pożarowego fakt ten wymusza stosowanie dodatkowych zabezpieczeń przeciwpożarowych w miejscach wzmocnionych taśmami CFRP.

Wymienione wady materiałów kompozytowych nie zniechęcają jednak do projektowania wzmocnień konstrukcji przy ich użyciu. Możliwość uzyskania stosunkowo niskim nakładem finansowym szybkiego (z uwagi na czas montażu) i efektywnego podniesienia parametrów wytrzymałościowych konstrukcji przyczynia się do znaczącego wzrostu sprzedaży tych materiałów.

2.1. Wzmacnianie konstrukcji stalowych przy użyciu CFRP

W ostatnich latach taśmy CFRP znalazły powszechne zastosowanie do wzmacniania konstrukcji betonowych, żelbetowych czy murowych. Stało się to możliwe dzięki wprowadzeniu przejrzystych i uproszczonych zasad postępowania projektowego w zakresie wykorzystania taśm do tego typu konstrukcji. Obecnie producenci taśm CFRP oferują gotowe programy pomagające prawidłowo dobrać materiał i sposób wzmacniania konstrukcji żelbetowych i betonowych. Niestety w przypadku wzmacniania konstrukcji stalowych jak dotąd nie opracowano stosowych narzędzi wspomagających procesy projektowe.

Wzmacnianie stalowych konstrukcji często wiąże się z koniecznością modyfikacji schematu statycznego konstrukcji, powiększenia przekroju elementów konstrukcyjnych czy też zwiększenia globalnej sztywności konstrukcji, jak opisują to na przykładzie wzmacniania stalowych wież telekomunikacyjnych Jacek Szafran i in. (2018). Nie zawsze jednak w celu wzmocnienia konstrukcji stalowych wymagany jest tak szeroki zakres prac. W przypadku wykorzystania taśm CFRP do podniesienia nośności konstrukcji stalowych wykonanych z profili gorącowalcowanych wiele publikacji potwierdza dużą skuteczność tego sposobu wzmocnienia. Na przykład problem wzmocnienia stalowych belek zginanych został szczegółowo poddany wielu analizom, tak w zakresie badań laboratoryjnych, jak i numerycznych. Przeprowadzone badania płaskownika stalowego o wymiarach przekroju 80 mm x 30 mm i długości 1600 mm, wzmocnionego taśmą CFRP przyklejoną do szerszego boku, w próbie czteropunktowego zginania wskazały na ponad

30% wzrost wytrzymałości (Błażejowski i in., 2011). Przy czym we wszystkich próbkach zniszczeniu uległ klej, a nie kompozyt, co wskazuje na niepełne wykorzystanie jego możliwości wzmacniających. Ponadto badania potwierdzają fakt, że w przypadku stałego poziomu obciążenia, odkształcenie wzmocnionych taśmami CFRP belek są znacznie mniejsze niż belek niewzmocnionych. W próbie czteropunktowego zginania badaniu zostały poddane także belki wykonane z dwuteownika walcowanego wzmocnione taśmą CFRP doklejoną do pasa dolnego (Machelski i in., 2015, Paśko, 2015). Uzyskane w pracy Pauliny Paśko wyniki badań, prowadzonych na belkach HEB280 o długości 5,2 m i zabezpieczonych dodatkowo przed zwichrzeniem poprzez boczne stężenia w połowie rozpiętości i przy podporach wykazały efektywność wzmocnienia do 13,7% dla belki wzmocnionej taśmą zakotwioną dodatkowo na końcach. Jednak jak wskazuje sama autorka, podczas badań prowadzonych przez inne jednostki obserwowano wzrost nośności przekroju elementu stalowego od 18% do nawet 56% (Paśko, 2015). W próbie czteropunktowego zginania belki dwuteowe wzmocnione taśmą CFRP poddano także analizie pod kątem propagacji zainicjowanego pęknięcia przy obciążeniu zmęczeniowym (Ghafoori i in., 2012). Na politechnice w Mediolanie badaniu poddano pięć belek stalowych, z zainicjowanym pęknięciem, wzmocnionych taśmami CFRP o różnej grubości (Colombi i in., 2014). Taśmy CFRP miały za zadanie ograniczenie propagacji pęknięć zmęczeniowych w belkach stalowych poprzez ograniczenie naprężeń wokół wierzchołka pęknięcia oraz zmniejszenie szerokości rys. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają korzystny wpływ zastosowania kompozytów CFRP na zmniejszenie propagacji pęknięć zmęczeniowych i przedłużenie trwałości zmęczeniowej zginanych elementów stalowych. Dodatkowo badano wpływ zastosowania wstępnie naprężonych taśm CFRP do ograniczenia pęknięć zmęczeniowych (Ghafoori i in. 2012). W sformułowanych wnioskach autorzy pracy zaznaczają, że odporność na zmęczenie pękniętej belki wzmocnionej w 20% naprężonym kompozytem CFRP może wzrosnąć pięciokrotnie względem identycznej belki wzmocnionej nienaprężonym kompozytem przy jednakowym zakresie obciążenia zmęczeniowego (Ghafoori i in. 2012). Roland E. Koller i in. również wzmocnili stalowy dźwigar skrzynkowy naprężonymi taśmami CFRP, co skutecznie zwiększyło wytrzymałość statyczną i dynamiczną oraz przyczyniło się do braku propagacji pęknięć zmęczeniowych (2012). Björn Täljsten i in. wykazali,

że zastosowanie taśm CFRP do wzmocnienia starych płyt stalowych ze wstępnym nacięciem wydłuża żywotność zmęczeniową płyty czterokrotnie, a zastosowanie naprężonych taśm CFRP całkowicie zatrzymuje propagację pęknięcia (2009). Z kolei w artykule H. Liu i in. (2009) przedstawiono prostą metodę analityczną oszacowania wzrostu pęknięcia zmęczeniowego i trwałości zmęczeniowej płyt stalowych wzmocnianych przy użyciu CFRP. Sylwain Chataigner i in. (2018) zaprezentowali nowoczesny system wzmacniający złożony z płyty kompozytowej CFRP o ultrawysokim module (UHM) oraz z nowego hybrydowego kleju epoksydowo-poliuretanowego. System wykorzystano w celu ochrony konstrukcji stalowych przed uszkodzeniami zmęczeniowymi. Chcąc rzetelnie określić efektywność systemu wzmacniającego, badania na próbkach prowadzono w różnych laboratoriach równocześnie. Badaniom poddane zostały także wieloprzęsłowe belki stalowe obciążone obciążeniem równomiernie rozłożonym (Bocciarelli i in., 2013) wzmocnione taśmami CFRP. Dużo uwagi poświęcono także badaniom wpływu kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość połączenia stal-taśma CFRP (Linghoff i in., 2009; Łagoda i in., 2013, 2014), analizując osiem kształtów zakończenia skleiny (Łagoda i in., 2013). Szczegółowy przegląd literatury dotyczący wzmocniania stalowych konstrukcji gorącowalcowanymi materiałami kompozytowymi zawarli w swoich pracach Maciej Kowal (2015) oraz Katarzyna Rzeszut i in. (2016).

Z uwagi na mnogość opublikowanych prac związanych ze wzmocnianiem przy użyciu taśm CFRP stalowych konstrukcji wykonanych z kształtowników walcowanych na gorąco można zaryzykować stwierdzenie, że temat ten jest dosyć dobrze rozpoznany. Autorzy prac, na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych opracowali także wskazówki do projektowania wzmocnień z taśm z włókien węglowych. Przykładowo Carlo Pellegrino i in. zaprezentowali w swojej pracy procedurę analityczną pozwalającą na określenie zachowania się zginanych elementów stalowych i stalowo-betonowych wzmocnionych za pomocą materiałów kompozytowych FRP (2009). Przedstawiona przez nich metoda została opracowana na podstawie deformacji przekroju poprzecznego z uwzględnieniem nieliniowego opisu materiałów o dowolnym układzie wzmocnienia materiałem kompozytowym. Metoda opiera się na zachowaniu równowagi przekroju poprzecznego i zgodności odkształceń oraz pozwala na ocenę wytrzymałości na zginanie wzmocnionych elementów stalowych i stalowo-betonowych w zakresie sprężystego zachowania

materiałów (Pellegrino i in., 2009). Dag Linghoff i in. analizowali pracę zginanych belek stalowych o przekroju dwuteowym, wzmocnionych taśmami CFRP w różnych układach. Równocześnie przeprowadzone zostały przez nich badania laboratoryjne i rozwiązania analityczne, w których wykorzystali warunki równowagi i założenie zgodności odkształceń w przekroju poprzecznym. Autorzy podczas badania zginanej belki po każdym wzroście obciążenia obliczali siły wewnętrzne i naprężenia w przekroju poprzecznym dwuteownika. W celu oszacowania nośności na zginanie wzmocnionego przekroju belki stalowej opracowali rozwiązanie oparte na równowadze sił w przekroju poprzecznym (Linghoff i in., 2010). Z kolei Massimiliano Bocciarelli i in., chcąc w pełni wykorzystać potencjał wzmocnienia taśmami CFRP, zasugerowali konieczność projektowania belek stalowych w zakresie plastycznym. Uprościli oni obliczenia nieliniowych modeli elementów skończonych stosowanych do określenia sprężysto-plastycznej pracy konstrukcji i zaproponowali prosty model do celów projektowych umożliwiający analizę wzmocnionej belki, aż do stanu granicznego nośności (Bocciarelli i in., 2013).

Na podstawie przytoczonych publikacji można stwierdzić, że wykorzystanie materiałów kompozytowych do wzmacniania stalowych konstrukcji gorącowalcowanych jest dosyć dobrze rozpoznane. Niestety nieco inaczej jest w przypadku elementów stalowych zimno-giętych. Wysoka efektywność wzmocnienia przy użyciu taśm CFRP konstrukcji stalowych gorącowalcowanych napawa optymizmem, że materiał ten może także znaleźć szerokie zastosowanie do wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych.

2.2. Badania stalowych konstrukcji cienkościennych

Praca zginanych i ściskanych elementów wykonanych z profili cienkościennych została szeroko rozpoznana poprzez badania laboratoryjne, numeryczne i analityczne. W badaniach laboratoryjnych wyodrębniono dwie główne grupy, które stanowiły elementy ściskane oraz zginane. Przykładowo Michael Richard Bambach analizował pracę stalowych cienkościennych słupów o przekroju ceowym poddanych osiowemu ściskaniu (2009). Young Bong Kwon i in. opisali serię testów dotyczących ściskania stalowych, formowanych na zimno elementów o przekroju ceowym z usztywnieniami na pasach lub na środku (2009). Marian

Królak i in. omówili badanie nośności ściskanych cienkościennych słupów o przekroju trójkątnym (2007). Natomiast Dan Popovic i in. przeprowadzili badanie ściskanych osiowo cienkościennych stalowych ocynkowanych kątowników (1999). Tej samej tematyce poświęcona została również praca Gustava Monteiro de Barros Chodraui (2007). Badaniami ściskanych osiowo cienkościennych słupów o przekroju kątowym zajmował się także B. Young (2006). Dwa lata po wydaniu pierwszych wyników badań Dan Popovic i in. omówili kolejne – badanie stalowych cienkościennych słupów wykonanych z kątowników, poddanych obciążeniu mimośrodowemu (2001). Szczegółowy przegląd innych badań laboratoryjnych i osiągnięć badawczych w dziedzinie konstrukcji cienkościennych w latach 1999–2001 został przedstawiony przez Gregorego Hancocka (2003). Kolejna grupa badań dotyczyła belek wykonanych z profili cienkościennych. Maria Magdalena Pastor i in. opisali badanie belek cienkościennych o przekroju U i omega badanych w schemacie czteropunktowego zginania (2008). Marian Królak i in. zawarli wyniki i analizę testów przeprowadzonych na wielkoskalowym modelu cienkościennej belki o przekroju skrzynkowym prostokątnym poddanej czteropunktowemu zginaniu (1996). Maria Kotelko i in. przedstawili badanie cienkościennych stalowych belek o przekroju skrzynkowym prostokątnym i trapezowym pracujących w schemacie czteropunktowego zginania. A.C.R. Djughash i in. opisali badania cienkościennych belek stalowych o przekroju Z (1990). W badaniach laboratoryjnych rozpoznano także pracę belek wspornikowych wykonanych z cienkościennych stalowych rur prostokątnych (Kecman, 1979).

W dostępnej literaturze nie brakuje także pozycji dotyczących analiz numerycznych i analitycznych elementów z profili cienkościennych. Pedro Dinis i in. przedstawili badania numeryczne cienkościennych stalowych słupów o przekroju ceowym ściskanych osiowo (2011). Takie same analizy numeryczne przeprowadził także Czesław Szymczak, rozszerzając je o badania analityczne. W swojej pracy zaprezentował także badania analityczne i numeryczne zginanych stalowych belek cienkościennych o przekroju ceowym (Szymczak, 2019). Pedro Dinis i in. zawarli analizy numeryczne dotyczące wyboczenia cienkościennych słupów i belek o przekrojach T i o przekrojach kątowych (o wymiarach przekroju 70x70, 70x50 i 70x30 i grubości ścianki 1,2 mm; 2010). Krzysztof Magnucki i in. (2004) zaprezentowali rozwiązanie analityczne (posługując się założeniami teorii Własowa) i numeryczne

cienkościennej stalowej belki o nietypowym przekroju otwartym, podanej obciążeniu równomiernie rozłożonemu, a Michał Grenda i in. (2019) przedstawili badania numeryczne zginanych belek cienkościennej o niestandardowym przekroju ceowym z usztywnionymi półkami, których wyniki poparli badaniami laboratoryjnymi. Yong-Lin Pi i in. (1999) prowadzili analizy numeryczne wyboczenia belek cienkościennej o przekroju Z, a Yixiao Feng i in. (2018) opracowali model do badania cienkościennej płatwi stalowych o przekroju Z. Bardzo ciekawe analizy obliczeniowe przedstawiono w pracy E. Urbańskiej-Galewskiej i in. Autorzy, analizując cztery różne kształty przekroju stalowych profili cienkościennej o jednakowej grubości ścianki i polu powierzchni przekroju, rozpatrywali wpływ kształtu przekroju elementu formowanego na zimno na ściskanie osiowe i wytrzymałość na moment zginający (Urbańska-Galewska i in., 2016).

2.3. Wzmacnianie stalowych konstrukcji cienkościennej przy użyciu materiałów CFRP

Dokonując studiów literaturowych, natrafiono na ograniczoną liczbę publikacji dotyczących wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennej przy użyciu materiałów kompozytowych, wśród których zdecydowana większość dotyczy badań elementów ściskanych.

Michael Richard Bambach opisał badanie cienkościennej stalowych elementów o przekroju kwadratowym, wzmocnionych na zewnątrz CFRP. Eksperyment przeprowadzono przy quasi-statycznym ścisaniu osiowym, w celu określenia wpływu zastosowanego wzmocnienia na wzrost nośności na ściskanie, oraz pod wpływem uderzenia osiowego. Prace koncentrowano na badaniu wpływu wzmocnienia w odniesieniu do dynamicznego osiowego zgniatania i powiązanych wskaźników odporności na zderzenie (przed dynamicznym osiowym zgniataniem; Bambach, 2014). Jai-Woo Park i in. badali zachowanie stalowych słupków cienkościennej o przekroju kwadratowym ściskanych osiowo, wzmocnionych za pomocą CFRP. Łącznie badaniu poddali osiem próbek i na podstawie uzyskanych wyników stwierdzili, że zastosowanie wzmocnienia całości przekroju trzema warstwami CFRP z włóknami ułożonymi poprzecznie do kierunku działania siły, pozwoliło na zwiększenie obciążenia maksymalnego o 33%. Opracowali także

modele MES, które potwierdzają wzrost sztywności wzmocnionych słupów (Jai-Woo Park i in., 2013). Nad badaniami ściskanych osiowo stalowych cienkościennych kolumn o przekroju kwadratowym pracowali także Mohamed Imran i in. Zastosowali oni wzmocnienie z przyklejonych mat CFRP wokół całego przekroju i wykazali, że tak przygotowane próbki były w stanie przenieść 2,6 razy większą wartość siły ściskającej do momentu pojawienia się pierwszych lokalnych postaci wyboczenia względem próbek niewzmocnionych. W celu wykonania szerszych analiz opracowali także model numeryczny w programie Abaqus (Imran i in., 2018). Michael Richard Bambach i in. opisali zachowanie ściskanych osiowo zimno-giętych kształtowników o przekroju kwadratowym wzmocnionych CFRP. W badaniu materiał kompozytowy naklejano warstwami wokół przekroju, tak że układ włókien w pierwszej warstwie był prostopadły do kierunku obciążenia, a w kolejnej warstwie – równoległy. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie CFRP opóźniło znacząco wyboczenie miejscowe, a wytrzymałość na wyboczenie sprężyste została zwiększona nawet czterokrotnie (Bambach i in., 2009). Informacje zawarte w pracy stanowią rozszerzenie analogicznych badań opisanych przez M.R. Bambacha i in. Autor opracował metodę projektową do określenia nośności na ściskanie osiowe elementów wzmocnionych CFRP obwodowo, której wyniki wykazały zgodność z 45 próbkami poddanymi badaniom laboratoryjnym (Bambach, 2007). Jak podkreśla autor pozycji, w przypadku ściskania osiowego motywacją do wzmacniania cienkościennych konstrukcji stalowych za pomocą CFRP jest umożliwienie kontroli deformacji wyboczeniowych oraz zapewnienie zwiększonej nośności na ściskanie (Bambach, 2014). Ashvini i in. poddali próbie osiowego ściskania krótkie próbki o przekroju okrągłym wzmocnione CFRP na całym obwodzie, oraz nieposiadające wzmocnienia. Uzyskane wyniki wskazują na zdecydowany wzrost nośności elementów z zastosowanym wzmocnieniem (Ashvini i in., 2015). Bardziej złożony element cienkościenny o przekroju zamkniętym analizowali Xiao Han i in. Przeprowadzili oni badanie stalowej cienkościennej belki o przekroju kapelusza z doklejoną płytą stalową tak, by otrzymać przekrój zamknięty. Belka została pokryta laminatem wykonanym z włókien CFRP, a następnie poddana ściskaniu osiowemu. Badanie miało na celu analizę procesu pęknięcia w warstwie CFRP oraz w warstwie kleju. Ujawniono, że w warstwie CFRP ma miejsce międzywarstwowy mechanizm zniszczenia. Równocześnie prowadzono

analizy numeryczne i na podstawie opracowanej techniki modelowania stwierdzono, że można dokładnie przewidzieć i ocenić typ pęknięcia w wiążce CFRP, a także uszkodzenie międzyfazowe w warstwie klejowej i matrycy kompozytowej (Han i in., 2019).

Nuno Silvestre i in. przedstawili badanie 19 próbek wykonanych z cienkościennego ceownika poddanych ściskaniu. Analizowano siedem różnych lokalizacji materiału CFRP oraz dwa sposoby ułożenia włókien. Celem pracy było zbadanie wpływu CFRP na sposób pracy elementu oraz określenie obciążeń granicznych, które były wyznaczane poprzez pojawienie się różnych mechanizmów zniszczenia. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wzmocnienie całego przekroju ceowego pozwoliło w badanych warunkach na wzrost maksymalnego obciążenia o 20%. Badania wykorzystano do opracowania szczegółowego modelu w programie Abaqus (Silvestre i in., 2008). Ci sami autorzy rok później zaproponowali rozszerzenie wytycznych projektowych zawartych w Eurokod 3 i AISI-DSM o wskazówki dotyczące projektowania ściskanych elementów cienkościennych o przekroju ceowym wzmocnionych CFRP (Silvestre i in., 2009). Hongyuan Tang i in. przedstawili wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych stalowych elementów cienkościennych o przekroju ceowym ściskanych mimośrodowo, które zostały wzmocnione materiałem CFRP ułożonym poprzecznie do kierunku działania obciążenia, w odstępach od 50 mm do 150 mm. Przeprowadzone testy wskazują, że zastosowanie pasów CFRP spowodowało znaczący wzrost nośności granicznej elementu, a rozstaw pasów CFRP ma wpływ na formę wyboczenia elementu (Tang i in., 2016). Podobny eksperyment przeprowadzili Essam Amoush i in., wykonując badanie ściskanych osiowo cienkościennych prętów o przekroju ceowym wzmocnionych przy użyciu taśm CFRP, przyklejonych prostopadle do kierunku działania siły, w stałych odstępach na długości elementu oraz wzmocnionych na całej powierzchni przekroju. Opisał on także analizy numeryczne opracowane w programie ANSYS (Amoush i in., 2018). Z kolei Sreedhar Kalavagunta i in. opisali procedury obliczeniowe dotyczące nośności osiowej formowanych na zimno elementów o przekroju ceowym wzmocnionych CFRP. Ponadto na podstawie badań eksperymentalnych zaobserwowano znaczny wzrost siły spowodowany wzmocnieniem CFRP. W badaniu uzyskano wzrost nośności na ściskanie do 13,55% – w przypadku wzmocnienia samego

środnika i do 19% – w przypadku wzmocnienia całego przekroju elementu (Kalavagunta i in., 2013).

Amirreza Bastani i in. omówili zachowanie uszkodzonych stalowych cienkościennych belek dwuteowych poddanych modernizacji za pomocą maty z włóknami węglowymi (CFRP). Uszkodzenie symulowano przez miejscowe zmniejszenie grubości dolnej półki stalowych belek. Badaniu w schemacie czteropunktowego zginania poddano osiem próbek, a na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że nośność uszkodzonej belki można w pełni przywrócić do poziomu belki nieuszkodzonej, jeśli zostanie użyta odpowiednia liczba warstw CFRP. Opracowano także model numeryczny i uzyskano zadowalającą zgodność wyników uzyskanych w programie z wynikami badań laboratoryjnych (Bastani i in., 2019). Zhao i in. opisali badanie usztywnionej przy pomocy CFRP ściskanej belki ze stali lekkiej LSB (*lightweight steel beam*). Badane próbki wzmocniono na trzy sposoby – umieszczając maty CFRP po zewnętrznej lub wewnętrznej stronie środnika lub po obu stronach. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastosowanie obustronnego usztywnienia środnika pozwala zwiększyć nośność przekroju na wyboczenie od 3 do 5 razy, względem próbki nieusztywnionej (Zhao i in., 2009).

Z kolei Lewei Tong i in. przedstawili badanie zmęczeniowe cienkościennych stalowych płyt spawanych doczołowo wzmocnionych za pomocą arkuszy CFRP. Wykonano łącznie 34 próbki ze wzmocnieniem jednostronnym i dwustronnym oraz różną ilością warstw CFRP. Stwierdzono, że trwałość zmęczeniowa spawanych doczołowo płyt stalowych ze wzmocnieniem CFRP wzrosła około dziesięciokrotnie względem próbek nieposiadających wzmocnienia. Najlepsze rezultaty otrzymano dla próbek z dwustronnym wzmocnieniem trzema warstwami CFRP, ich wytrzymałość zmęczeniowa przy 2 milionach cykli wzrosła o 34% w porównaniu z próbkami bez wzmocnienia CFRP (Tong i in., 2020).

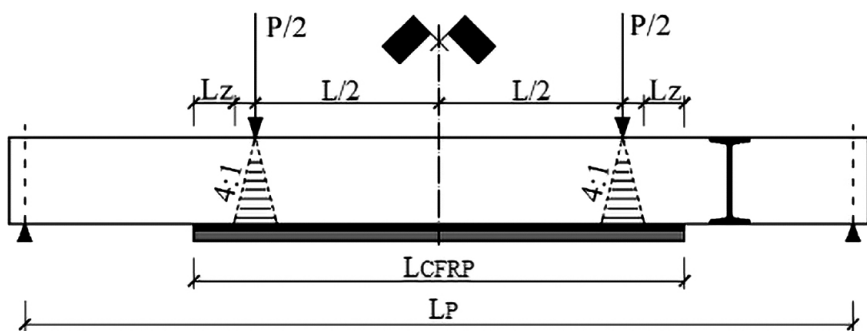
Zdecydowana większość z przytoczonych prac dotyczy badań elementów poddanych ściskaniu. W przypadku zginanych belek cienkościennych w literaturze pojawia się wiele prac dotyczących wzmacniania przekrojów cienkościennych wypełnionych betonem lub wzmacniania belek cienkościennych poprzez doklejanie płyt stalowych. Przykładowo Gabriel Kubiniec opisał badanie cienkościennego dźwigara o przekroju skrzynkowym z doklejonymi stalowymi blachami do środnika i wykazał, że doklejenie elementów płytowych podnosi

nośność bardziej niż chociażby stosowanie dodatkowego uźebrowania (Kubiniec, 2008). Warto jednak pamiętać, że doklejanie elementów stalowych do konstrukcji cienkościennych (w przeciwieństwie do materiałów kompozytowych) znacząco zwiększa ciężar konstrukcji.

2.4. Długość zakotwienia taśm CFRP

Przed przystąpieniem do badań dotyczących wzmacniania konstrukcji stalowych przy użyciu taśm CFRP bardzo ważne jest prawidłowe dobranie długości taśmy. W dostępnych raportach naukowych pojawiają się prace mówiące o prawidłowym doborze długości zakotwienia taśm CFRP (L_z) w przypadku wzmocnienia elementów stalowych walcowanych na gorąco (Deng i in., 2007) lub dźwigarów mostowych (Nozaka i in., 2005), przy czym zalecane w nich długości zakotwienia taśmy CFRP miały różną wartość. Ponadto w literaturze trudno jest znaleźć jednoznaczną definicję długości efektywnej, którą interpretuje się na wiele sposobów. Na podstawie przeprowadzonych badań złącza rur stalowych o wysokiej wytrzymałości Hui Jiao i in. określili efektywną długość zakotwienia taśm CFRP (L_z) równą 75 mm (2004). Katsuyoshi Nozaka i in. opublikowali wyniki badań dźwigarów stalowych uszkodzonych w wyniku zginania. W swoich badaniach zdefiniowali długość zakotwienia jako najkrótszą długość, która pozwala na przekazanie największego obciążenia na taśmę CFRP. Na podstawie badań pięciu rodzajów kleju długość tę określili jako około 203 mm (Nozaka i in., 2005). Trent C. Miller i in. stwierdzili, że 98% wartości przenoszonych sił odbywa się w odległości 100 mm od końca taśmy CFRP (2001). Natomiast Maciej Kowal analizował trzy długości zakotwienia taśmy CFRP – 65 mm, 165 mm i 265 mm. Potwierdził on, że prawie wszystkie siły przenoszone z belki stalowej na taśmę CFRP występują w odległości około 70 mm od końca taśmy CFRP, a tylko w przypadku długości zakotwienia równej 265 mm zaobserwował uplastycznienie stali przed odspojeniem taśmy CFRP. Ta długość zakotwienia dała najlepszą wytrzymałość układu wzmocnienia (Kowal, 2015). W przypadku określenia długości zakotwienia taśmy CFRP służącej do wzmocnienia elementu cienkościennego, Amireza Bastani i in. przy wzmocnieniu belek o przekroju teowym zastosowali długość zakotwienia równą 31 cm, jednak nie była ona poparta żadnymi analizami (2019). Katarzyna Rzeszut i in.

na podstawie analiz numerycznych wykonanych w programie Abaqus stwierdzili, że wystarczająca jest efektywna długość zakotwienia wynosząca 70 mm, jednak analizowali jedynie odkształcenia zginanych belek cienkościennych (2019). Należy podkreślić, że w celu sformułowania jednoznacznych wniosków istnieje potrzeba rozszerzenia tych analiz o wpływ długości zakotwienia na przemieszczenia belek. Bazując na zaleceniach płynących z aktualnego stanu wiedzy w zakresie długości kotwienia taśm CFRP, w niniejszej monografii przyjęto efektywną długość zgodnie ze schematem przedstawionym na rycinie 2.1, gdzie L_p oznacza rozstaw podpór, L_{CFRP} długość taśmy CFRP, a L_z efektywną długość zakotwienia taśmy CFRP.



Ryc. 2.1. Schemat definiujący określenie długości zakotwienia taśm CFRP

Geneza tematu

3.1. Wzmacnianie stalowych profili cienkościennych o przekroju sigma

W przytoczonych we wstępie przykładach badań nie wymieniono belek cienkościennych o przekroju typu sigma. Choć profile typu sigma są produkowane przez większość producentów elementów stalowych profilowanych na zimno i mogą być z powodzeniem wykorzystywane w praktyce inżynierskiej, chociażby jako płatwie dachowe w halach stalowych, to ilość badań laboratoryjnych z udziałem tego typu profilu stalowego jest ograniczona. W 1990 roku A.C.R. Djughash i in. opisali badania stalowych belek cienkościennych o przekroju sigma (1990). W 1994 roku Laine i in. przedstawili badania eksperymentalne dotyczące nośności granicznej płatwi cienkościennej o przekroju sigma (1994). Także w późniejszych latach ukazały się publikacje dotyczące badań stalowych płatwi typu sigma, jak np. w pracy Jiana Yanga i in., jednak skupiono się w nich na badaniu połączeń, a nie na pracy całego elementu (2012). W 2002 roku pojawiła się praca K. Rzeszut dotycząca analizy stateczności prętów o przekroju sigma bazująca na analizach numerycznych (2002). Z kolei Luis Laím i in. opisali serię prób zginania belek wykonanych z jednego lub dwóch profili typu sigma w warunkach pożaru (2015). Qiang Liu i in. przedstawili badanie belek ciągłych z profilu typu sigma, skupiając się na zachowaniu belki przy podporze pośredniej (2011), a publikacja M. Anbarasu z 2019 roku zawiera badania laboratoryjne i analizy numeryczne belek o przekroju zamkniętym, wykonanym z dwóch profili sigma. Nieliczne i pochodzące z poprzednich dekad opracowania dotyczące pracy belek wykonanych z pojedynczego profilu typu sigma stały się motywacją

do wyboru przez autorkę tego rodzaju przekroju poprzecznego jako przedmiotu badań w niniejszej pracy (Anbarasu, 2019).

Kolejną motywacją do podjęcia badań dotyczących wzmacniania stalowych cienkościennych belek typu sigma przy użyciu taśm CFRP stał się przypadek wzmacniania belek profilowanych na zimno realizowany w praktyce inżynierskiej. Mianowicie w hali jednego z supermarketów w Poznaniu zaistniała konieczność wzmocnienia płatwi dachowych, wykonanych z kształtowników giętych na zimno. Na podstawie przeprowadzonej ekspertyzy finalnie zalecono wykonanie wzmocnienia poprzez przyklejenie taśm CFRP do spodu dolnej półki profilu, tj. półki rozciąganej. Najprawdopodobniej zalecenie to zostało sformułowane na podstawie doświadczeń zdobytych przy wzmacnianiu konstrukcji betonowych. Wiąże się to z faktem, że, jak to już wcześniej wspomniano, zasady stosowania taśm CFRP do wzmacniania konstrukcji betonowych są obecnie powszechnie znane, natomiast brak jest jasnych wytycznych projektowych czy programów do projektowania wzmocnień konstrukcji stalowych opracowywanych przez producentów materiałów kompozytowych. W związku z tym pojawiła się wątpliwość, czy stosowanie wzmocnienia konstrukcji stalowych za pomocą taśm CFRP, w analogiczny sposób jak w przypadku konstrukcji betonowych, jest merytorycznie poprawne i ekonomicznie uzasadnione.

Podsumowując, z uwagi na coraz powszechniejsze wykorzystanie elementów cienkościennych w konstrukcjach stalowych konieczne jest opracowanie skutecznych i szybkich metod ich wzmacniania. Ograniczona liczba opublikowanych badań naukowych dotyczących pracy zginanych belek cienkościennych wykonanych z pojedynczych profili typu sigma, brak jasnych wytycznych projektowych dotyczących wzmocnienia takich konstrukcji oraz brak badań dotyczących wzmocnienia profili typu sigma przy użyciu taśm CFRP w połączeniu z licznymi zapytaniami płynącymi ze strony przemysłu stały się bezpośrednią motywacją do podjęcia przez autorkę tej tematyki.

3.2. Cel pracy

Podstawowym celem pracy jest analiza efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych typu sigma taśmami CFRP.

W odniesieniu do niewielkiej liczby dostępnych badań naukowych oraz potencjalnej możliwości rozszerzenia zakresu stosowania materiałów kompozytowych do wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych w monografii sformułowano dwa główne problemy badawcze:

1. Jaki wpływ ma zastosowanie taśm CFRP na ograniczenie odkształceń i przemieszczeń cienkościennych belek stalowych o przekroju sigma.
2. Czy zastosowanie taśm CFRP może stanowić efektywne wzmocnienie cienkościennych belek stalowych o przekroju sigma.

4.1. Nowoczesne i tradycyjne metody pomiarowe – przegląd literatury

Nośność stalowych konstrukcji cienkościennych oraz sposób ich pracy pod zadaniem obciążeniem są ściśle związane z kształtem elementu oraz z wszelkimi imperfekcjami geometrycznymi. Od momentu ujawnienia znacznego wpływu parametrów przekroju na odpowiedź konstrukcji cienkościennych zaczęto przykładać ogromną wagę do kontroli parametrów geometrycznych, zarówno podczas procesu produkcji, jak i w czasie pracy stalowych elementów cienkościennych. Złożoność kształtów konstrukcji cienkościennych wymusza ciągle poszukiwanie najlepszych, a zarazem najszybszych sposobów pomiarów geometrii. Jak stwierdził Babcock w swojej pracy z 1974 roku, „najważniejszym problemem, przed którym stoi naukowiec, jest wpływ początkowych niedoskonałości na obciążenia wyboczeniowe uzyskane eksperymentalnie”.

Dużo uwagi poświęcono pomiarom stalowych cienkościennych struktur powłokowych. Według Josefa Singera pierwsze automatyczne systemy pomiarowe zostały opracowane pod koniec lat 60. XX wieku, kiedy wpływ imperfekcji geometrycznych przy ocenie nośności elementu cienkościennego został uznany za kluczowy (1995). Jeden z pierwszych systemów pomiarowych, GALCIT, został opracowany w Instytucie Technologii w Kalifornii w 1968 roku i składał się z bezdotykowego, pojemnościowego czujnika, który umożliwiał pomiar niedoskonałości wewnątrz próbek o wymiarze podłużnym i poprzecznym ograniczonym do 200 mm (De Vries, 2009). Podobny system pomiarowy, ale umożliwiający jedynie pomiar zewnętrznych imperfekcji geometrycznych powłok opracował Anthony P. Coppa w 1965 roku. Siłą napędową do rozwoju nowoczesnych metod pomiarowych stalowych i kompozytowych elementów powłokowych

stał się przemysł kosmiczny i lotniczy (Coppa, 1965). W pracy Richarda Degenhardta i in. do pomiaru początkowych niedoskonałości geometrycznych elementów powłokowych wykorzystano system ATOS, cyfrowy „digitalizator” o wysokiej rozdzielczości, który w krótkim czasie dostarcza precyzyjne, trójwymiarowe dane pomiarowe (Degenhardt i in., 2007). Z kolei Morana Mihaljević i in. szczegółowo opisali ultradźwiękowe pomiary grubości ścianek elementów stosowanych w lotnictwie i zbiornikach ciśnieniowych (2019). W publikacji Juna He i in. zaprezentowano układ robota pomiarowego, oparty na laserowym systemie śledzenia, który umożliwiał pomiar okrągłości i współosiowości powłok stalowych w procesie walcowania (2012). System pomiarowy do pomiaru imperfekcji geometrycznych i grubości stalowych cienkościennych konstrukcji cylindrycznych za pomocą dwóch czujników laserowych omówiono w pracy Pavla Lyssakowa i in (2019).

Do rozwoju nowoczesnych technik pomiarowych przyczynił się także przemysł energetyczny. W tym przypadku nie są to badania laboratoryjne, a pomiary prowadzone często na pracujących urządzeniach. Aby zapewnić bezpieczną eksploatację instalacji ciepłowniczych prowadzony jest monitoring oraz testy diagnostyczne, a uzyskane dane służą do planowania harmonogramu przeglądów. W pracy Krzysztofa Malowanego i in. przedstawiono wykorzystanie skanera laserowego ToF (*time of flight*) do pomiaru parametrów geometrycznych bębna kotłowego w elektrowni. Pomiar skanerem ToF dostarcza chmurę punktów, która następnie jest łączona z modelem cylindra, dane 3D są rzutowane na mapę 2D, a następnie są poddawane interpolacji i filtrowaniu danych. W rezultacie można odczytać potrzebne wymiary i sprawdzić tolerancje wymiarowe (Malowany i in., 2015). Małgorzata Kujawińska i in. wykorzystali cyfrową korelację obrazu i zintegrowaną metodę termowizji DIC (*digital image correlation*) do monitorowania i kontroli procesów naprawczych prowadzonych w elektrowniach, a także do kontroli procesu wyżarzania spoin w bębnie kotłowym i rurach parowych. System sprawdził się także podczas pomiarów zmian geometrii rur parowych w stanie gorącym i zimnym (Kujawińska i in., 2012).

Jak opisują Tsuchin Philip Chu i in., działanie systemu cyfrowej korelacji obrazu opiera się na odpowiednim oświetleniu obiektu, analizie intensywności wiązki światła odbitego od powierzchni w kształcie pierwotnym $f(x, y)$ przed przyłożeniem obciążenia i dowolnej powierzchni $f1(x1, y1)$ po przyłożeniu obciążenia, powodującego deformację.

Umożliwia to pomiar przemieszczeń w strefach o niewielkiej powierzchni, a następnie pozwala uzyskać taki pomiar na rzeczywistej, większej powierzchni obiektu (Chu i in., 1985). Systemy do cyfrowej korelacji obrazu dzielą się na systemy przeznaczone do analizy dużych deformacji (jak np. Aramis 4M), i małych (np. MicroDIC; Kowalewski i in., 2015). Zasada działania każdego z nich bazuje na zależnościach, które obowiązują w mechanice ośrodków ciągłych. Szczegółowy opis zasady działania systemów korelacji obrazu wraz ze schematycznymi rysunkami przedstawiono w pracy Zbigniewa Kowalewskiego i in. (2015). Systemy DIC przeznaczone do badań dużych deformacji mogą być z powodzeniem wykorzystywane do wyznaczania modułu Younga, współczynnika Poissona, analiz procesów wzmacniania lub osłabienia materiału, a także w badaniach materiałów o dużej ciągliwości i przy wyznaczaniu parametrów mechaniki pęknięcia. Na przykład w pracy Mohamada Ali-Ahmada i in. (2006) zastosowano system pomiaru korelacji obrazu 2D do oceny odkształceń w testach odrywania, przeprowadzonych na kompozytach FRP przyklejonych do bloków betonowych. Z kolei w artykule Elyasa Ghafooriego i in. (2011) dotyczącym badania pęknięcia stalowych belek o przekroju teowym trójwymiarowy cyfrowy system korelacji obrazu posłużył do zilustrowania wzoru ewolucji naprężeń i strefy plastyczności wokół wierzchołka pęknięcia, umożliwiając w ten sposób dalszą weryfikację modeli teoretycznych. System pomiarowy Aramis, opierający się na trójwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu, wykorzystany został przez Władysława Zieleckiego i in. (2013). do pomiaru względnego przemieszczenia elementów klejonych i analizy odkształcenia warstwy kleju w złączu (dwóch próbek stalowych) poddanych obciążeniu oddzierania (obciążeniu wywołującemu naprężenia normalne do warstwy kleju). Cezary Ajdukiewicz i in. przy pomocy tego systemu dokonywali identyfikacji rys w elementach betonowych, a Krystyna Urbańska wykorzystała Aramis do pomiaru odkształceń konstrukcji murowych (2017). W swojej pracy Rafał Oliwa opisał użycie systemu do trójwymiarowego pomiaru odkształceń na powierzchni próbki z kompozytów polimerowych w trakcie określania naprężenia ścinającego dla laminatów. Przytoczone przykłady przeprowadzonych badań wskazują na możliwość wykorzystania systemów cyfrowej korelacji obrazu w badaniach wszystkich typów materiałów (Oliwa, 2015).

Systemy te mogą być także wykorzystane do analizy konstrukcji budowlanych o skomplikowanym kształcie. W pracy Krzysztofa

Malowanego i in. (2019) pomiary wykonane systemem DIC posłużyły do walidacji modelu numerycznego MES stalowego elementu w kształcie łuku. Marcin Malesa i in. (2010) przedstawili adaptacje systemu DIC do monitorowania istniejących konstrukcji inżynierskich na przykładzie mostu kolejowego w Nieporęcie. Z kolei Zhao i in. wykorzystując metodę cyfrowej korelacji obrazu (DIC), analizowali wyboczenie cienkościennych rur stalowych. W celu szczegółowej obserwacji wyboczenia i zapisu przemieszczeń powierzchni podczas badania wykorzystali oni dwie kamery cyfrowe o wysokiej rozdzielczości. Uzyskane dane poddali analizie i porównywali przy pomocy specjalnej techniki korelacji, która pozwala określać przemieszczenia powierzchni powłok cylindrycznych (Zhao i in., 2013). Bardzo interesujące badania opisano w pracy Stanisława Radkowskiego i in. Prowadząc badania kratownicy, opracowano system monitorujący, złożony z czujników optycznych, czujników tensometrycznych i czujników pola magnetycznego. W artykule przedstawiono studium porównawcze różnych technik pomiarowych, które umożliwiają pomiary lokalnych odkształceń. Wykorzystując pary kamer oraz technikę cyfrowej korelacji obrazu, przedstawiono możliwość pomiaru przemieszczeń w dwóch płaszczyznach. Z kolei pomiar zmian pola magnetycznego analizowanej konstrukcji stalowej pozwala uzyskać informacje diagnostyczne o rodzaju odkształcenia i intensywności naprężeń (Radkowski i in., 2011).

Masataka Tsuji i in. (2011), badając pękanie stalowych rur cienkościennych, do pomiaru deformacji próbek wykorzystali system uprzednio skalibrowanych sześciu kamer, który z obrazów opartych na metodzie bezpośredniej transformacji liniowej (DLT – *direct linear transformation*) za pomocą trójwymiarowego oprogramowania do analizy ruchu (DITECT, 2011) umożliwił zbudowanie układu współrzędnych w przestrzeni wirtualnej. W pracy dotyczącej zachowania belek stalowych wzmocnionych płytami CFRP optyczny system korelacji obrazu (ICS – *image correlation system*) posłużył do śledzenia wierzchołka pęknięcia, obserwacji rozwoju pęknięcia i dostarczył informacji o rozkładzie naprężeń w jego pobliżu (Ghafoori i in., 2012).

W przeciwieństwie do opisanych elementów powłokowych, w badaniach naprężeń i odkształceń elementów belkowych i słupowych dominują bardziej tradycyjne metody. Do pomiarów odkształceń w ściskanych osiowo: cienkościennych stalowych dwuteownikach ażurowych (Różyło i in., 2016) cienkościennych elementach kompozytowych o przekroju

ceowym (Dębski i in., 2013, Dębski i in., 2016), cienkościennych słupach o przekroju teowym (Salem i in., 2005), cienkościennych stalowych słupach wykonanych z różnych układów kątowników (Vishnuvardhan i in., 2008) lub o przekroju krzyżowym (Guru Agastheesh i in., 2016), wykorzystywano tensometri elektrooporowe. Również w przypadku badań laboratoryjnych stalowych cienkościennych belek o przekrojach ceowym, ceowym z usztywnionymi półkami (Obst i in., 2016, Paczos, 2014), sigma (Rzeszut i in., 2017 Szewczak i in., 2016), poddanych zginaniu, do pomiaru odkształceń wykorzystano tensometri elektrooporowe. Z informacji zawartych w publikacjach wynika, że także do pomiarów przemieszczeń dla różnych badanych elementów wykorzystywane są te same urządzenia. Do kontroli przemieszczeń ściskanych osiowo cienkościennych słupów stalowych o przekroju teowym (Salem i in., 2005), słupów wykonanych z połączeń kątowników (Vishnuvardhan i in., 2008) wykorzystywano tradycyjne czujniki zegarowe o dokładności 0,01 mm. W badaniach zginanych stalowych belek cienkościennych o nietypowym przekroju ceowym (Obst i in., 2016, Paczos, 2014), sigma (Rzeszut i in., 2017) oraz w badaniu ściskanych osiowo stalowych cienkościennych ceowników z przetłoczeniem na obu pasach lub na średniku (Kwon i in., 2009), do pomiaru przemieszczeń wykorzystano czujniki indukcyjne. Również w pracy Leona Ślęczki i in. (2007), w której celem była m.in. ocena głównych właściwości połączeń stalowych regałów magazynowych, aby ocenić obroty końcowe belek w badaniu eksperymentalnym zastosowano po dwa tradycyjne czujniki zegarowe na każdej belce (obróć belki wyznaczano, dzieląc względne przemieszczenie skrajni przez odstęp między nimi).

W pracy Huberta Dębskiego i in. (2016) przemieszczenia badanych ściskanych osiowo cienkościennych prętów o przekroju ceowym mierzono laserowym czujnikiem ugięć, a we wcześniejszej (Dębski i in., 2013) analogowym czujnikiem laserowym optoNCDT1605. Znacznie dokładniejszy pomiar przemieszczeń ściskanych osiowo słupów o przekroju ceowym z wykorzystaniem systemu fotogrametrii 3D omówiono w pracy M.R. Bambacha i in. (2009).

Nowoczesne metody pomiarowe mogą także umożliwić monitorowanie stanu konstrukcji w sposób zdalny. W pracy Szymona Gontarza i in. (2014) w opozycji do powszechnie stosowanych metod określania stanu technicznego konstrukcji (umożliwiających kontrolę pęknięć czy ocenie degradacji materiału konstrukcyjnego) zaproponowano szereg

metod opierających się na porównawczych pomiarach tensometrycznych, przyspieszeniowych i magnetycznych.

Warto podkreślić, że w badaniach konstrukcji cienkościennych w większości przypadków mamy do czynienia ze złożonym stanem naprężeń, zatem pomiar odkształceń prowadzony przy użyciu liniowych tensometrów elektrooporowych nie pozwala na pełną analizę odpowiedzi konstrukcji na zadane obciążenie. Pewnym rozwiązaniem może być wykorzystanie tensometrów elektrooporowych w formie rozet, jednak ich zastosowanie znacząco podnosi koszty badań. Ponadto w większości badań, szczególnie gdy analizujemy element o przekroju monosymetrycznym, pojawiają się skręcanie lub duże deformacje, których pomiar przy użyciu tradycyjnych czujników przemieszczeń jest nieefektywny.

4.2. Metody wykorzystywane do pomiaru wstępnych imperfekcji geometrycznych

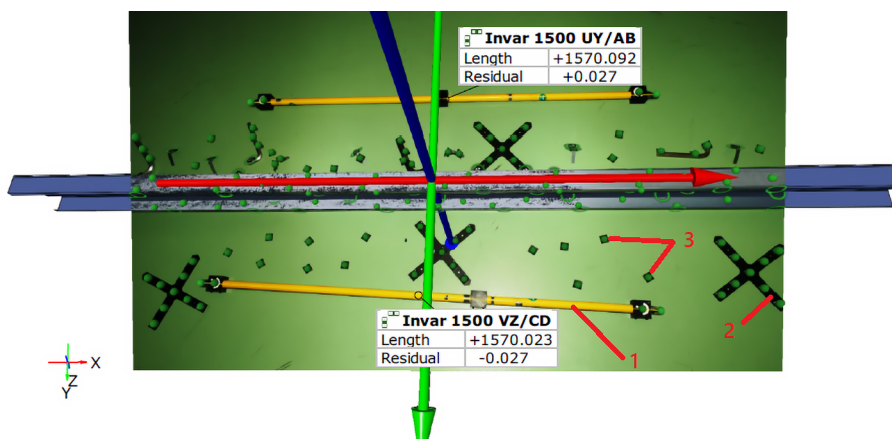
Na pracę stalowych cienkościennych prętów znaczny wpływ mają wstępne imperfekcje geometryczne. Ich prawidłowa identyfikacja umożliwia wnikliwą analizę odpowiedzi konstrukcji na zadane obciążenie oraz opracowanie szczegółowego modelu numerycznego. Luka Pavlovčič i in. (2012) wykonywali pomiar wstępnych imperfekcji geometrycznych stalowych słupów cienkościennych o przekroju skrzynkowym za pomocą trzech przetworników i płytki pomiarowej, z kolei Jurgen Bacque i in. (2009) mierzyli imperfekcje geometryczne stalowych elementów cienkościennych o przekroju ceowym za pomocą trzech czujników laserowych umieszczonych na jednym ramieniu przesuwanym za pomocą silnika elektrycznego wzdłuż próbki, wykonując pomiar co 1 mm. Również Jun Ye i in. (2019) przed badaniem belek cienkościennych wykonanych z łączonych ze sobą dwóch prętów o przekroju ceowym zarejestrowali wstępne imperfekcje geometryczne prętów przy użyciu specjalnie zaprojektowanego urządzenia pomiarowego wykorzystującego czujniki laserowe.

4.3. Metody pomiarowe wykorzystane w pracy

Odnosząc się do badań laboratoryjnych stalowych belek cienkościennych na podstawie przytoczonych publikacji, można stwierdzić, że pomiar

przemieszczeń prowadzony tradycyjnymi czujnikami zegarowymi lub czujnikami indukcyjnymi jest wystarczający, pod warunkiem, że badane elementy nie ulegają skręcaniu. W pracy Katarzyny Rzeszut i in., w której przedstawiono badania zginanych belek cienkościennych o przekroju sigma, z powodu znacznego skręcania belek i dużych przemieszczeń w kierunku prostopadłym do osi belki odczyty z zastosowanych czujników indukcyjnych były obciążone błędem, ponieważ w trakcie badania czujnik zsuwał się z pierwotnego punktu pomiarowego. Dlatego w przypadku kolejnych badań zginanych stalowych belek cienkościennych zdecydowano się wykorzystać optyczny system pomiarowy (Rzeszut i in., 2017).

W badaniach wykorzystano optyczne urządzenie do pomiaru współrzędnych 3D – Tritop. Jest to przenośny system umożliwiający precyzyjne i szybkie pomiary współrzędnych trójwymiarowych obiektów. Nie wymaga on złożonego, ciężkiego i trudnego w eksploatacji sprzętu. Składa się z aparatu, z którego za pomocą oprogramowania GOM Correlate zdjęcia obiektu są przesyłane bezpośrednio do komputera. Oprogramowanie pozwala kontrolować poprawność wykonanych zdjęć, bazując na zakodowanych punktach i dwóch wzorcach długości, wykonanych ze stopu inwar. Inwar jest stopem, którego średni współczynnik rozszerzalności cieplnej w zakresie temperatur 20–100°C jest mniejszy niż $1,3 \times 10^{-6}/K$, (1,3 ppm/K). W przypadku stali zwykłych współczynnik ten zawiera się w przedziale 11–15 ppm. Standardowy wzorzec długości jest certyfikowany w temperaturze 20°C. Podczas testów obok analizowanego obiektu umieszczane są dwa wzorce długości, tak aby jeden wzorzec umożliwiał kontrolę drugiego. Ponadto system podaje odczyty temperatury otoczenia, co pozwala na bardzo dokładny pomiar.



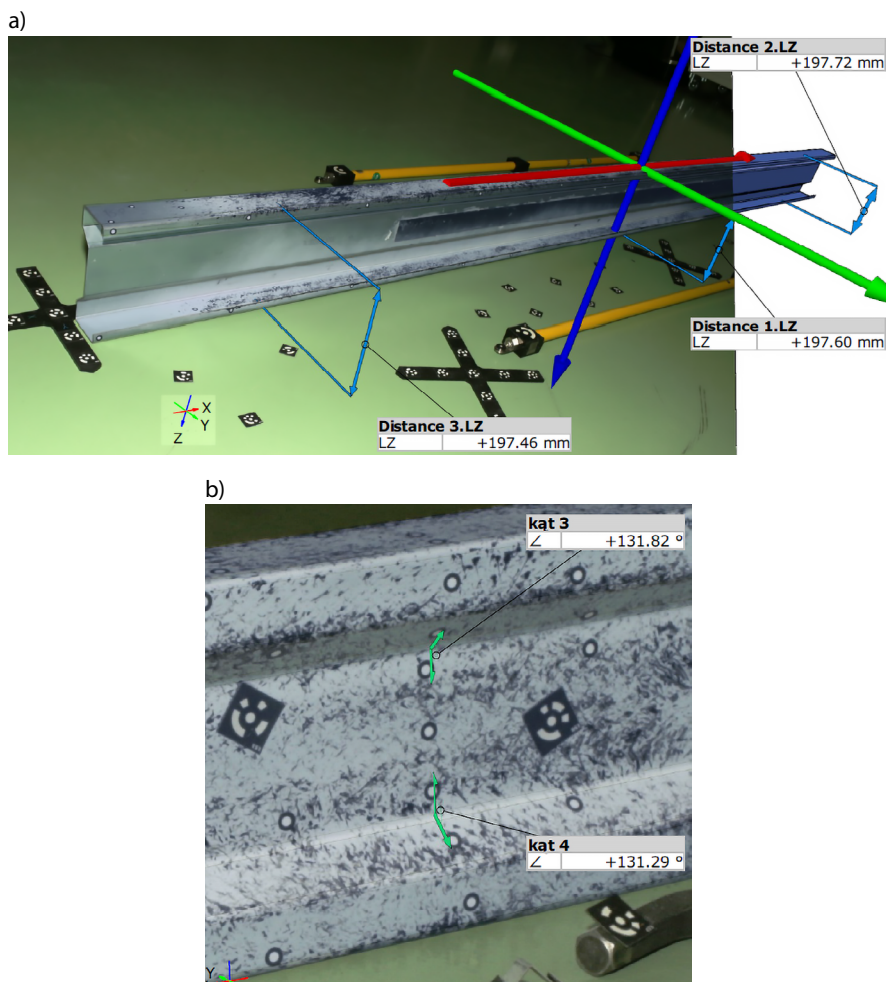
Ryc. 4.1. Pomiar imperfekcji geometrycznych belek za pomocą TRITOP. 1 – wzorzec długości wykonany z inwaru, 2 – duże zakodowane punkty, 3 – małe zakodowane punkty

W pierwszej fazie badań system Tritop został wykorzystany do pomiaru wstępnych imperfekcji geometrycznych badanych belek. Przed przystąpieniem do badań próbki muszą być specjalnie przygotowane, co omówiono w rozdziale 7.1.2. Cyfrową interpretację zdjęcia wykonanego podczas pomiaru systemem Tritop, uzyskaną przez zastosowanie oprogramowania GOM Correlate pokazano na rycinie 4.1. Pomiar jest prosty i polega na wykonaniu serii prawidłowych zdjęć. Tritop wyłapuje biały punkt pomiarowy umieszczony na testowanym elemencie, a także zakodowane punkty użyte do utworzenia układu współrzędnych. Jeśli zdjęcie nie zawiera odpowiedniej liczby punktów pomiarowych i kodowanych, system informuje o tym za pomocą sygnału dźwiękowego. Po prawidłowym wykonaniu zdjęć wszystkie punkty powinny podświetlać się na zielono, co jest widoczne na rycinie 4.1.

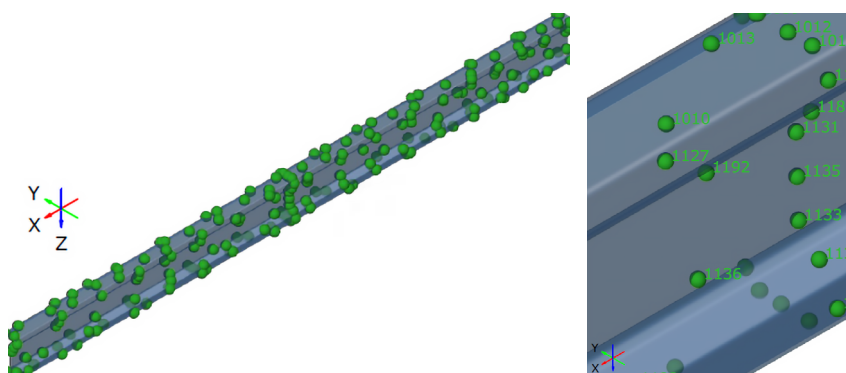
Oprogramowanie Tritop działa na zasadzie fotogrametrii bliskiego zasięgu. Na podstawie serii zdjęć system odczytuje kąt wykonania pomiaru z dwóch stron elementu i umożliwia odtworzenie zewnętrznej orientacji obrazów w oparciu o wzorzec i rozmieszczenie zakodowanych punktów. Pozwala to na precyzyjne określenie poszczególnych wymiarów elementu w układzie współrzędnych 3D oraz pomiar kątów między płaszczyznami, co przykładowo zaprezentowano na rycinie 4.2.

Pomiar wstępnych imperfekcji geometrycznych z wykorzystaniem systemu opisano w rozdziale 7.1.3 niniejszej pracy.

Kolejną część pracy stanowił pomiar przemieszczeń zginanych belek. W tym celu wykorzystano system Aramis z dwoma soczewkami. Zastosowanie dwóch systemów wynikało z potrzeby wykonania pomiaru przemieszczeń z obu stron belki. Aby zapewnić współpracę między dwoma systemami pomiarowymi Aramis, stworzono wspólny układ współrzędnych. Wykorzystano do tego punkty pomiarowe znajdujące się na próbkach (naniesione wcześniej w celu dokonania pomiarów geometrii za pomocą systemu Tritop; ryc. 4.3). Przed każdym pomiarem system był kalibrowany za pomocą krzyża pomiarowego.



Ryc. 4.2. Pomiary geometrii za pomocą maszyny Tritop, pomiar:
a) wysokości, b) kątów między płaszczyznami

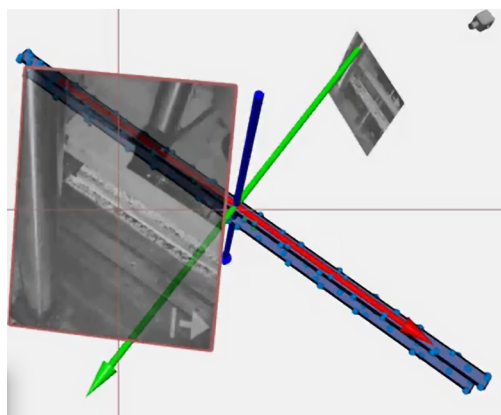


Ryc. 4.3. Układ punktów służących do utworzenia wspólnego układu współrzędnych w układzie Aramis

Analiza uzyskanych pomiarów przeprowadzona została za pomocą bezpłatnego programu GOM Correlate, który na podstawie obrazu przestrzennego pochodzącego z dwóch kamer pozwala na uzyskanie obrazu przedstawionego na rycinie 4.4. Ponadto możliwe jest zsynchronizowanie odczytów z systemu Aramis z przyrostem obciążenia na prasie maszyny testującej. Dokładność uzyskanych wyników zależy od liczby zdjęć wykonanych przez system podczas badania.

System umożliwia prezentację wyników w formie wideo, wykresów i prezentacji. Przykładowy kadr z filmu przedstawiającego ruch wybranego punktu na belce w przestrzeni 3D pokazano na rycinie 4.5. W niniejszej pracy analizowano przemieszczenia belek w wybranych punktach pomiarowych naklejanych na belce. Wyniki pomiarów zamieszczono w rozdziałach 6.4.4, 6.5.4, 6.7.4.

Warto podkreślić, że zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych nie wyklucza stosowania tradycyjnych, sprawdzonych metod pomiarowych. W badaniach prowadzonych w niniejszej pracy system Aramis wraz z systemem Tritop sprawdził się podczas pomiaru przemieszczeń badanych belek, natomiast nie został wykorzystany do pomiaru odkształceń.



Ryc. 4.4. Obraz z dwóch kamer Aramis przetworzonych za pomocą GOM Correlate



Ryc. 4.5. Prezentacja z pomiaru przemieszczenia w oprogramowaniu GOM Correlate

Aby właściwie wykorzystać możliwości pomiarowe systemu, należy uprzednio odpowiedzieć na pytanie, w jakim celu system będzie używany, a następnie odpowiednio wybrać rozmiar badanego obszaru, a w konsekwencji rodzaj soczewki pomiarowej. Na jakość uzyskanych wyników ma również wpływ wybór prędkości wykonywania pomiarów, jakość platów wzoru (czyli jakość wzoru wykonanego na powierzchni próbki) i kąt soczewki. Nieprawidłowy wybór tych parametrów może powodować znaczny „szum” w uzyskanych wynikach. O niedokładnościach systemów cyfrowej korelacji obrazu na przykładzie badań

konstrukcji żelbetowych szczegółowo opowiedzieli Łukasz Krawczyk i in. Wskazali oni również, że na wielkość błędów pomiarowych mają wpływ: wielkość pola pomiarowego, niedokładności w uśrednianiu i obliczaniu wyników przez oprogramowanie, zmiany oświetlenia próbek podczas prowadzenia badań, szum matryc w aparatach, sposób ustawienia aparatów względem analizowanej powierzchni, jakość obiektów oraz sposób naniesienia wzoru na powierzchni pomiarowej (Krawczyk i in., 2017).

W przypadku badania dużych powierzchni, jak miało to miejsce w przeprowadzonych analizach belek, pewnym problemem okazał się odczyt odkształcenia w określonym punkcie (bardzo małym obszarze). Z uwagi na wystąpienie wspomnianego „szumu” będącego konsekwencją doboru soczewki do obserwacji dużego obszaru, otrzymany wynik był niewiarygodny. Dlatego też finalnie do analiz odkształceń wykorzystano odczyty z tensometrów elektrooporowych. Przypadek ten potwierdza zasadność stwierdzenia, że warto łączyć tradycyjne i nowoczesne metody pomiarowe, by umożliwić kontrolowanie uzyskiwanych wyników.

Program badań

5.1. Metodyka badań

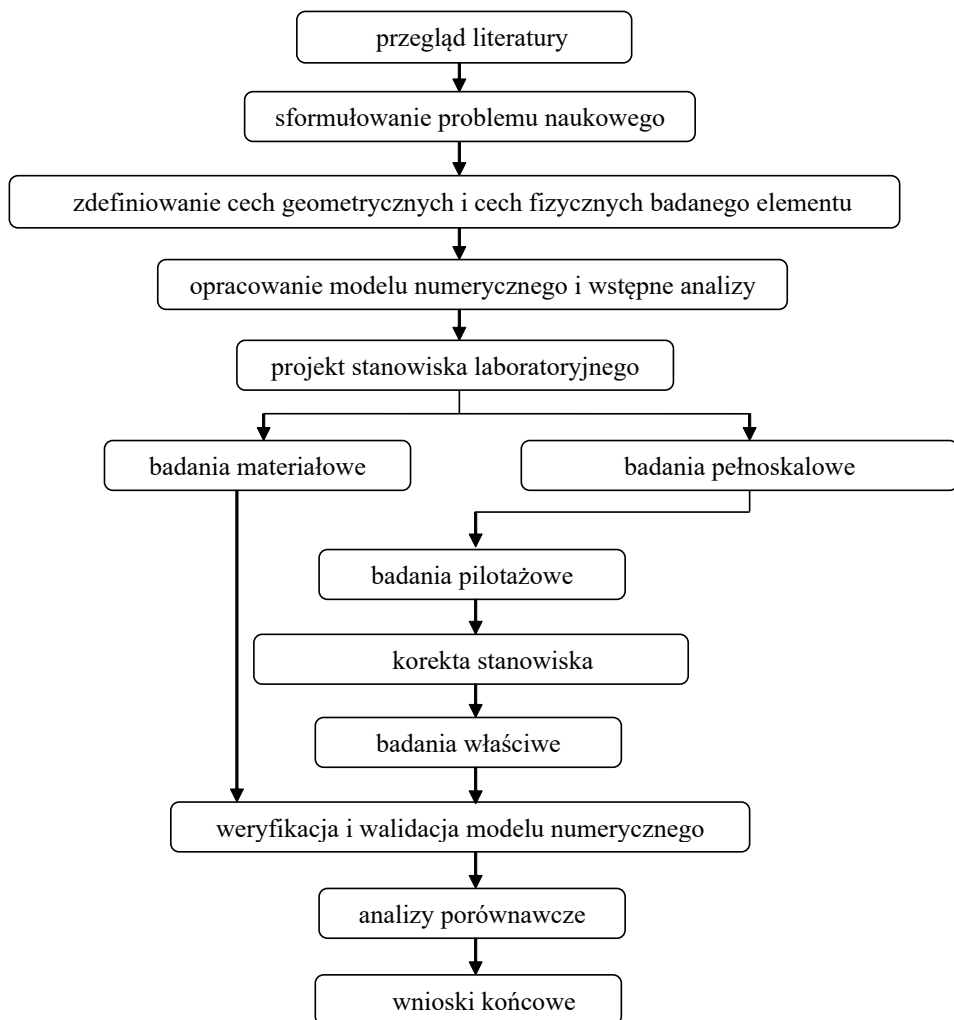
Kolejne czynności i metody dotyczące sposobów przeprowadzenia badań naukowych przedstawiono na schemacie blokowym umożliwiającym ich logiczne śledzenie (ryc. 5.1).

Pierwszym krokiem postępowania przy realizacji niniejszych badań było opracowanie przeglądu literatury, na podstawie którego sformułowano problem naukowy. Następnie dokonano wyboru badanego elementu, tj. belek cienkościennych o przekroju typu sigma i określono ich cechy geometryczne oraz cechy fizyczne materiału. Kolejnym krokiem było wykonanie wstępnych analiz numerycznych w programie Abaqus, które pozwoliły na opracowanie projektu stanowiska laboratoryjnego. Równocześnie, w laboratorium, prowadzono badania materiałowe i pełnoskalowe, które poprzedzono badaniami pilotażowymi. Po przeprowadzeniu badań pilotażowych, z uwagi na pojawiające się ograniczenia i trudności, konieczna okazała się korekta stanowiska laboratoryjnego, polegająca na zmianie sposobu przyłożenia obciążenia, po której przystąpiono do badań właściwych. Po zakończeniu badań laboratoryjnych wykonano kolejne modele numeryczne, odpowiadające warunkom występującym w laboratorium i przeprowadzono ich walidację i weryfikację. W końcowym etapie dokonano analiz porównawczych uzyskanych wyników, co pozwoliło na sformułowanie wniosków końcowych. Ponadto sprecyzowano pewne wytyczne odnośnie do efektywnego wzmacniania konstrukcji cienkościennych i określono dalsze kierunki badań.

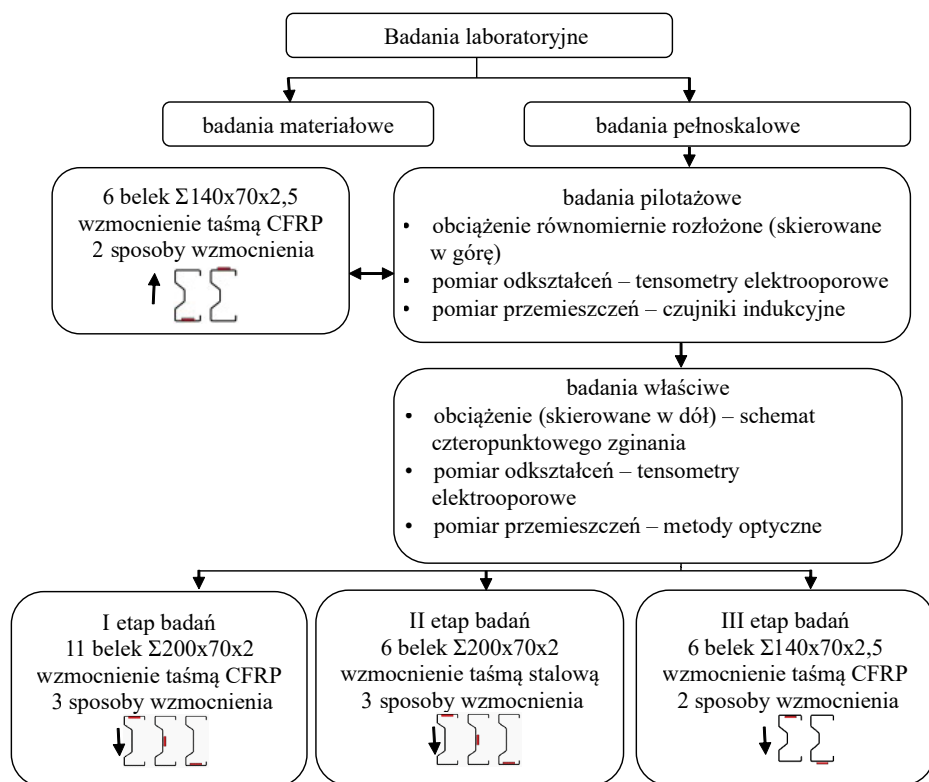
5.1.1. Program badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono zgodnie ze schematem zamieszczonym na rycinie 5.2. W pierwszym kroku wykonano badania materiałowe i badania pełnoskalowe, które miały charakter badań pilotażowych. Badania materiałowe dotyczyły określenia cech fizycznych stali, z której wykonano belki użyte do badań, oraz taśm CFRP. Przebieg badań materiałowych opisano w punkcie 6.1. Badania pilotażowe przeprowadzono na sześciu belkach typu sigma o wysokości 140 mm. Dwie belki nie miały wzmocnienia, natomiast cztery pozostałe wzmocniono taśmą CFRP w dwóch różnych układach. Belki umieszczono w stanowisku badawczym, które umożliwiało obciążenie belek w sposób odwzorowujący obciążenie równomiernie rozłożone. W trakcie badania kontrolowano odkształcenia belek przy użyciu liniowych tensometrów elektrooporowych oraz przemieszczenia belek, czujnikami indukcyjnymi. Szczegółowy opis badań pilotażowych przedstawiono w rozdziale 6.2.

Po przeanalizowaniu wyników uzyskanych w badaniach pilotażowych przystąpiono do badań właściwych, w których belki obciążono w schemacie czteropunktowego zginania. Badania podzielono na trzy etapy – w pierwszym etapie belki cienkościenne typu sigma o wysokości 200 mm wzmacniano taśmą CFRP, w drugim etapie takie same belki wzmacniano taśmami stalowymi. W trzecim etapie badań wykorzystano belki typu sigma o wysokości 140 mm, które wzmocniono taśmami CFRP. W trakcie obciążania belek kontrolowano odkształcenia przy użyciu liniowych tensometrów elektrooporowych umieszczonych w środku rozpiętości belki oraz przemieszczenia, przy użyciu metod optycznych (wykorzystano dwie soczewki systemu Aramis, które pozwalały na pomiar przemieszczeń 3D w naklejonych na badane belki punktach pomiarowych). Każdy etap badań opisano dokładnie w rozdziałach 6.4, 6.5 i 6.7.



Ryc. 5.1. Schemat przedstawiający metodykę badań

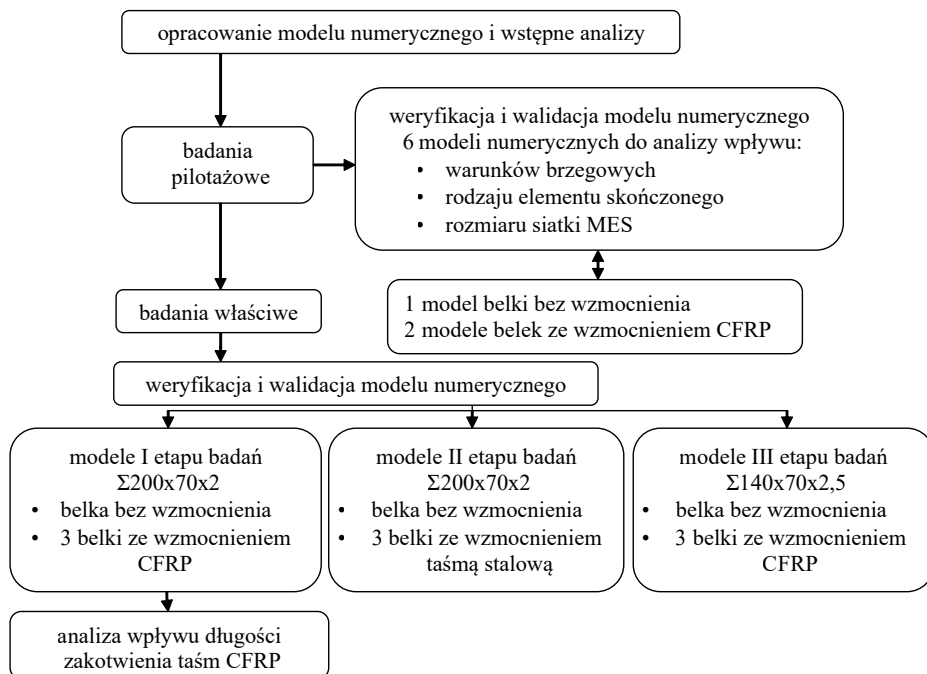


Ryc. 5.2. Schemat przedstawiający program badań laboratoryjnych

5.1.2. Program badań numerycznych

Badania numeryczne przeprowadzono w programie Abaqus. W pierwszym etapie wykonano model numeryczny odpowiadający pilotażowym badaniom laboratoryjnym. W celu uzyskania najlepszej zgodności wyników badań laboratoryjnych i numerycznych wykonano szereg modeli, różniących się rodzajem elementów skończonych, warunkami brzegowymi, rozmiarem siatki MES. Cały proces walidacji i weryfikacji modelu przedstawiono szczegółowo w rozdziale 8.2. Kolejnym krokiem było opracowanie modeli numerycznych odpowiadających trzem etapom właściwych badań laboratoryjnych. Każdorazowo wykonywano modele belek bez wzmocnienia, jak i belek z odpowiednim umiejscowieniem taśm CFRP i taśm stalowych, co zaprezentowano w rozdziałach 8.3, 8.5 i 8.6. Ponadto, dla modeli zgodnych z pierwszym etapem badań laboratoryjnych przeprowadzono analizę wpływu

długości zakotwienia taśm CFRP, celem określenia efektywnej długości zakotwienia (rozdział 8.4). Schemat prezentujący przebieg badań numerycznych zamieszczono na rycinie 5.3.



Ryc. 5.3. Schemat przedstawiający program badań numerycznych

5.1.3. Urządzenia pomiarowe wykorzystane w badaniach laboratoryjnych

W trakcie badań laboratoryjnych pomiar odkształceń prowadzono poprzez wykorzystanie liniowych foliowych tensometrów elektrooporowych TENMEX TFs-10, opór $120\ \Omega \pm 0,2\%$. Zgodnie z informacjami udostępnionymi przez producenta podstawowe parametry wykorzystanych tensometrów przedstawiono w tabeli 5.1.

Tab. 5.1. Podstawowe charakterystyki tensometru foliowego liniowego TFs-10

Rezystancja	$120\ \Omega \pm 0,2\%$
Szerokość	4,6 mm
Długość	16,4 mm
Grubość	60 μm

Tab. 5.1. Podstawowe charakterystyki tensometru foliowego liniowego TFs-10

Maks. natężenie prądu pomiarowego	60 mA
Skrajne temperatury użytkowania	-40 ÷ +200 °C
Wytrzymałość zmęczeniowa	$n > 10^7$ dla $\varepsilon = 1\text{‰}$
Odształcenie maks.	Ok. 4%
Współczynnik czułości odkształceniowej k	2,1–2,2
Tolerancja współczynnika k	0,5%

Odształcenie jest bezwymiarową wartością, która reprezentuje zmianę długości materiału w stosunku do jego początkowej długości. W przypadku wykorzystanych tensometrów elektrooporowych uzyskany z nich odczyt przekazany poprzez mostek tensometryczny do maszyny wytrzymałościowej jest wyrażony w [$\mu\text{m}/\text{m}$] dlatego też na wszystkich wykresach zależności obciążenie-odkształcenie w niniejszym opracowaniu, przy odkształceniu pojawia się zapis ($\cdot 10^{-6}$). Zasady działania poszczególnych typów tensometrów elektrooporowych przedstawiono w pracy Zbigniewa Kowalewskiego i in. (2013).

W badaniach pilotażowych pomiar przemieszczeń był prowadzony przy użyciu czujników LVDT. Deklarowana przez producenta dokładność pomiaru wynosi 0,10% (WA-Electronic 50 mm, numer 170210057).

Do pomiarów geometrii części badanych belek wykorzystano optyczne urządzenie do pomiaru współrzędnych 3D – Tritop. Zasadę działania systemu opisano w rozdziale 4.3 niniejszej pracy. Wykorzystany w badaniach system Tritop posiada świadectwo spełnienia testu akceptacyjnego VDI 2634 numer 220502_233010000144, w którym znajduje się informacja, że maksymalny błąd pomiaru długości wynosi 0,036 mm.

W badaniach właściwych, z uwagi na napotkane ograniczenia dotyczące wykorzystania czujników LVDT w badanych belkach podczas badań pilotażowych, do pomiaru przemieszczeń wykorzystano system Aramis. Przemieszczenia mierzono w punktach naklejonych na belki (uprzednio wykorzystanych do pomiaru geometrii). Według otrzymanego świadectwa spełnienia testu akceptacyjnego VDI 2634 i 2626 numer 200708_CC20/2000/CG1145 maksymalny błąd pomiaru przemieszczenia wynosi 0,0300 mm.

Badania laboratoryjne – część I

Zgodnie z zaprezentowanym schematem blokowym (ryc. 5.2) testy laboratoryjne obejmowały badania materiałowe i dwie serie badań pełnoskalowych, tj. badania pilotażowe i badania właściwe.

6.1. Badania materiałowe

6.1.1. Badania wytrzymałościowe stali

W celu określenia cech wytrzymałościowych stali przeprowadzono badania laboratoryjne na pięciu próbkach wyciętych ze stalowych profili typu sigma. Kształt i rozmiar próbek użytych do badań laboratoryjnych odpowiadał wymaganiom normy PN-EN ISO 6892-1: 2009 [PN-EN ISO]. Pomiary odkształcenia wzdłużnego i poprzecznego próbki przeprowadzono za pomocą dwuosiowego ekstensometru, co przedstawiono na rycinie 6.1.



Ryc. 6.1. Stanowisko laboratoryjne i próbki stosowane do określania charakterystyk wytrzymałościowych stali

Na podstawie analizy statystycznej wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych przyjęto moduł Younga $E = 201,8 \text{ GPa}$, współczynnik Poissona $\nu = 0,28$ i granicę plastyczności stali $f_y = 418,5 \text{ MPa}$. Uzyskana, niższa wartość modułu Younga wynika z faktu, że próbki są wykonane ze stali ocynkowanej. Zgodnie z obowiązującą normą moduł Younga dla stali przyjmuje się jako równy 210 GPa , z kolei moduł Younga dla cynku przyjmuje się zazwyczaj jako równy 80 GPa . Uzyskaną podczas badań wartość modelu Younga tłumaczy założenie, że cynk stanowi około 4% pola przekroju poprzecznego próbki. W tabeli 6.1 zamieszczono wyniki badań materiałowych.

Tab. 6.1. Wyniki badań materiałowych

Symbol próbki	Początkowe pole przekroju	Wytrzymałość na rozciąganie	odchylenie standardowe	Granica plastyczności	Odchylenie standardowe	Moduł Younga	Odchylenie standardowe	Współczynnik Poissona	Odchylenie standardowe
	A_0 [mm ²]	f_u [MPa]	s [MPa]	f_y [MPa]	s [MPa]	E [GPa]	s [GPa]	ν	s
1/1/01/17	52,814	473,9		418,9		202,1		0,29	
1/2/01/17	52,659	474,4		419,3		202,5		0,30	
1/3/01/17	52,293	474,8	0,48	419,4	0,39	202,3	0,26	0,31	0,01
1/4/01/17	52,891	473,7		418,5		201,8		0,29	
1/5/01/17	52,839	474,9		419,6		-		-	
Wartość średnia	52,6991	474,4		419,1		202,2		0,30	
Kwantyl 5%		473,6		418,5		201,8		0,28	

Do wzmocnienia belek stalowych w drugim etapie badań wykorzystano stalowe taśmy o szerokości 50 mm i grubości 1,5 mm, wykonane ze stali S235. Parametry wytrzymałościowe taśm stalowych, odczytane z certyfikatu wystawionego przez producenta, to granica plastyczności stali $f_y = 235$ MPa, granica wytrzymałości na rozciąganie $f_u = 410$ MPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,30$, moduł Younga $E = 210$ GPa i wydłużenie procentowe przy zerwaniu 22,5%.

6.1.2. Taśmy CFRP

W badaniach wykorzystano taśmy z włókien węglowych (CFRP) Sika CarboDur S o grubości 1,2 mm i szerokości 50 mm.

Przeprowadzono badania materiałowe taśmy CFRP na czterech próbkach wyciętych z taśmy wykorzystanej do wzmacniania belek. Podczas próby rozciągania pomiary odkształcenia wzdłużnego i poprzecznego próbek przeprowadzono za pomocą dwuosiowego ekstensometru. Uzyskane wyniki zestawiono w poniższej tabeli 6.2 i po przeprowadzeniu podstawowej obróbki statystycznej zostały one wprowadzone do modelu numerycznego.

Na podstawie badań materiałowych określono współczynnik Poissona $\nu = 0,308$ i moduł Younga $E = 165$ GPa.

Tab. 6.2. Wyniki badań materiałowych

Symbol próbki	Moduł Younga	Odchylenie standardowe	Współczynnik Poissona	Odchylenie standardowe
	E [GPa]	s [GPa]	ν	s
1/1/CFRP/18	165,1	0,08	0,312	0,002
1/2/CFRP/18	165		0,309	
1/3/CFRP/18	165,1		0,313	
1/4/CFRP/18	165,1		0,309	
Wartość średnia	165,1		0,31	
Kwantyl 5%	165		0,308	

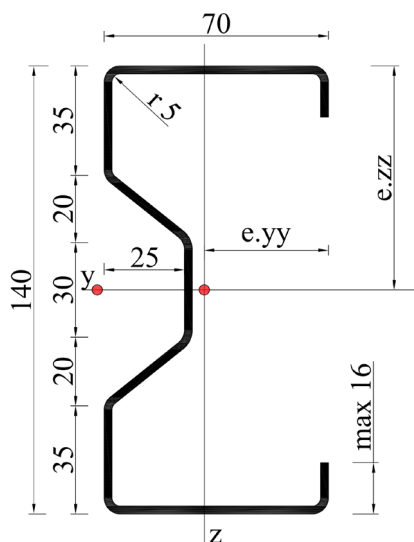
6.1.3. Klej

Taśmy CFRP przyklejano do belek za pomocą kleju SikaDur®-30. Podstawowe charakterystyki wytrzymałościowe kleju podane w karcie materiałowej producenta to minimalna wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach równa 75 MPa, moduł sprężystości przy ściskaniu 9600 MPa, minimalna wytrzymałość na rozciąganie po 7 dniach 26 MPa, wytrzymałość na odrywanie od stali po 7 dniach minimum 21 MPa, wytrzymałość na ścinanie minimum 16 MPa i skurcz 0,04%.

6.2. Badania pilotażowe

Badania pilotażowe przeprowadzono na sześciu stalowych belkach cienkościennych wykonanych z profili zimno-giętych o przekroju typu sigma, o wysokości 140 mm, szerokości 70 mm i o grubości ścianki 2,5 mm. Szczegółową charakterystykę geometryczną przekroju podano w tabeli 6.3 oraz na rycinie 6.2. Belki zostały wyprodukowane w firmie Blachy Pruszyński, w procesie profilowania na zimno z taśm wykonanych ze stali S350 GD (S – stal konstrukcyjna, GD – stal do powlekania na gorąco). Jako wzmocnienie zastosowano taśmy z włókna węglowego Sika CarboDur S, które przyklejono do belek za pomocą kleju SikaDur®-30. Klej został przygotowany zgodnie z instrukcjami producenta, a wzmocnione belki zostały poddane obciążeniu po minimum 7 dniach od przyklejenia taśmy CFRP w celu uzyskania pełnej wytrzymałości połączenia klejonego. Zastosowana grubość kleju

wynosiła 1,3 mm i została dobrana na podstawie badań przedstawionych w pracy Macieja Kowala (2015).



Ryc. 6.2. Geometria przekroju $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$

Tab. 6.3. Charakterystyka geometryczna przekroju $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$

Ciężar [kN/m]	FA [cm ²]	e_{yy} [cm]	e_{zz} [cm]	Jy [cm ⁴]	Jz [cm ⁴]	Wy [cm ³]	Wz [cm ³]	iy [cm]	iz [cm]
6,13	7,81	2,613	6,95	223,00	38,80	32,09	14,85	5,34	2,23

6.2.1. Stanowisko do badań pilotażowych

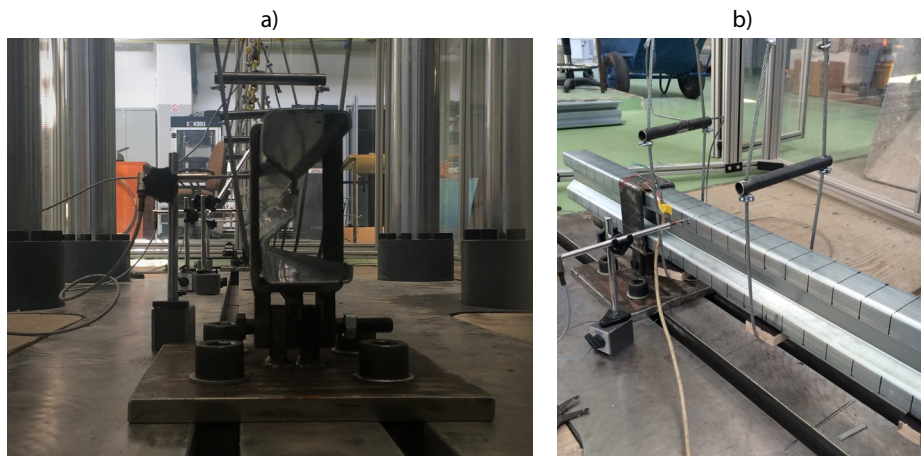
Pełnoskalowe pilotażowe badania laboratoryjne obejmowały sześć wolnopodpartych, jednoprzęsłowych belek poddanych obciążeniu równomiernie rozłożonemu. Obciążenie przykładano do belek za pomocą lin stalowych, zgodnie z patentem Michała Pieńki i in. (2015), w siedmiu punktach wzdłuż rozpiętości belki w rozstawie odzwierciedlającym obciążenie równomiernie rozłożone. Rozstaw podpór belek wynosił 220 cm. Należy zwrócić uwagę, że przy takim sposobie przykładania obciążeń otrzymujemy układ odwrócony, tj. półka dolna znajduje się w strefie ściskania. Ogólny widok stanowiska laboratoryjnego przedstawiono na rycinie 6.3.



Ryc. 6.3. Stanowisko laboratoryjne

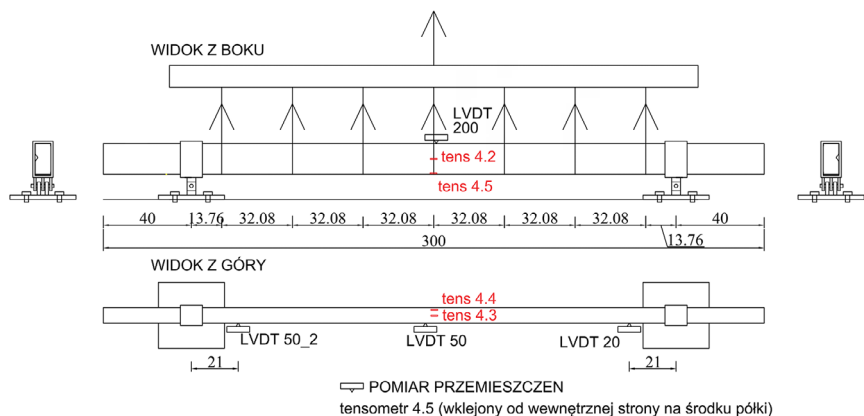
Szczegół stanowiska laboratoryjnego ukazujący sposób podparcia belki pokazano na rycinie 6.4a. Zastosowanie połączenia śrubowego w podporze umożliwiło swobodny obrót w płaszczyźnie belki, natomiast zastosowanie krótkiej prostokątnej rury o wymiarach dokładnie odpowiadających wymiarom przekroju poprzecznego belki zapobiegało jej obrotowi z płaszczyzny. Takie rozwiązanie konstrukcyjne oparcia belki umożliwiło bardzo dokładnie odzwierciedlenie teoretycznych warunków brzegowych, tzw. podparcia widelkowego w stanowisku laboratoryjnym.

W celu przyłożenia obciążenia na całej szerokości półki, pomiędzy każdą stalową liną a belką, umieszczono prostokątny płytowy separator. Elementy te nie tylko zapewniały równomierny rozkład obciążenia na półce, ale również umożliwiały utrzymanie pewnego dystansu pomiędzy belką a liną w trakcie badania, co było ważne w momencie, gdy belka zaczynała się obracać. Szczegóły tego rozwiązania przedstawiono na rycinie 6.4b.



Ryc. 6.4. Szczegóły stanowiska laboratoryjnego:
a) szczegół podpory belki, b) szczegół prostokątnego separatora

Schemat stanowiska laboratoryjnego z podanym rozstawem obciążenia belki oraz lokalizacją tensometrów elektrooporowych i czujników przemieszczenia przedstawiono na rycinie 6.5.



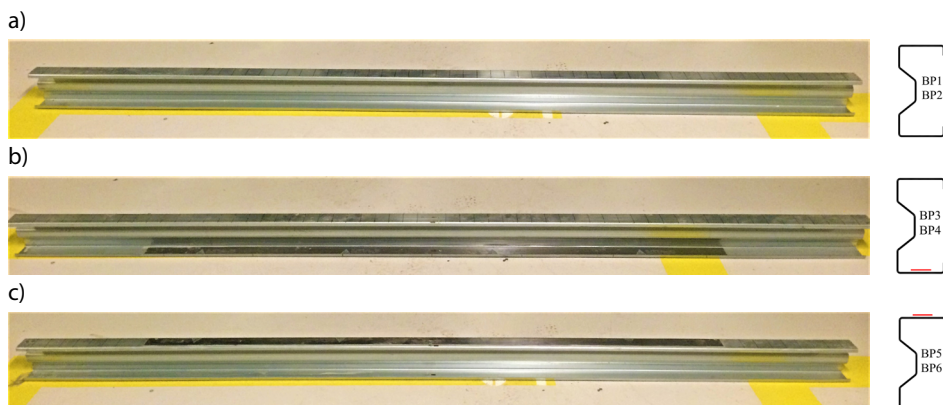
Ryc. 6.5. Schemat stanowiska badawczego

W badaniach wykorzystano cztery czujniki indukcyjne przemieszczeń – trzy na kierunku poziomym i jeden na kierunku pionowym, umieszczone zgodnie ze schematem na rycinie 6.5. W przypadku pięciu belek obok pomiaru przemieszczeń wykonano także pomiar odkształceń za pomocą sześciu liniowych tensometrów elektrooporowych TENMEX TFs-10, opór $120\Omega \pm 0,2\%$. Badania doświadczalne przeprowadzono w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej

z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick Roel. Przyrost obciążenia realizowano za pomocą tłoka prasy i kontrolowano go, przyjmując prędkość wysuwania tłoka na poziomie 1 mm/min oraz rejestrując siłę co 0,01 s.

6.2.2. Przygotowanie próbek do badań

Badaniu poddano sześć belek, z których belki oznaczone jako BP1 i BP2 to belki referencyjne, bez wzmocnienia w postaci taśm CFRP. Natomiast belki oznaczone jako BP3 i BP4 wzmocniono poprzez umieszczenie taśmy CFRP na wewnętrznej płaszczyźnie półki dolnej, a belki BP5 i BP6 wzmocniono taśmą CFRP przyklejoną do górnej powierzchni górnej półki. Sposób umieszczenia taśm (widok i przekrój) przedstawiono na rycinie 6.6.

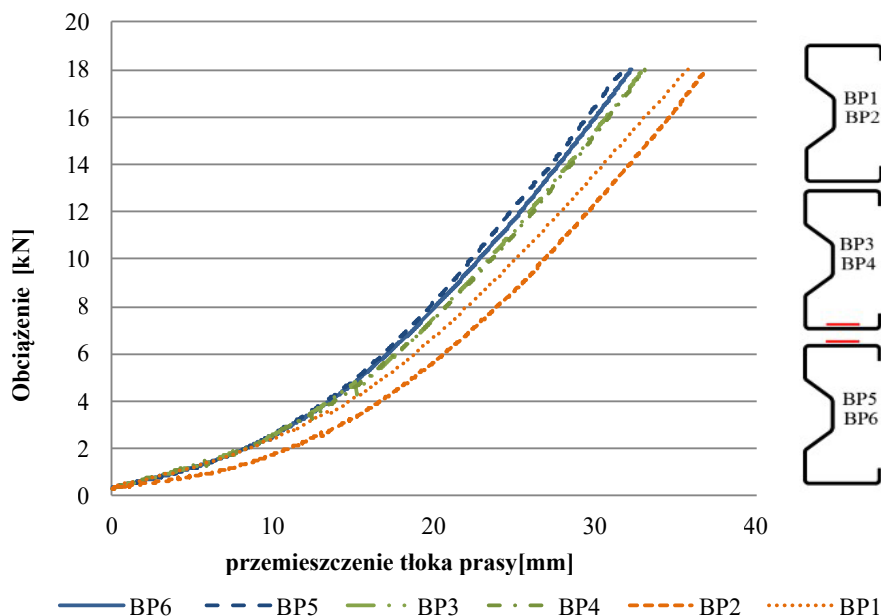


Ryc. 6.6. Lokalizacja taśm i sposób przygotowania belek a) BP1 i BP2, b) BP3 i BP4, c) BP5 oraz BP6

Przed przyklejeniem taśm CFRP powierzchnię belek zmatowiono za pomocą papieru ściernego oraz oczyszczono i odtłuszczone przy użyciu rozpuszczalnika. Następnie przyklejono taśmy CFRP warstwą kleju o grubości 1,3 mm. Całkowita długość taśmy wynosiła 207,5 cm. Długość zakotwienia taśmy przyjęto taką samą dla wszystkich belek, równą 75 mm, liczoną od skrajnych punktów przyłożenia siły. W prowadzonych badaniach przyjęto maksymalną długość zakotwienia, na którą pozwalało stanowisko badawcze.

6.2.3. Wyniki badań pilotażowych

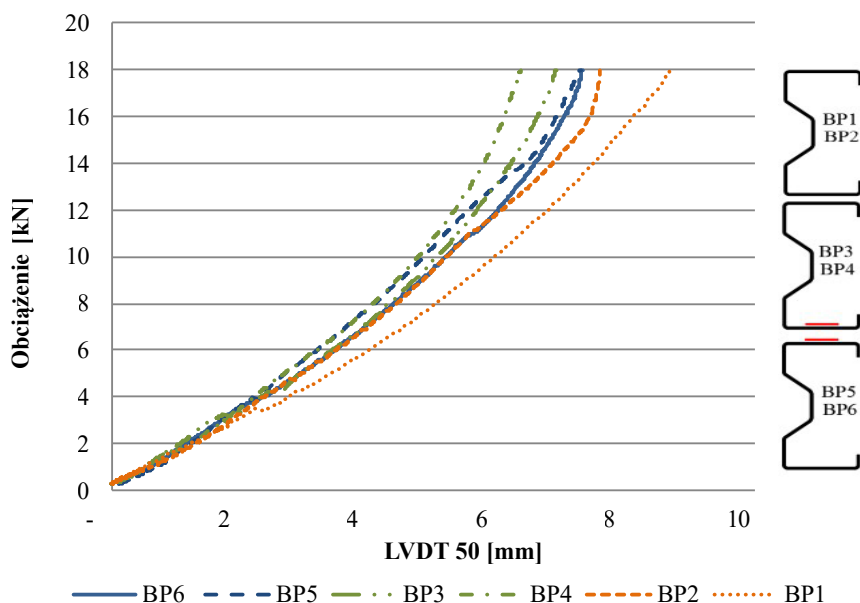
Badania pilotażowe przeprowadzono na trzech grupach belek (po dwie próbki w każdej), różniących się lokalizacją wzmocnienia realizowanego za pomocą taśm CFRP, tj. górna lub dolna półka. Wpływ wzmocnienia taśmą CFRP na przemieszczenia i odkształcenia badanych belek w zależności od obciążenia zewnętrznego przedstawiono w formie wykresów.



Ryc. 6.7. Zależność pomiędzy obciążeniem zewnętrznym a przemieszczeniem tłoka prasy

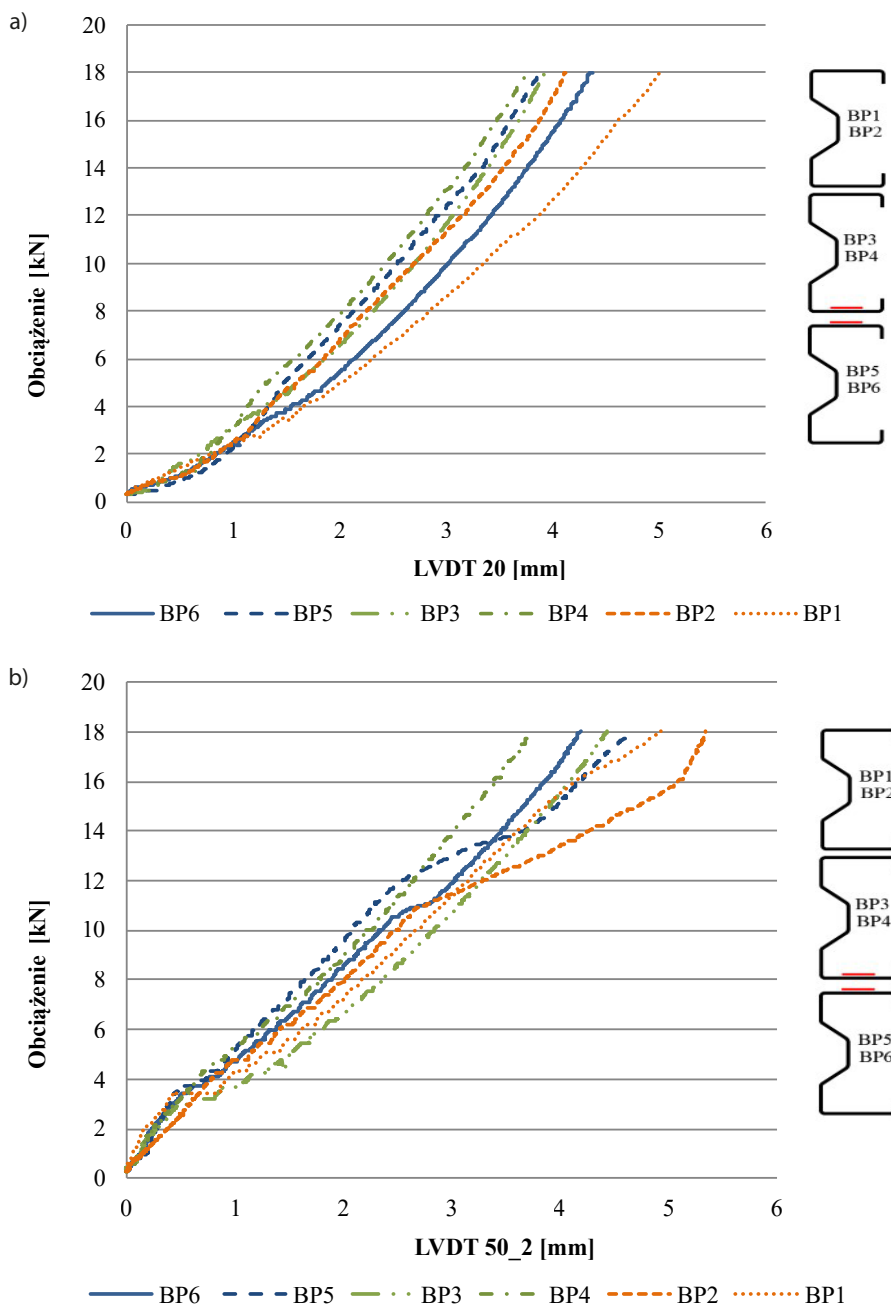
Na rycinie 6.7 przedstawiono zależność pomiędzy obciążeniem zewnętrznym a przemieszczeniem tłoka maszyny wytrzymałościowej (przemieszczenie pionowe). Zamocowanie taśmy CFRP do półki rozciąganej (belka BP5 i BP6) spowodowało największe ograniczenie przemieszczenia pionowego badanych belek, względem belek referencyjnych. W tym przypadku przy obciążeniu wynoszącym 18 kN odnotowano zmniejszenie przemieszczenia pionowego belki o 13,92% w stosunku do najbardziej niekorzystnego wyniku uzyskanego dla belki niewzmocnionej (BP1, BP2) oraz o 5,1% w stosunku do belki wzmocnionej w części ściskanej (BP3, BP4).

Na rycinie 6.8 zaprezentowano zależność pomiędzy obciążeniem a poziomym przemieszczeniem belki w środku jej rozpiętości, odczytanym za pomocą czujnika LVDT 50. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że najlepsze wzmocnienie, tj. największa redukcja przemieszczeń poziomych, wystąpiło w przypadku zastosowania taśmy CFRP w półce ściskanej belek (BP3 i BP4). Nieco gorsze wyniki uzyskano dla belek BP5 i BP6. Największe przemieszczenia odczytane z czujnika LVDT 50 dotyczyły belek BP1 i BP2.



Ryc. 6.8. Zależności między obciążeniem zewnętrznym a przemieszczeniami odczytanymi z czujnika indukcyjnego LVDT 50

Na rycinie 6.9 ukazano zależność między obciążeniem a przemieszczeniem poziomym belki mierzonym w pobliżu podpór za pomocą czujników LVDT 20 (ryc. 6.9a) i LVTD 50_2 (ryc. 6.9b). Analizując powyższe wykresy, należy stwierdzić, że najbardziej niekorzystne wyniki uzyskano dla belek referencyjnych (BP1 lub BP2), a największe ograniczenie przemieszczeń poziomych uzyskano dla belki wzmocnionej w części ściskanej (BP4). Wykresy przemieszczeń poziomych pozostałych belek krzyżują się wielokrotnie przy różnych poziomach obciążenia, co może wynikać z niedoskonałego styku belki z podporą lub z braku stałego kontaktu czujnika z jednym punktem pomiarowym.

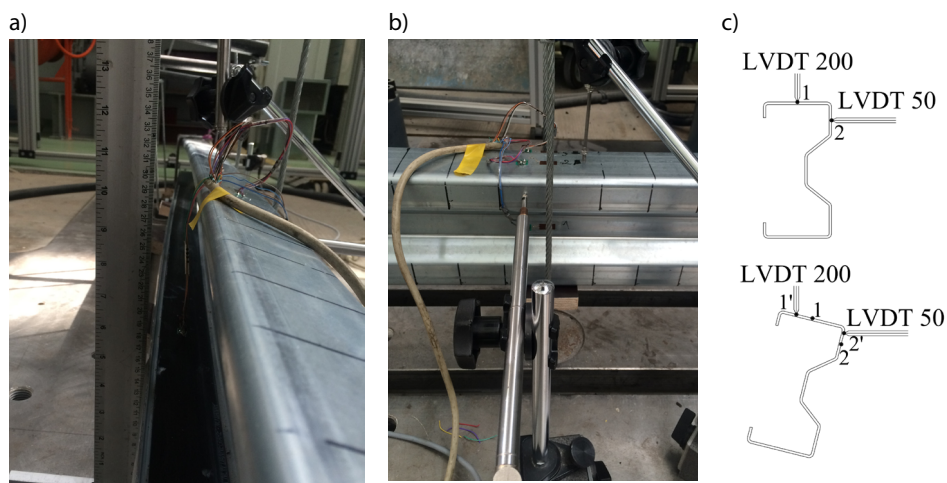


Ryc. 6.9. Zależności między obciążeniem zewnętrznym a przemieszczeniami odczytanymi z czujników indukcyjnych a) LVDT 20, b) LVDT 50_2

Należy zwrócić uwagę, że prezentowane wyniki ograniczono do poziomu obciążenia 18 kN, ponieważ przy wyższym obciążeniu belka

zsuwała się z płytowych separatorów i opierała się o linkę przekazującą obciążenie, co sprawiało, że uzyskane wyniki przestawały być wiarygodne.

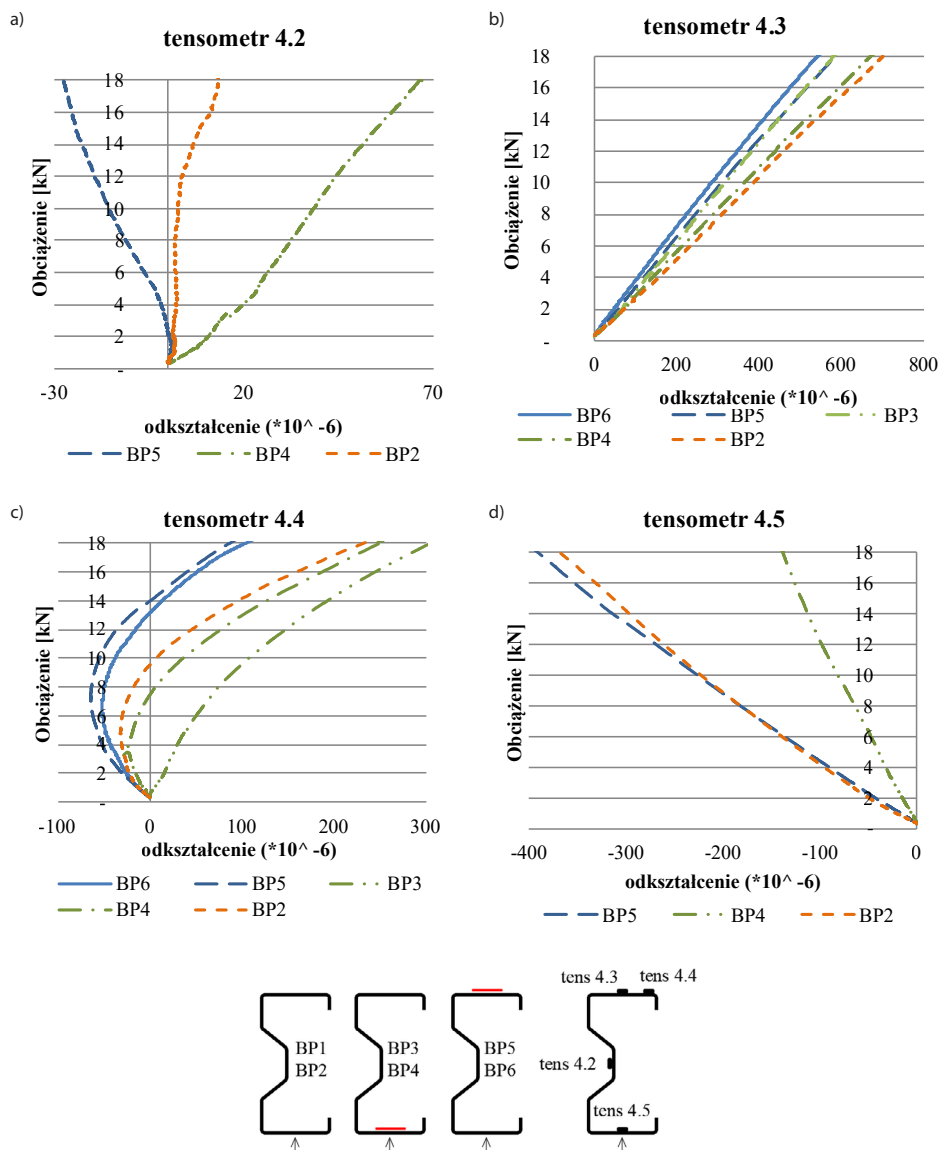
Znaczny obrót belki i w konsekwencji duże jej wychylenie z płaszczyzny pionowej sprawiły, że nie tylko pomiar przemieszczeń poziomych, ale i przemieszczeń pionowych w środku rozpiętości belki, okazały się być problematyczne. W trakcie obrotu czujniki (pionowy LVDT200 oraz poziomy LVDT50) nie pozostawały w stałym kontakcie z jednym punktem pomiarowym, co przedstawiono na rycinie 6.10. Niewątpliwie miało to wpływ na wiarygodność otrzymanych wyników i świadczyło o tym, że klasyczne, indukcyjne czujniki przemieszczeń nie sprawdzają się w przypadku belek ulegających skręcaniu.



Ryc. 6.10. Zależność pomiędzy obciążeniem a przemieszczeniem mierzonym przy pomocy czujników a) LVDT 200, b) LVDT 50, c) szkic pomiaru

Pięć belek było także badanych pod kątem odkształcenia, kontrolowanego za pomocą czterech tensometrów elektrooporowych, rozmieszczonych zgodnie ze schematem przedstawionym na rycinie 6.5. Tensometry 4.2, 4.3, 4.4 i 4.5 umieszczono w połowie rozpiętości belki, przy czym tensometr 4.2 na środku w połowie wysokości przekroju, 4.3 w połowie szerokości półki rozciąganej, a 4.4 na skraju półki rozciąganej. Natomiast tensometr 4.5 został umieszczony na środku szerokości półki ściskanej. W przypadku belek BP3 i BP6 występuje brak odczytów wyników z tensometrów 4.2 i 4.5 spowodowany ich uszkodzeniem (ryc. 6.11a i 6.11d).

Analizując odkształcenia odczytane z tensometru 4.2 (ryc. 6.11a), stwierdzono, że zastosowanie wzmocnienia taśmą CFRP w strefie rozciąganej znacząco wpłynęło na ograniczenie odkształceń środnika, natomiast umieszczenie taśmy CFRP na półce ściskanej znacząco je zwiększyło, co wynika ze zmiany położenia środka ciężkości przekroju i zmiany rozkładu naprężeń wywołanej doklejeniem taśmy.



Ryc. 6.11. Zależności między obciążeniem zewnętrznym a odkształceniem odczytanym z tensometrów elektrooporowych a) 4.2, b) 4.3, c) 4.4, d) 4.5

Na podstawie odczytów z tensometrów 4.3 i 4.4 (ryc. 6.11b i 6.11c) stwierdzono, że wzmocnienie półki rozciąganej przy użyciu taśmy CFRP przyczyniło się do znacznego ograniczenia odkształceń w półce rozciąganej, względem belek nieposiadających wzmocnienia. Ponadto zaobserwowano, że umieszczenie taśmy CFRP na półce ściskanej przyczyniło się do ograniczenia odkształceń jedynie w środku szerokości półki rozciąganej (ryc. 6.11b), a na brzegu tej półki już nie (ryc. 6.11c).

Na rycinie 6.11d przedstawiono zależność odkształcenia od obciążenia w punkcie umieszczenia tensometru 4.5. Wykonanie wzmocnienia z taśmy CFRP na półce ściskanej znacząco ograniczyło odkształcenia tej półki. Z kolei wzmocnienie półki rozciąganej przyczyniło się do zmniejszenia odkształceń półki ściskanej tylko na początkowym poziomie obciążenia.

6.2.4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pilotażowych badań eksperymentalnych można stwierdzić, że:

- sposób przyłożenia obciążenia zewnętrznego, odpowiadający praktyce inżynierskiej, tj. taki, że wypadkowa siła przyłożona jest w środku szerokości półki, a tym samym jej oś działania nie pokrywa się ze środkiem ciężkości ani środkiem ścinania belki, generuje, obok zginania, wystąpienie znacznego skręcania elementu;
- na podstawie zależności obciążenie-przemieszczenie tłoka prasy stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskano w przypadku, w którym taśma CFRP została zamocowana do półki rozciąganej. Przy obciążeniu wynoszącym 18 kN odnotowano zmniejszenie pionowego przemieszczenia belki o blisko 14% w stosunku do belki niewzmocnionej i o ponad 5% w stosunku do belki wzmocnionej w części ściskanej;
- w przypadku poziomych przemieszczeń belki w środku jej rozpiętości najkorzystniejsze okazało się przyklejenie taśm CFRP do wewnętrznej powierzchni półki ściskanej. Przy obciążeniu wynoszącym 18 kN zanotowano zmniejszenie przemieszczenia poziomego półki rozciąganej o 25,5% w stosunku do belki niewzmocnionej BP1 i o 11,6% w stosunku do belki BP6 wzmocnionej w strefie rozciąganej;

- analizując odkształcenia w połowie szerokości półki rozciąganej przy obciążeniu 18 kN (ryc. 6.11b), stwierdzono, że zastosowanie taśm CFRP na półce rozciąganej pozwoliło w skrajnym przypadku ograniczyć odkształcenia o 13,2%, a w półce ściskanej o 7,6% w przypadku belki BP3;
- zastosowanie wzmocnienia w postaci taśm z włókien węglowych na półce rozciąganej (BP5) przy obciążeniu 18 kN ograniczyło odkształcenia na krawędzi półki rozciąganej o 62%, natomiast zastosowanie wzmocnienia taśmami CFRP na półce ściskanej nie ograniczyło odkształceń, a wręcz przyczyniło się do ich wzrostu (ryc. 6.11c);
- w celu ograniczenia odkształceń w półce ściskanej należy stosować wzmocnienie z taśm CFRP na półce ściskanej. W badaniach pilotażowych przy obciążeniu 18 kN uzyskano redukcję odkształcenia o ponad 62% (BP4, ryc. 6.11d).

Podsumowując, na podstawie pilotażowych badań laboratoryjnych można stwierdzić, że zastosowanie taśm CFRP zmniejsza przemieszczenia i odkształcenia belki wykonanej z profili typu sigma poddanej zginaniu i skręcaniu, co potwierdza słuszność podjęcia niniejszej tematyki. Ze względu na ograniczoną liczbę próbek testowanych oraz trudności powstałe podczas badań laboratoryjnych, uzyskane wyniki należy uznać za wstępne. Warto jednak podkreślić, że badania pilotażowe dostarczyły wiele cennych informacji dotyczących specyfiki badań monosymetrycznych belek cienkościennych i w konsekwencji pozwoliły na opracowanie odpowiedniego, nowego stanowiska laboratoryjnego służącego do przeprowadzenia badań właściwych. Odnosi się to szczególnie do oprzyrządowania pomiarowego, pozwalającego poprawnie mierzyć przemieszczenia belek w trakcie zginania i skręcania, co przedstawiono w dalszym etapie niniejszej pracy.

Badania laboratoryjne – część II

Efektem obserwacji poczynionych podczas pilotażowych testów laboratoryjnych było opracowanie programu badań właściwych, który umożliwił eliminację trudności wynikających z pierwotnie przyjętego stanowiska badawczego (wg patentu Michała Pieńki i in., 2015) oraz specyfiki pracy monosymetrycznych belek cienkościennych. Podstawowe modyfikacje dotyczyły sposobu przyłożenia obciążenia, szerokości rozstawu podpór oraz metody pomiaru przemieszczeń. Pozwoliły one na przeprowadzenie badań laboratoryjnych w pełnym zakresie obciążenia, aż do zniszczenia elementu przy równoczesnym, niezaburzonym pomiarze przemieszczeń i odkształceń badanych belek.

7.1. Opis badań właściwych

Badania właściwe objęły dwa rodzaje przekrojów poprzecznych belek profilowanych na zimno typu sigma, tj. $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ oznaczone w dalszej części pracy symbolem B oraz $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$ oznaczone symbolem MB, w których belki obciążono w schemacie czteropunktowego zginania. Wszystkie badane belki miały długość 300 cm, a rozstaw podpór wynosił 270 cm. Warto wspomnieć, że belki typu MB były także przedmiotem badań pilotażowych. Rozszerzenie zakresu badań o wyższe przekroje poprzeczne było podyktowane chęcią analizy efektywności wzmocnienia taśmami CFRP nie tylko w przypadku zginania i skręcania belki, ale także w przypadku deformacji jej przekroju poprzecznego. Ponadto podczas badań właściwych poszerzono gamę typu i konfiguracji wzmocnienia. W odróżnieniu od badań pilotażowych testowano trzy, a nie dwie lokalizacje wzmocnienia oraz obok taśm CFRP do wzmacniania użyto także taśm stalowych. Reasumując, w pierwszym etapie badano belki typu B wzmacniane taśmą CFRP, w drugim etapie badano również belki typu B, z tym, że wzmacniane taśmami stalowymi. Natomiast w trzecim etapie

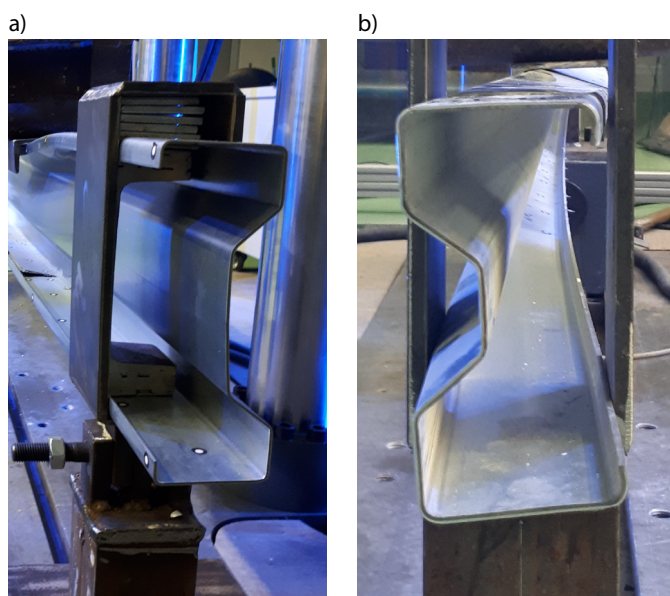
7.1.1 Stanowisko badawcze

T1, T2, T3 - tensometry elektrooporowe

Szczegół stanowiska laboratoryjnego ukazujący sposób podparcia belki przedstawiono na rycinie 7.2. Zastosowanie połączenia śrubowego w podporze, analogicznego do rozwiązania przyjętego w badaniach pilotażowych, umożliwiło swobodny obrót w płaszczyźnie belki.

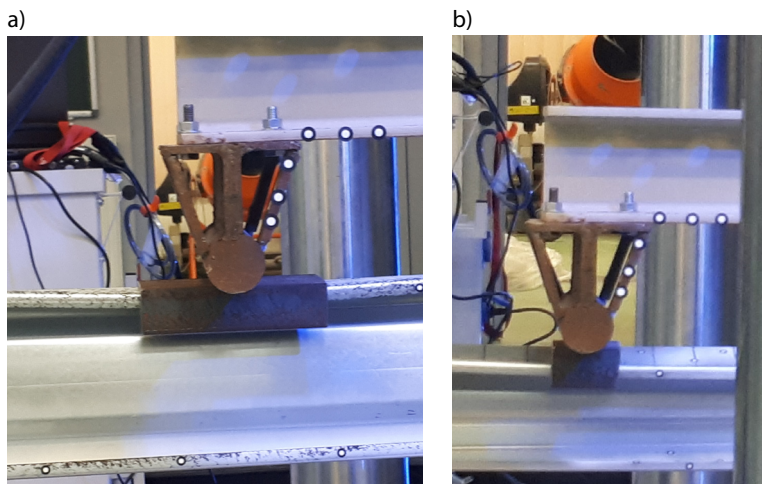
Model warunków brzegowych w stanowisku laboratoryjnym bardzo dokładnie odzwierciedlił teoretyczne warunki brzegowe, tzw. podparcie widełkowe.

W przypadku dwóch pierwszych etapów badań, w których obciążeniu poddawano belki typu B (o wysokości 200 mm), w obrębie podparcia umieszczano profil usztywniający wewnątrz przekrój sigma i dodano podkładki umieszczone nad belką w punktach przyłożenia obciążenia (ryc. 7.2a), aby uchronić ją przed miejscowym uszkodzeniem jeszcze przed włączeniem się do współpracy taśmy CFRP. W trzecim etapie badań zastosowanie usztywnienia przekroju na podporze nie było wymagane (ryc. 7.2b), ponieważ belki typu MB nie ulegały w tym miejscu zniszczeniu.



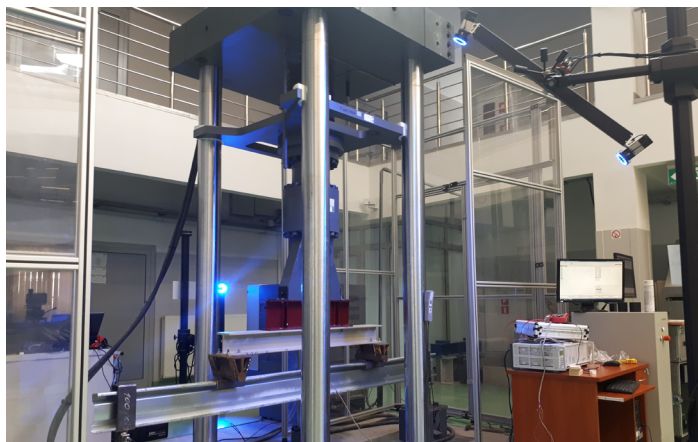
Ryc. 7.2. Szczegóły stanowiska laboratoryjnego: a) szczegół podpory belki wysokości 200 mm z etapu pierwszego i etapu drugiego, b) szczegół podpory belki wysokości 140 mm z etapu trzeciego badań

W celu zabezpieczenia belek przed uszkodzeniem miejscowym przed osiągnięciem ich pełnej wytrzymałości, obciążenie z prasy przykładano do półki górnej poprzez podkładkę wykonaną ze stalowego ceownika gorącowałcowanego. Umożliwiał on rozkład obciążenia na większą powierzchnię półki. W przypadku belek typu B szerokość ceownika wynosiła 20 cm, a w przypadku belek typu MB ceownik miał szerokość 10 cm (ryc. 7.3a, 7.3b).



Ryc. 7.3. Szczegóły stanowiska laboratoryjnego: a) szczegół przyłożenia obciążenia do belki wysokości 200 mm z etapu pierwszego i etapu drugiego, b) szczegół przyłożenia obciążenia do belki wysokości 140 mm z etapu trzeciego badań

W celu przeprowadzenia precyzyjnego pomiaru przemieszczeń belki w badaniach właściwych wykorzystano dwa czujniki optycznego systemu pomiarowego Aramis oraz system Tritop. Ponadto w każdej próbce w środku jej rozpiętości prowadzono pomiar odkształceń za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych TENMEX TFs-10, opór $120\Omega \pm 0,2\%$. Umieszczenie tensometrów przedstawiono na rycinie 7.1. Badania doświadczalne przeprowadzono w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roel, kontrolując przyrost obciążenia zadanego za pomocą wysuwającego się tłoka prasy z prędkością 1 mm/min i rejestrując siłę co 0,01 s. Widok całego stanowiska badawczego zamieszczono na rycinie 7.4.



Ryc. 7.4. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego

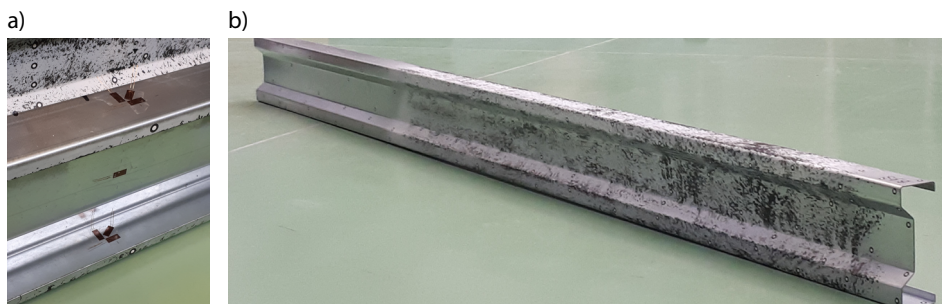
7.1.2. Przygotowanie próbek do badań

Przed przystąpieniem do badań laboratoryjnych wszystkie belki zostały odtłuszczone i zmatowione papierem ściernym oraz oczyszczone w obrębie miejsc, do których zaplanowano przyklejenie przewidzianych rodzajów taśm. Następnie belki wzmocniono poprzez naklejenie taśm CFRP lub taśm stalowych. Jak to wspomniano wcześniej, w badaniach właściwych wykorzystano optyczne systemy pomiarowe Tritop i Aramis, przy których wymagane jest, aby powierzchnie badanych belek nie powodowały odbicia światła. W związku z tym, wszystkie próbki etapu pierwszego i drugiego pomalowano matową białą farbą w sprayu. Następnie powierzchnię dodatkowo zmatowiono, natrysując na nią białą kredę. Po wyschnięciu uprzednio pomalowanej powierzchni wykonano teksturę w postaci czarnych nieregularnych plamek przy użyciu specjalnej gąbki. W ten sposób przygotowano wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnię przekroju belek w obrębie ponad połowy ich długości. Wynikało to z faktu, że zakres pomiarowy soczewki Aramis obejmował obszar o długości 140 cm, co stanowiło prawie połowę długości badanych próbek.

W środku rozpiętości belek przyklejono tensometry elektrooporowe TENMEX TFs-10 o rezystancji $120\Omega \pm 0,2\%$.

W trzecim etapie badań wykorzystano belki typu M, takie same jak te badane podczas badań pilotażowych. Belki te zmatowiono jedynie poprzez rozpylenie kredy w sprayu.

Na wszystkich belkach umieszczono punkty pomiarowe o średnicy 5 mm, które umożliwiły wstępne pomiary imperfekcji geometrycznych za pomocą systemu Tritop (belki typu B), a następnie zostały wykorzystane do stworzenia wspólnego układu współrzędnych dla dwóch czujników pomiarowych w systemie Aramis. Punkty te posłużyły także do analizy przemieszczeń badanych belek w programie GOM Correlate (belki typu B i MB). Belki całkowicie przygotowane do badania pokazano na rycinie 7.5.



Ryc. 7.5. Przygotowanie próbek do badań:
a) naklejenie tensometrów, b) belki z przygotowaną teksturą

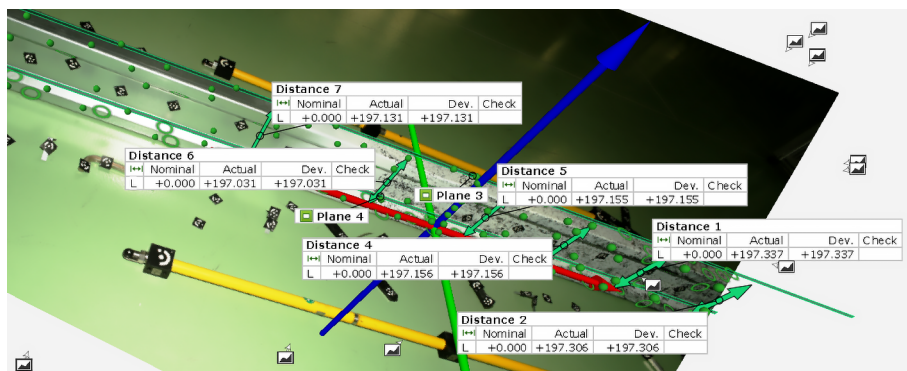
7.1.3. Pomiar wstępnych imperfekcji geometrycznych

Do określenia wstępnych imperfekcji geometrycznych badanych belek typu B wykorzystano optyczne urządzenie do pomiaru współrzędnych 3D – Tritop. Jest to przenośny system umożliwiający precyzyjne i szybkie pomiary współrzędnych trójwymiarowych obiektów. Sposób działania i wykorzystanie oprogramowania Tritop opisano w rozdziale 3 niniejszej pracy. Wykorzystany w badaniach system Tritop posiada świadectwo spełnienia testu akceptacyjnego VDI 2634 numer 220502_233010000144, w którym znajduje się informacja, że maksymalny błąd pomiaru długości wynosi 0,036 mm.

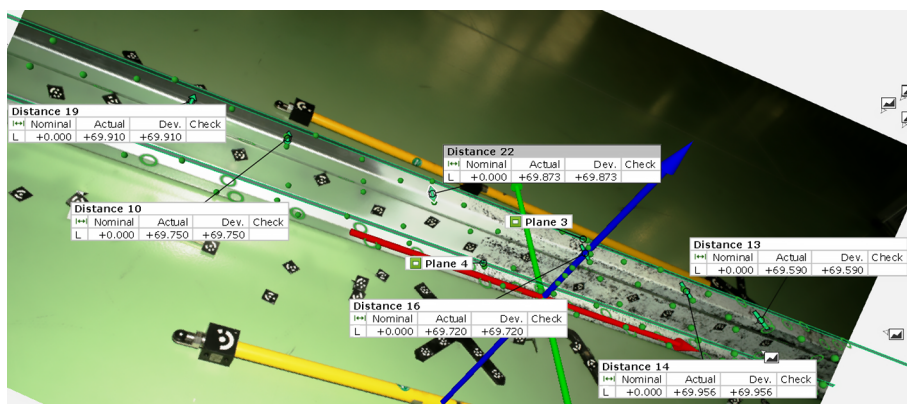
Przy użyciu aparatu fotograficznego wykonano serie dokładnych zdjęć każdej z badanych belek typu B. Na podstawie wykonanych zdjęć w programie GOM Correlate stworzono cyfrowy obraz próbek umożliwiający opis trójwymiarowej geometrii poszczególnych belek. Szczegółowe pomiary objęły wysokość przekroju, szerokość półki górnej i szerokość półki dolnej, mierzone w wielu przekrojach na długości belki. Ponadto sprawdzano także prostoliniowość osi belek oraz niezmienność konturu na długości belek. Na zdjęciach (ryc. 7.6 i 7.7) przedstawiono

wyniki z pomiaru wysokości i szerokości belki referencyjnej B2R. W analogiczny sposób sprawdzono wszystkie badane belki typu B.

Punkty pomiarowe odczytywane przez system Tritop naklejano na górnej powierzchni półki dolnej (tak by były one widoczne podczas wykonywania zdjęcia) oraz na górnej powierzchni półki górnej. Zmierzoną wysokość belki podaną w polu „Actual” należy więc powiększyć o 2 mm, czyli o grubość blachy w pasie dolnym.



Ryc. 7.6. Pomiar imperfekcji geometrycznych belki B2R za pomocą TRITOP – kontrola wysokości przekroju



Ryc. 7.7. Pomiar imperfekcji geometrycznych belki B2R za pomocą TRITOP – kontrola szerokości półki górnej

Po dodaniu tej wartości wysokość belki zawiera się w przedziale od 199,031 mm do 199,337 mm. Pamiętając o dokładności pomiarowej urządzenia określonej na podstawie otrzymanego od producenta testu VDI wynoszącej 0,036 mm, można przyjąć, że wysokość belki zawiera się w przedziale od $199,031 \pm 0,036$ mm do $199,337 \pm 0,036$ mm.

Rozrzut pomiędzy skrajnymi pomiarami nie przekracza 0,4 mm, co wskazuje na wysoką jakość wykonania belek. Nominalna wysokość przekroju wynosi 200 mm. Zmierzona wysokość zawiera się w granicach tolerancji wymiarowej, która dla tego przekroju wynosi 1 mm.

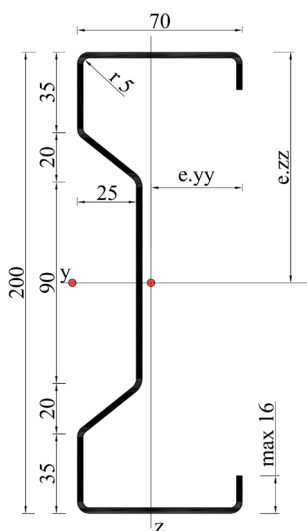
Na rycinie 7.7 przedstawiono pomiar szerokości półki górnej. Zmierzone wartości zawierają się w przedziale od $69,59 \pm 0,036$ mm do $69,956 \pm 0,036$ mm. Tolerancja wymiarowa, dla nominalnej szerokości półki 70 mm wynosi 0,5 mm. W taki sam sposób przeprowadzono pomiar szerokości półki dolnej i uzyskane wyniki były bardzo zbliżone.

Przedstawione wyniki pomiarów geometrii belki wskazują na niewielkie wstępne imperfekcje geometryczne, mieszczące się w granicach dopuszczalnych tolerancji wymiarowych.

7.2. Pierwszy etap badań

7.2.1. Zakres badań

Badaniu poddano 11 stalowych belek cienkościennych o przekroju typu B, tj. wysokości 200 mm, szerokości półki 70 mm i grubości ścianki 2 mm. Dokładną charakterystykę geometryczną przekroju podano w tabeli 7.1 oraz na rycinie 7.8.



Ryc. 7.8. Geometria przekroju $\Sigma 200 \times 70 \times 2$

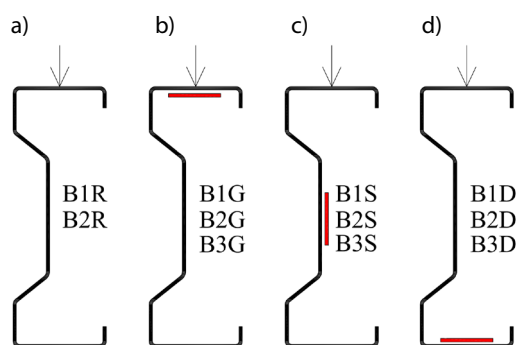
Tab. 7.1. Podstawowe parametry przekroju $\Sigma 200 \times 70 \times 2$

Ciężar	FA	e_{yy}	e_{zz}	J _y	J _z	W _y	W _z	i _y	i _z
[kg/mb]	[cm ²]	[cm]	[cm]	[cm ⁴]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[cm]
5,88	7,49	2,605	9,95	426,98	32,33	42,91	12,41	7,55	2,08

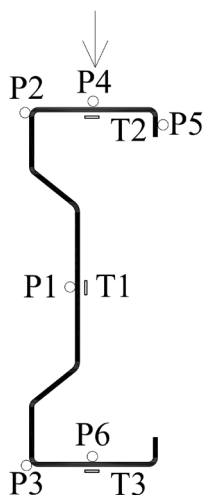
Stanowisko badawcze oraz umiejscowienie tensometrów elektrooporowych było zgodne ze schematem przedstawionym na rycinie 7.1, a sposób przygotowania próbek do badań zgodny z opisem zawartym w punkcie 7.1.2.

Jako wzmocnienie zastosowano taśmy z włókna węglowego Sika CarboDur S, które przyklejono do belek za pomocą kleju SikaDur®-30. Klej przygotowano zgodnie z instrukcjami producenta, a wzmocnione belki zostały poddane obciążeniu po minimum 7 dniach od przyklejenia taśmy CFRP w celu uzyskania pełnej wytrzymałości połączenia klejowego. Zastosowana grubość kleju wynosiła 1,3 mm i została dobrana na podstawie badań przedstawionych w pracy M. Kowala (2015). Długość taśmy CFRP wynosiła 175 cm, a więc długość zakotwienia w odniesieniu do ryciny 2.1 wynosiła 15 cm.

Na początku zbadano dwie belki referencyjne bez wzmocnienia (B1R i B2R, ryc. 7.9a). Następnie badaniu poddano belki wzmocnione taśmą CFRP umieszczoną po wewnętrznej stronie półki górnej (B1G, B2G, B3G, ryc. 7.9b) oraz taśmą CFRP przyklejoną po wewnętrznej stronie środnika (B1S, B2S i B3S, ryc. 7.9c), a na końcu belki ze wzmocnieniem usytuowanym po wewnętrznej stronie półki dolnej (B1D, B2D, B3D – ryc. 7.9d).



Ryc. 7.9. Rozmieszczenie taśm CFRP i oznaczenie próbek: a) belki typu B bez wzmocnienia – referencyjne (R), b) belki typu B wzmocnione górą – (G), c) belki typu B wzmocnione na środniku– (S), d) belki typu B wzmocnione dołem – (D)

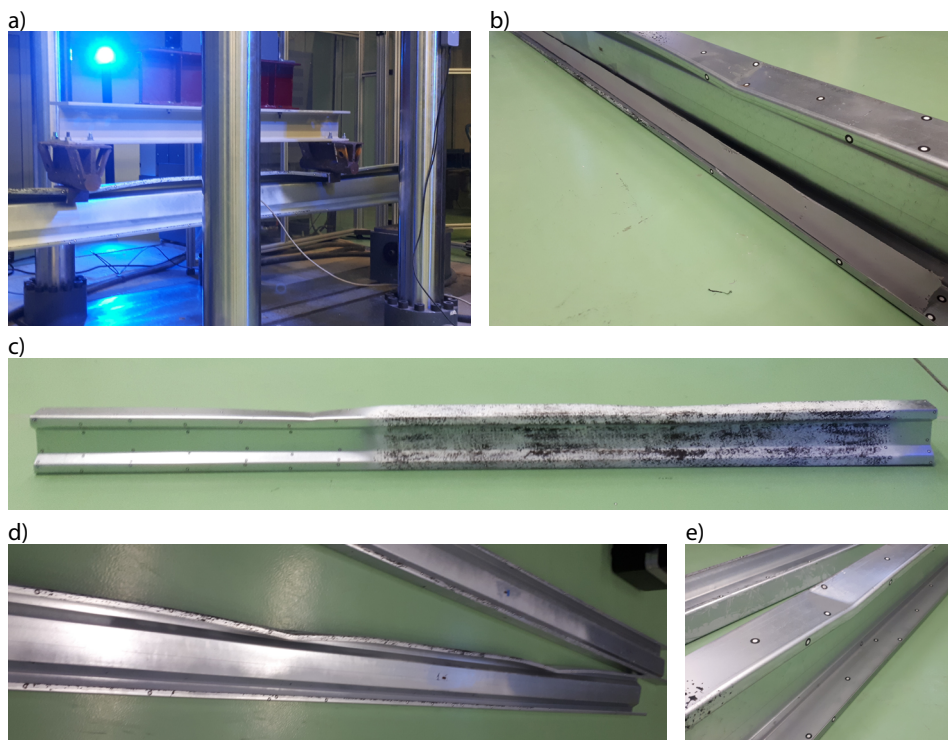


Ryc. 7.10. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w środku rozpiętości belki: punkty pomiaru odkształceń (T1, T2, T3) i punkty pomiaru przemieszczeń (P1, P2, P3, P4, P5, P6)

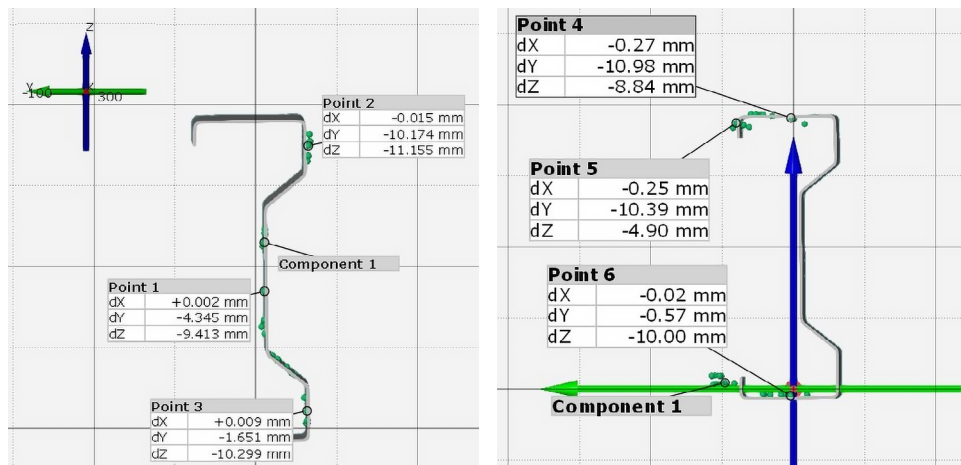
W trakcie badania, obok pomiaru przemieszczeń za pomocą programu Aramis i Tritop, mierzono także odkształcenia w środku rozpiętości belki za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych, usytuowanych równolegle do podłużnej osi belki w punktach przedstawionych na rycinie 7.10.

7.2.2. Postacie zniszczenia próbek

Podczas badania wszystkie belki deformowały się w sposób przedstawiony na zamieszczonych zdjęciach (ryc. 7.11). Pod wpływem obciążenia przekrój otwierał się. Półka górna unosiła się pomiędzy punktami przyłożenia obciążenia. Górna część przekroju wychodziła z płaszczyzny pionowej belki. W samych punktach przyłożenia obciążenia występowały lokalne odkształcenia półki górnej. Półka dolna nie ulegała zniszczeniu, a cały przekrój ulegał bardzo nieznacznemu skręceniu. Położenie punktów przekroju przykładowej belki w środku jej rozpiętości przy obciążeniu 25 kN przedstawiono na rycinie 7.12.



Ryc. 7.11. Fotografie zdeformowanych próbek: a) podczas obciążenia na stanowisku badawczym, b, c, d, e) wygląd belek po wyjęciu z prasy



Ryc. 7.12. Przeszyczenia poszczególnych punktów przekroju w środku rozpiętości belki przy obciążeniu 25 kN

W trakcie badania po osiągnięciu obciążenia około 26 kN w większości belek zaobserwowano odspojenie taśm na granicy stal-klej (tab. 7.2).

Tab.7.2. Odspojenie taśm CFRP od powierzchni badanych belek

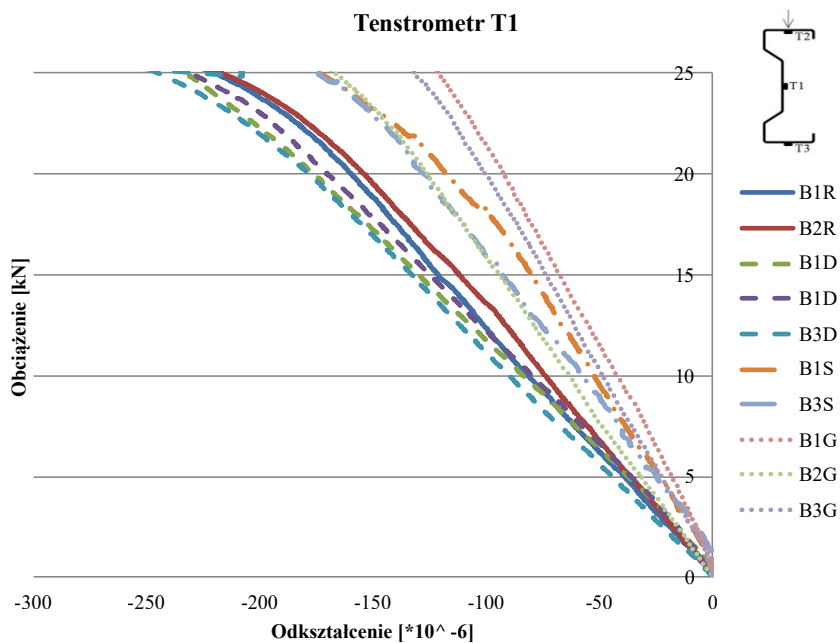
Numer próbki	Postać zniszczenia próbki	Obciążenie przy odspojeniu taśmy [kN]
B1D	całkowite odspojenie taśmy	25,6
B2D	odklejenie taśmy z jednej strony na znacznej długości (około 40%)	26,1
B3D	odklejenie taśmy z jednej strony na znacznej długości (około 40%)	26,3
B1S	odklejenie taśmy na obu końcach na długości około 30%	26,8
B2S	taśma nie uległa odklejeniu	–
B3S	delikatne odklejenie na jednym końcu (około 10%)	26,2
B1G	delikatne odklejenie na jednym końcu (około 10%)	25,4
B2G	delikatne odklejenie na jednym końcu (około 10%)	26,0
B3G	delikatne odklejenie na jednym końcu (około 10%)	27,1

Z uwagi na fakt, że pierwsze odspojenie taśmy CFRP nastąpiło przy obciążeniu 25,4 kN, a prawidłowy odczyt ze wszystkich tensometrów elektrooporowych występował do obciążenia 25 kN, zdecydowano, że za siłę niszczącą zostanie uznana siła o wartości 25 kN i przy takim poziomie obciążenia analizowany będzie wpływ zastosowania taśm CFRP na ograniczenie przemieszczeń i odkształceń badanych belek.

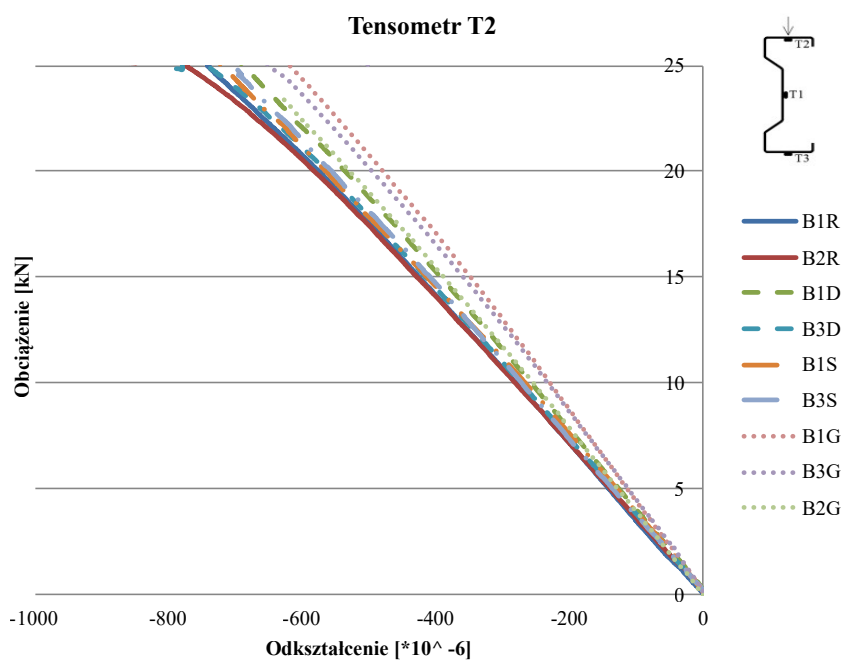
7.2.3. Analiza odkształceń

Wykres zależności obciążenie–odkształcenie, uzyskanej na podstawie odczytów z trzech tensometrów elektrooporowych (T1, T2 i T3) dla różnych lokalizacji wzmocnienia taśmami CFRP, przedstawiono odpowiednio na rycinach 7.13 i 7.14.

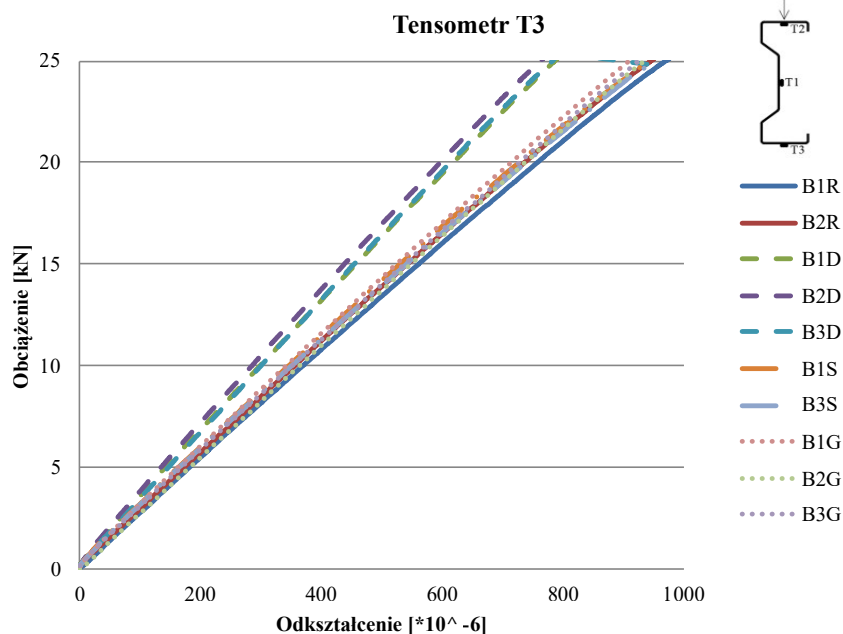
a)



b)



Ryc. 7.13. Zależność obciążenie–odkształcenie mierzona przy użyciu tensometrów elektrooporowych: a) T1, b) T2



Ryc. 7.14. Zależność obciążenie–odkształcenie mierzona przy użyciu tensometru elektrooporowego T3

W celu bardziej precyzyjnego przedstawienia uzyskanych wyników sporządzono tabelę 7.3, w której podano wartości odkształceń odczytanych z tensometrów przy poziomie obciążenia równym 25 kN.

Tab. 7.3. Odształcenie poszczególnych próbek przy obciążeniu 25 kN

	Odształcenie [$\cdot 10^{-6}$]		
	Tensometr T1	Tensometr T2	Tensometr T3
B1R	-220,1	-741,3	968,9
B2R	-217,1	-773,8	944,5
B1D	-233,3	-688,2	785,7
B2D	-230,6	-711,5	761,7
B3D	-244,7	-742,2	781,8
B1S	-173,8	-720,4	941,4
B2S	brak	brak	brak
B3S	-175	-703,2	949,4
B1G	-121,3	-618,9	909,1
B2G	-166,9	-677,7	933,7
B3G	-132	-649,8	924,3

Następnie wykonano wykresy słupkowe (ryc. 7.15–7.17) przedstawiające wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich odkształceń. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności:

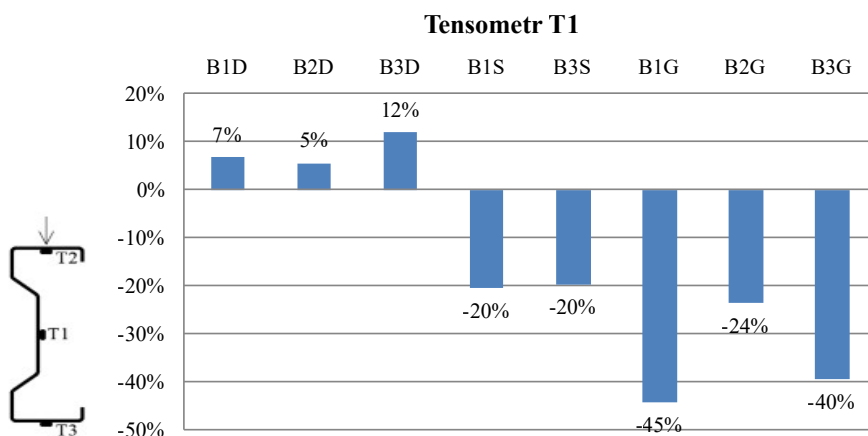
$$\rho_{\varepsilon i} = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ref}} - 1 \right) * 100\% \quad (7.1)$$

gdzie:

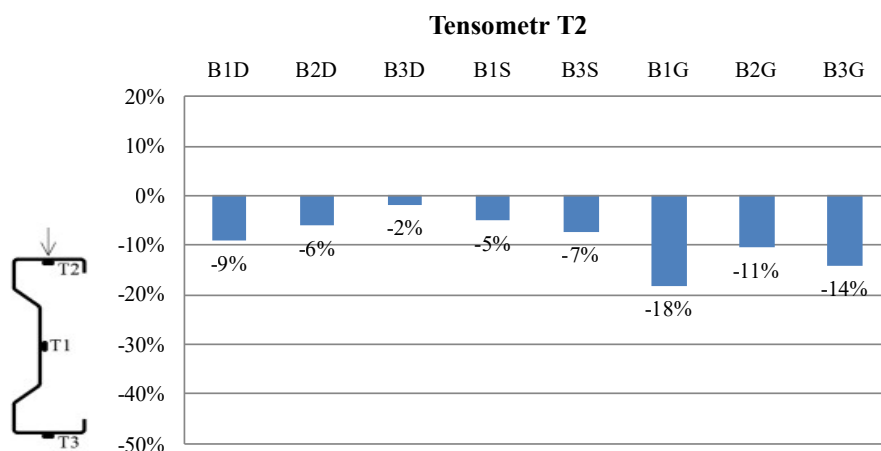
$\rho_{\varepsilon i}$ – ograniczenie lub przyrost odkształceń danej próbki
wyrażony w procentach,

ε_i – odkształcenie danej belki,

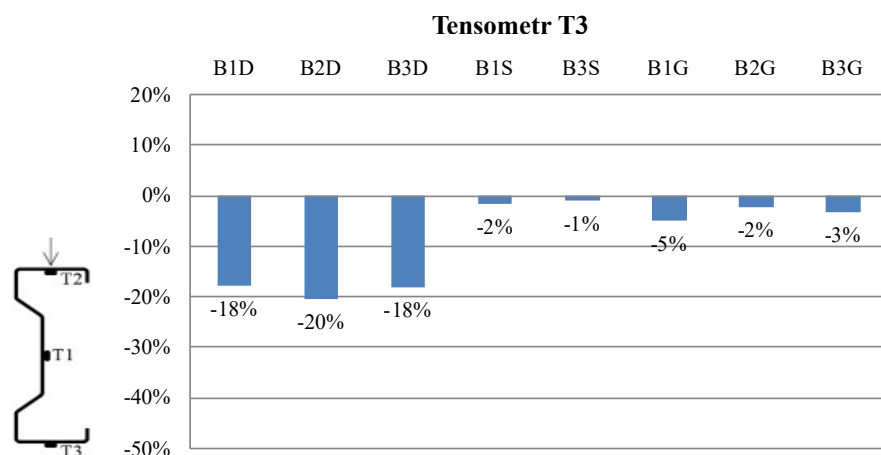
ε_{ref} – średnia arytmetyczna z wartości odkształceń dwóch belek referencyjnych (B1R i B2R).



Ryc. 7.15. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek względem belek referencyjnych w miejscu przyklejenia tensometru T1 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.16. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek względem belek referencyjnych w miejscu przyklejenia tensometru T2 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.17. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek względem belek referencyjnych w miejscu przyklejenia tensometru T3 przy obciążeniu 25 kN

W niniejszej pracy wyniki uzyskane z pomiarów tensometrycznych analizowano jedynie w dziedzinie odkształceń, a nie naprężeń. Wynikało to z faktu, że zastosowane tensometry elektrooporowe liniowe przyklejone zostały jedynie równolegle do długości belki i tylko na tym kierunku dokonywany był pomiar odkształceń. Natomiast w stalowych belkach cienkościennych o przekroju monosymetrycznym, jakim jest przekrój typu sigma, w trakcie obciążenia pojawiał się złożony stan naprężeń, w następstwie którego belka zgięła się i nieznacznie

skręcała, a przekrój doznawał dużych deformacji konturu. Dlatego też przeliczenie odkształceń na zastępcze naprężenia wypadkowe byłoby obarczone dużym błędem. Nie stanowi to jednak o braku przydatności uzyskanych wyników, gdyż zgodnie z zamysłem autora przeprowadzone badania pozwalają na przedstawienie wpływu zastosowania wzmocnienia na ograniczenie pomierzonych wartości odkształceń w jednym kierunku.

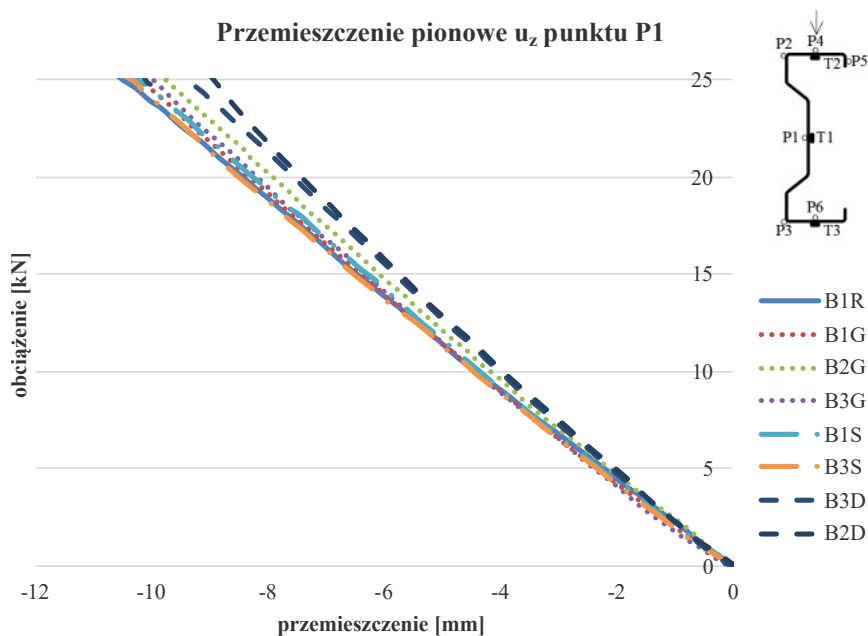
7.2.4. Analiza przemieszczeń

Podczas prowadzenia badań laboratoryjnych przemieszczenia kontrolowano za pomocą dwóch sprzężonych ze sobą soczewek systemu Aramis. Umożliwiło to równoczesną obserwację belek z dwóch stron, co jest ważne w przypadku przekrojów monosymetrycznych. Przemieszczenia analizowano w sześciu naklejonych na belki punktach pomiarowych w środku ich rozpiętości. Lokalizacja punktów w przekroju jest wskazana na schematach dołączonych do wykresów na rycinach 7.18–7.20 oraz 7.22–7.24.

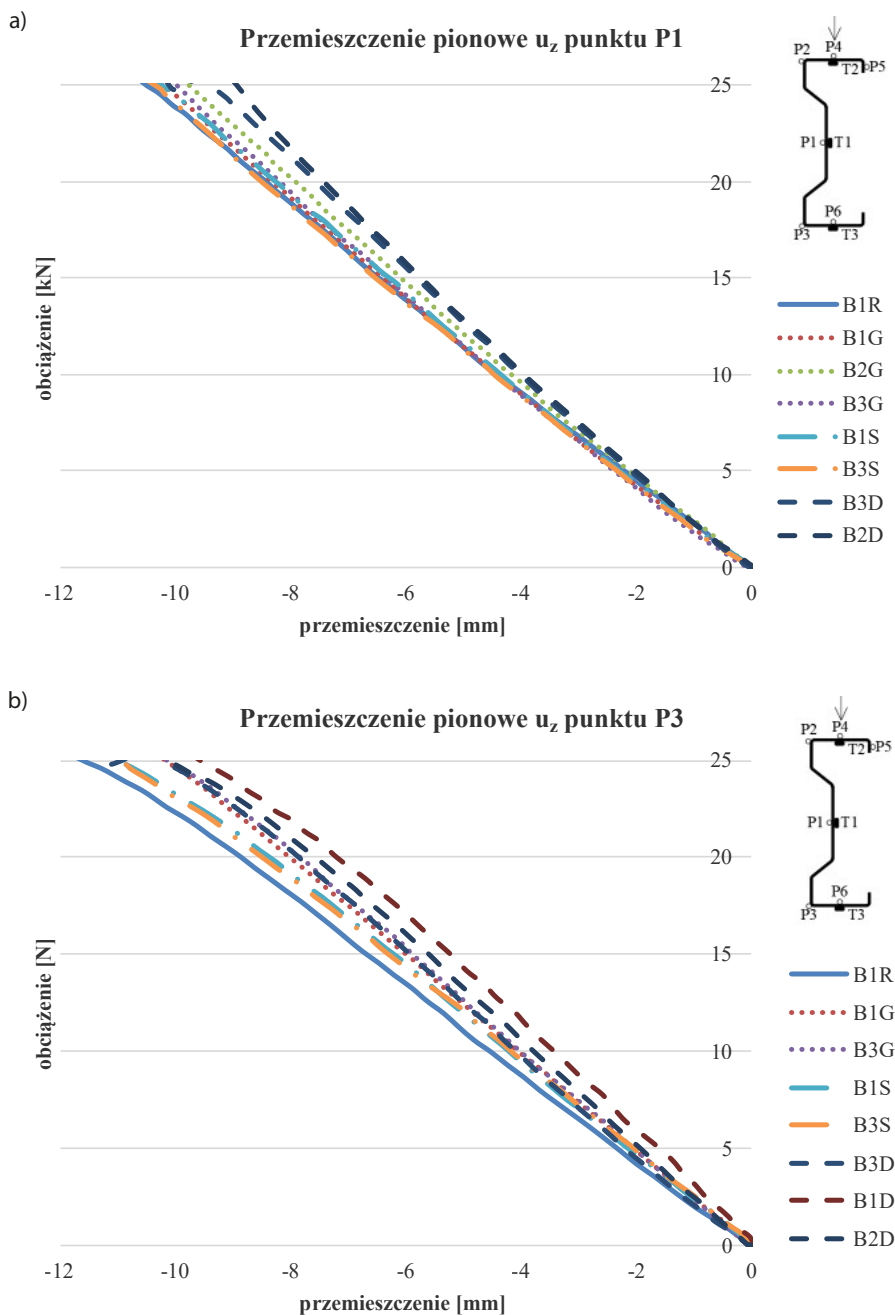
W pracy pominięto prezentacje przemieszczeń punktu P6, gdyż były to wykresy niekompletne z uwagi na zacinienie punktu oraz nie wносиły one nowych informacji o wpływie taśm CFRP na ograniczenie przemieszczeń belek. Brak wyników dla poszczególnych belek na wykresach wynika z zacinienia punktu pomiarowego, a tym samym braku możliwości wykonania odczytu w programie GOM Correlate.

7.2.4.1. Przeszyszczenia w kierunku pionowym

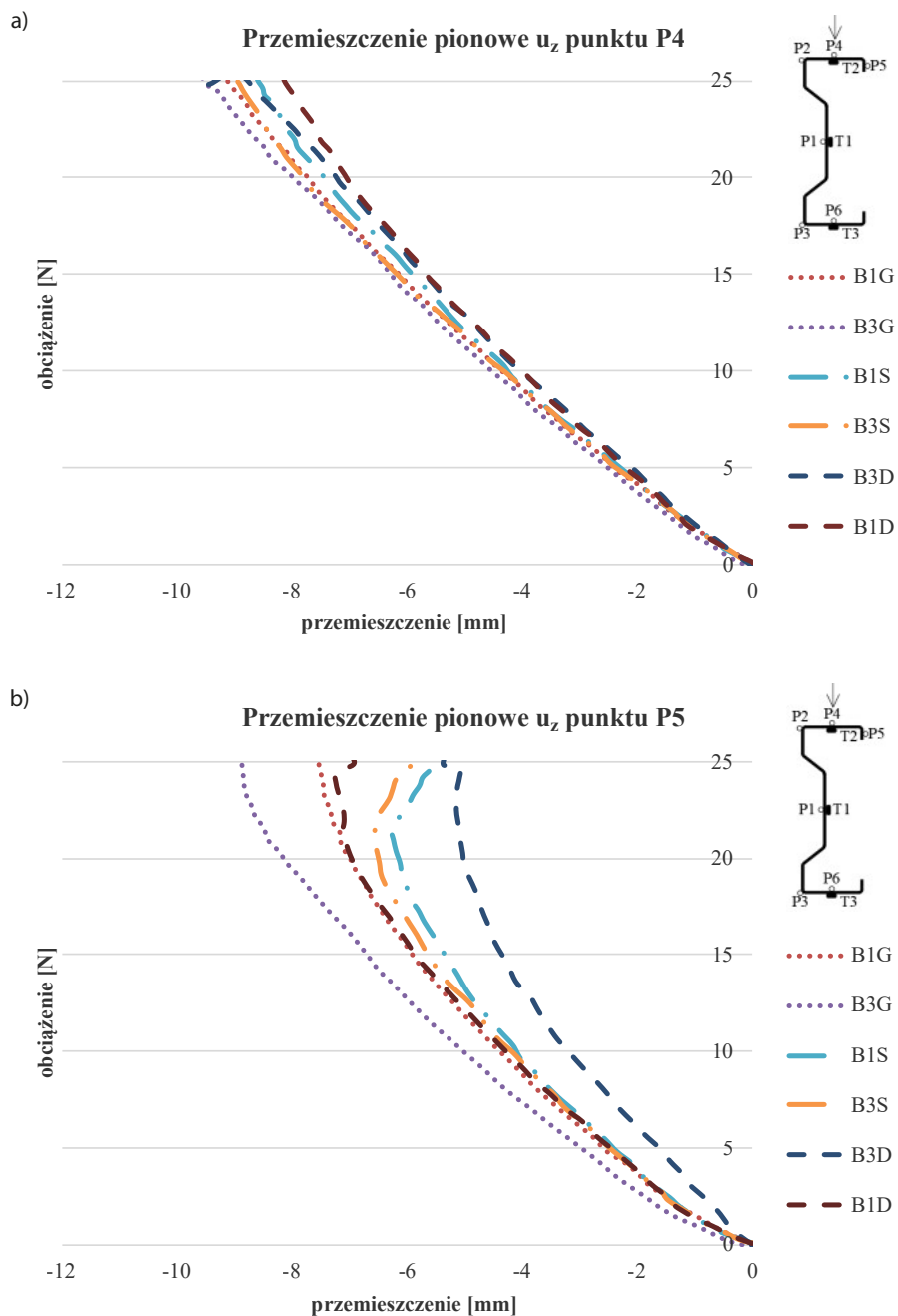
Zależność przesyszczenia w kierunku pionowym (u_z) od obciążenia badanych belek przedstawiono na poniższych wykresach (ryc. 7.18–7.20).



Ryc. 7.18. Zależność obciążenie–przesyszczenie mierzona w punkcie P1 w kierunku pionowym



Ryc. 7.19. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach:
 a) P2, b) P3 w kierunku pionowym



Ryc. 7.20. Zależność obciążenie–przeszczenie mierzona w punktach:
a) P4, b) P5 w kierunku pionowym

W celu ułatwienia sformułowania wniosków wykonano wykres słupkowy (ryc. 7.21) przedstawiający wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach, na ograniczenie ich przemieszczeń na poziomie obciążenia 25 kN. Na wykresie przedstawiono wartości dla punktów P1, P2 i P3, punkty P4 i P5 pominięto, ponieważ nie odczytano w nich przemieszczeń belki referencyjnej B1R. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności:

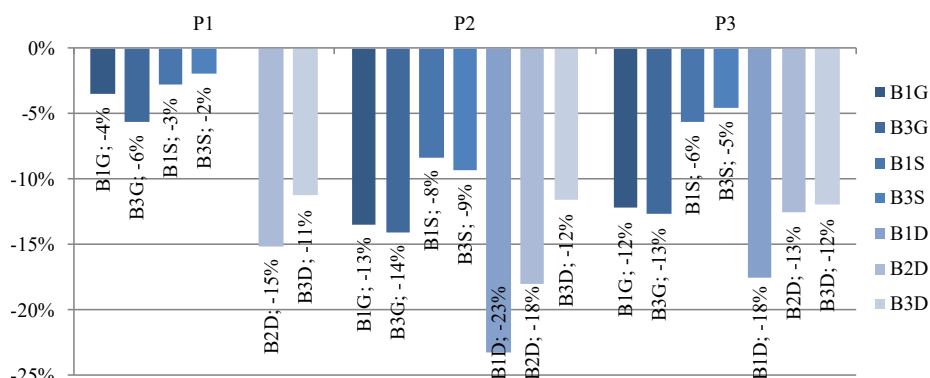
$$\rho_{ui} = \left(\frac{u_i}{u_{ref}} - 1 \right) * 100\% \quad (7.2)$$

gdzie:

ρ_{ui} – ograniczenie lub przyrost przemieszczeń danej próbki wyrażony w procentach,

u_i – przemieszczenie danej belki,

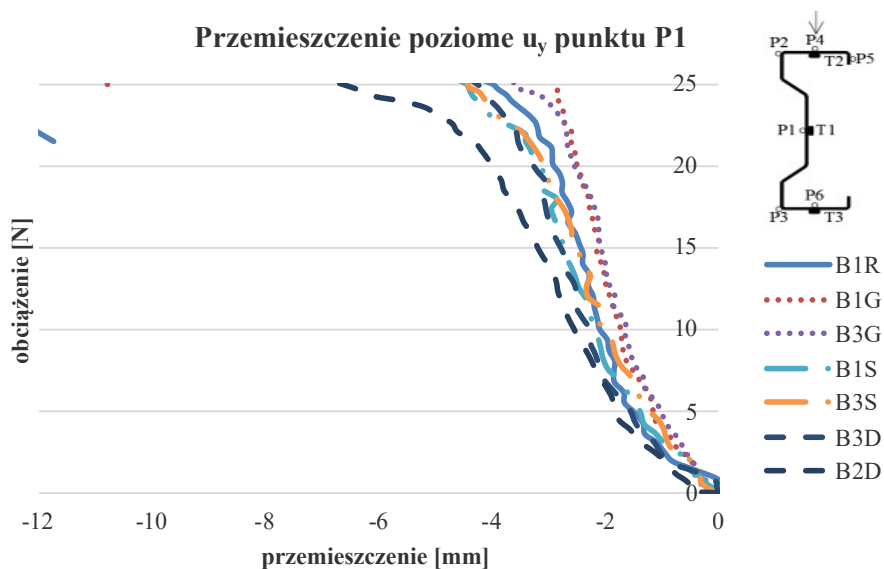
u_{ref} – przemieszczenie belki referencyjnej.



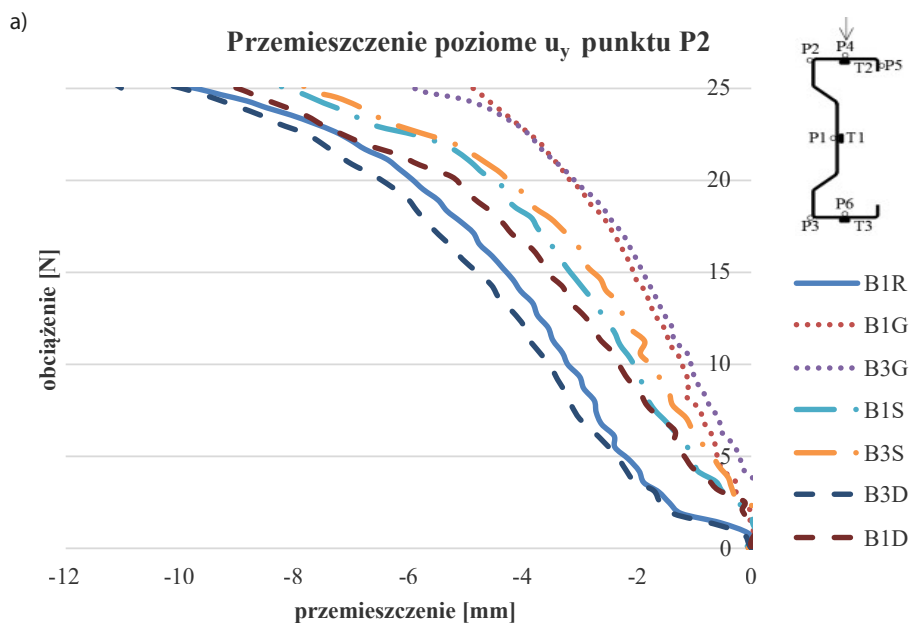
Ryc. 7.21. Procentowe ograniczenie przemieszczeń pionowych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1, P2 i P3 przy obciążeniu 25 kN

7.2.4.2. Przeszacowania w kierunku poziomym

Zależność przeszacowania w kierunku poziomym (u_y), prostopadle do osi podłużnej belki, od obciążenia badanych belek przedstawiono na poniższych wykresach (ryc. 7.22–7.24).

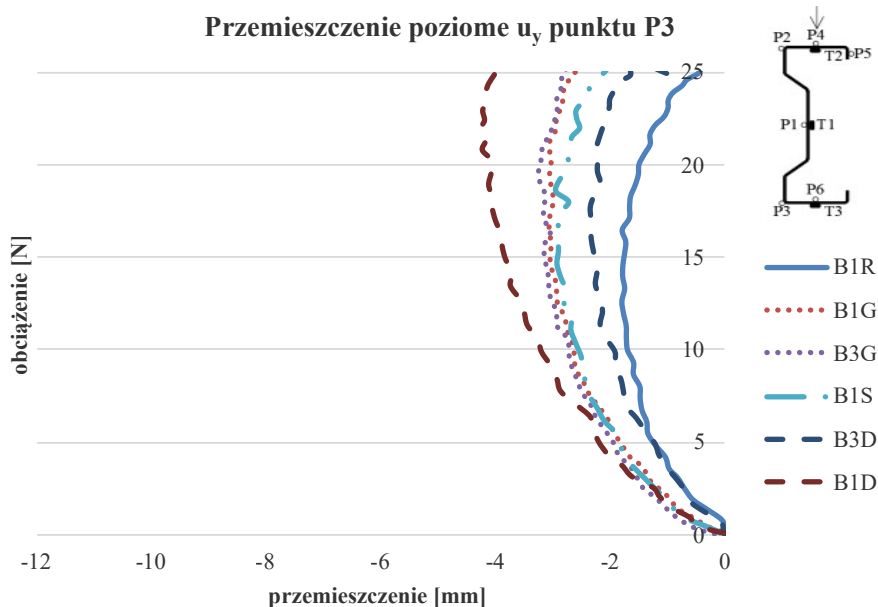


Ryc. 7.22. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punkcie P1 w kierunku poziomym, prostopadle do osi podłużnej belki



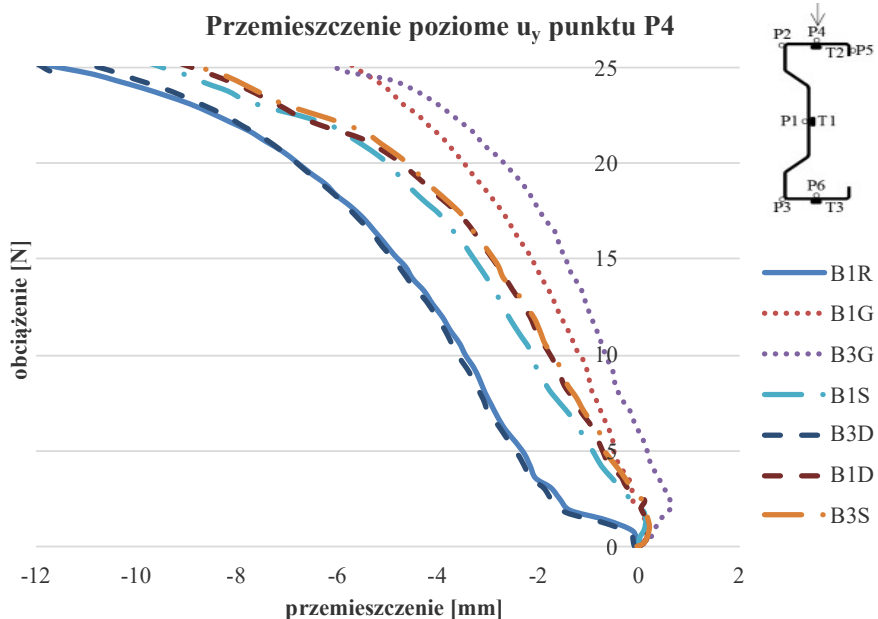
Ryc. 7.23. (a) Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach: a) P2

b)

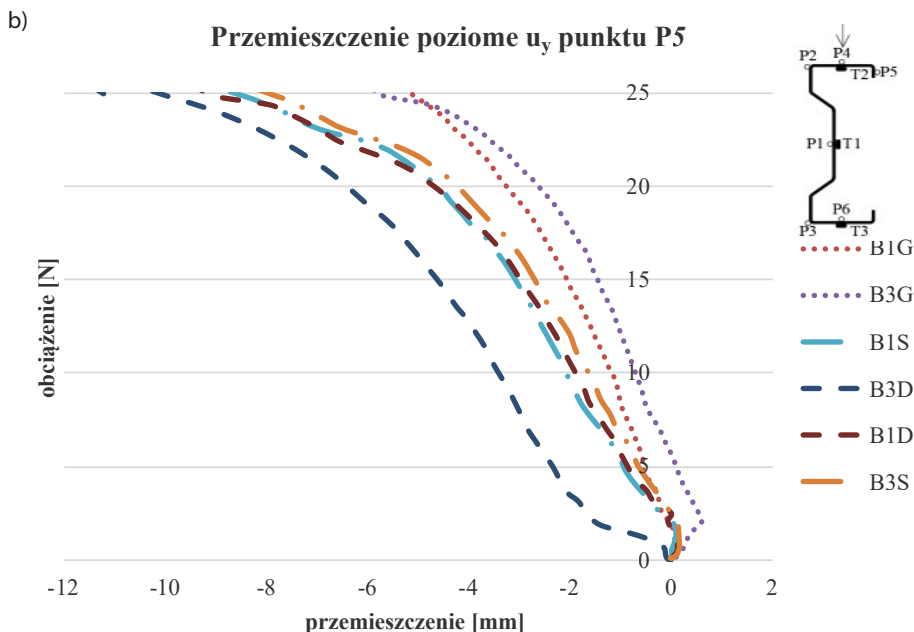


Ryc. 7.23. (b) Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach:
b) P3 w kierunku poziomym, prostopadłe do osi podłużnej belki

a)

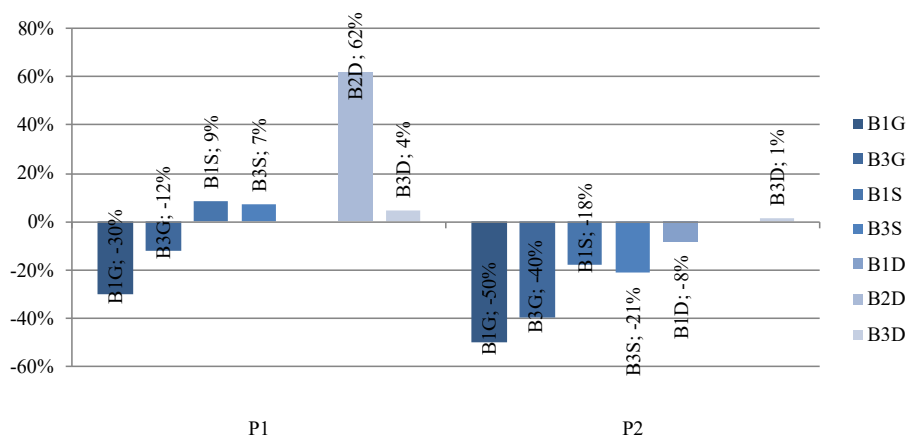


Ryc. 7.24. (a) Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach: a) P4



Ryc. 7.24. (b) Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach:
b) P5 w kierunku poziomym, prostopadłym do osi podłużnej belki

Analogicznie do punktu 7.2.4.1 w celu ułatwienia sformułowania wniosków wykonano wykres słupkowy (ryc. 7.25) przedstawiający wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach, na ograniczenie ich przemieszczeń na poziomie obciążenia 25 kN. Na wykresie przedstawiono wartości dla punktów P1, P2. Pominięto określenie procentowego ograniczenia przemieszczeń poziomych, w kierunku prostopadłym do osi podłużnej belki, w punkcie P3. Wartości przemieszczenia poziomego belek w tym punkcie są niewielkie, a z uwagi na sposób pracy belek przy tym poziomie obciążenia (przejście przez położenie równowagi) procentowe analizy nie oddają wprost wpływu zastosowania taśm na ograniczenie przemieszczeń (patrz ryc. 7.23 b). Punkty P4 i P5 pominięto, ponieważ nie odczytano w nich przemieszczeń belki referencyjnej B1R. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności 7.2.



Ryc. 7.25. Procentowe ograniczenie przemieszczeń poziomych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1 i P2 przy obciążeniu 25 kN

7.2.5. Wnioski z pierwszego etapu badań

Na podstawie analiz przedstawionych w punktach 7.2.3 i 7.2.4 sformułowano następujące wnioski:

1. Belki o wysokości 200 mm podczas badań laboratoryjnych ulegały zginaniu i nieznacznemu skręcaniu, a ich przekrój doznawał znacznych deformacji dystorsyjnych.
2. W przypadku zastosowania taśm CFRP na górnej półce wystąpiło największe zmniejszenie odkształceń w środku (w skrajnym przypadku o ok. 45%) w stosunku do średniej wartości odkształceń zmierzonych w belkach niewzmocnionych. Z kolei zastosowanie taśm w półce dolnej spowodowało zwiększenie odkształceń w środku względem belek nieposiadających wzmocnienia. Co zaskakujące, zastosowanie taśm w środku wysokości przekroju ograniczyło odkształcenia zarejestrowane przez tensometr T1 w mniejszym stopniu niż w przypadku zastosowania taśm na półce górnej.
3. W przypadku zastosowania taśm CFRP na górnej półce (ściskanej) nastąpiło zmniejszenie odkształceń nawet o 18% względem belek referencyjnych. Zastosowanie taśm w półce dolnej również spowodowało zmniejszenie odkształceń względem belek nieposiadających wzmocnienia, ale uzyskane wyniki dla belek B1D, B2D i B3D są dosyć rozbieżne, co utrudnia wyciągnięcie jednoznacznych wniosków. Zastosowanie taśm w środku ograniczyło odkształcenia półki górnej średnio o 6%.

4. Zastosowanie taśm CFRP w półce dolnej (rozciąganej) spowodowało ograniczenie odkształceń średnio o 18,7% względem belek nieposiadających wzmocnienia. Natomiast zastosowanie taśm w półce górnej lub w środniku minimalnie wpłynęło na ograniczenie odkształceń mierzonych tensometrem T3.
5. Chcąc ograniczać przemieszczenia pionowe, należy umieszczać taśmę CFRP w półce dolnej belki, natomiast w celu ograniczenia przemieszczenia poziomego, a co za tym idzie skręcenia belki, należy wzmacniać półkę górną przekroju.
6. Umieszczenie taśmy CFRP w półce górnej przekroju pozwoliło w przeprowadzonych badaniach ograniczyć przemieszczenie poziome środnika belki (punkt P1) średnio o 21%, przemieszczenia poziome górnej części belki w punkcie P2 średnio o 45%, półki górnej belki (punkt P4) średnio o 49,5%. W skrajnych przypadkach uzyskano ograniczenie przemieszczenia poziomego w tych trzech punktach odpowiednio o 30%, 50% i 50,7%.
7. Według pomiarów przeprowadzonych dla belki referencyjnej w punkcie P3 należy stwierdzić, że zastosowanie taśm nie ogranicza przemieszczeń poziomych w dolnej części belki.
8. Chcąc ograniczyć przemieszczenia pionowe, należy wzmacniać rozciąganą półkę dolną. W przeprowadzonym badaniu pozwoliło to na ograniczenie przemieszczenia pionowego środnika średnio o 13%, części górnej przekroju w punkcie P2 średnio o 17,6%, a w części dolnej (punkt P3) średnio o 14,3%. Maksymalnie udało się osiągnąć ograniczenie pionowych przemieszczeń w tych punktach odpowiednio o 15%, 23% i 18%.
9. Zastosowanie wzmocnienia w środniku belki ogranicza przemieszczenia pionowe w najmniejszym stopniu. Chcąc ograniczyć przemieszczenia poziome, należy wziąć pod uwagę, że zastosowanie wzmocnienia w środniku jest bardziej efektywne od wzmocnienia półki dolnej, ale znacznie mniej skuteczne niż w przypadku umieszczenia taśmy CFRP w półce górnej przekroju.
10. Należy podkreślić, że zastosowanie wzmocnienia w postaci taśm CFRP powoduje zmianę położenia środka ciężkości przekroju i wpływa bezpośrednio na rozkład naprężeń, a tym samym odkształceń w przekroju. Jest to bezpośrednio widoczne na wykresach zamieszczonych w pracy (np. ryc. 7.16 i 7.17). Równocześnie warto zauważyć, że przykładowo umieszczenie taśmy CFRP na

środnika powoduje zmianę momentów bezwładności względem obu osi o mniej niż 0,5% i powoduje przesunięcie środka ciężkości o jedyne 0,32 mm w kierunku poziomym, a jednocześnie ogranicza przemieszczenia pionowe o 9%, a poziome nawet o 21%.

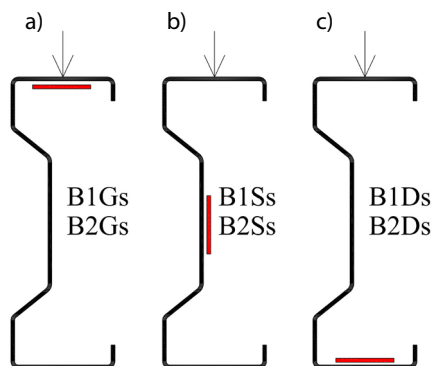
7.3. Drugi etap badań

7.3.1. Zakres badań

W drugim etapie badań analizowano sześć stalowych belek cienkościennych o przekroju typu sigma o wysokości 200 mm, szerokości 70 mm i grubości ścianki 2 mm, a więc o takiej samej charakterystyce geometrycznej jak belki z etapu pierwszego (ryc. 7.8 i tab. 7.1). Również stanowisko badawcze i sposób przygotowania próbek oraz umiejscowienie punktów pomiarowych były takie same jak w pierwszym etapie badań.

Jedyna różnica dotyczyła materiału użytego do wzmocnienia próbek. Tym razem na belkach umieszczano taśmę stalową o szerokości 50 mm i grubości 1,5 mm, wykonaną ze stali S235, o granicy plastyczności 235 MPa i granicy wytrzymałości stali 410 MPa. Taśmę stalową przyklejono do belek za pomocą kleju SikaDur®-30. Klej przygotowano zgodnie z instrukcjami producenta, a belki poddano obciążeniu po 7 dniach od przyklejenia taśmy w celu uzyskania pełnej wytrzymałości połączenia klejonego. Grubość warstwy kleju wynosiła 1,3 mm, a długość taśmy stalowej 175 cm (długość zakotwienia w odniesieniu do ryc. 2.1 wynosiła 15 cm).

Badaniu poddano dwie belki wzmocnione taśmą stalową umieszczoną po wewnętrznej stronie półki górnej (B1Gs, B2Gs, ryc. 7.26a), taśmą przyklejoną po wewnętrznej stronie środnika (B1Ss, B2Ss, ryc. 7.26b) oraz dwie belki ze wzmocnieniem usytuowanym po wewnętrznej stronie półki dolnej (B1Ds, B2Ds, ryc. 7.26c). Jak można zauważyć mała litera „s” oznacza wzmocnienie realizowane za pomocą taśmy stalowej. Schemat rozmieszczenia taśm stalowych wraz z oznaczeniem próbek przedstawiono na rycinie 7.26.



Ryc. 7.26. Rozmieszczenie taśm stalowych i oznaczenie próbek: a) belki typu B wzmocnione górną – (G), b) belki typu B wzmocnione na środku – (S), c) belki typu B wzmocnione dołem – (D)

Efektywność zastosowanego wzmocnienia określono poprzez porównanie wyników przemieszczeń i odkształceń belek wzmocnionych i belek niewzmocnionych (tj. belek referencyjnych B1R i B2R z pierwszego etapu badań).

7.3.2. Postacie zniszczenia próbek

Mechanizm zniszczenia belek wzmocnionych przy użyciu taśm stalowych był bardzo podobny do form zniszczenia belek wzmocnionych przy użyciu taśm CFRP (punkt 7.2.2).

W trakcie badania po przekroczeniu obciążenia 25–26 kN we wszystkich próbkach zaobserwowano odspojenie taśm na granicy klej-stal (tab. 7.4). Sposób odspojenia taśmy stalowej od badanych belek przedstawiono na rycinie 7.27.

Tab. 7.4. Odspojenie taśm stalowych od powierzchni badanych belek

Numer próbki	Postać zniszczenia próbki	Obciążenie przy odspojeniu taśmy [kN]
B1Ds	odklejenie taśmy na znacznej długości z jednej strony (około 40%)	25,8
B2Ds	odklejenie taśmy na znacznej długości z jednej strony (około 40%)	26,2
B1Ss	delikatne odklejenie na jednym końcu (około 10%)	25,1
B2Ss	odklejenie taśmy na obu końcach (około 20%)	26,6
B1Gs	odklejenie taśmy na obu końcach (około 20%)	25,9
B2Gs	odklejenie taśmy na obu końcach (około 20%)	26,4



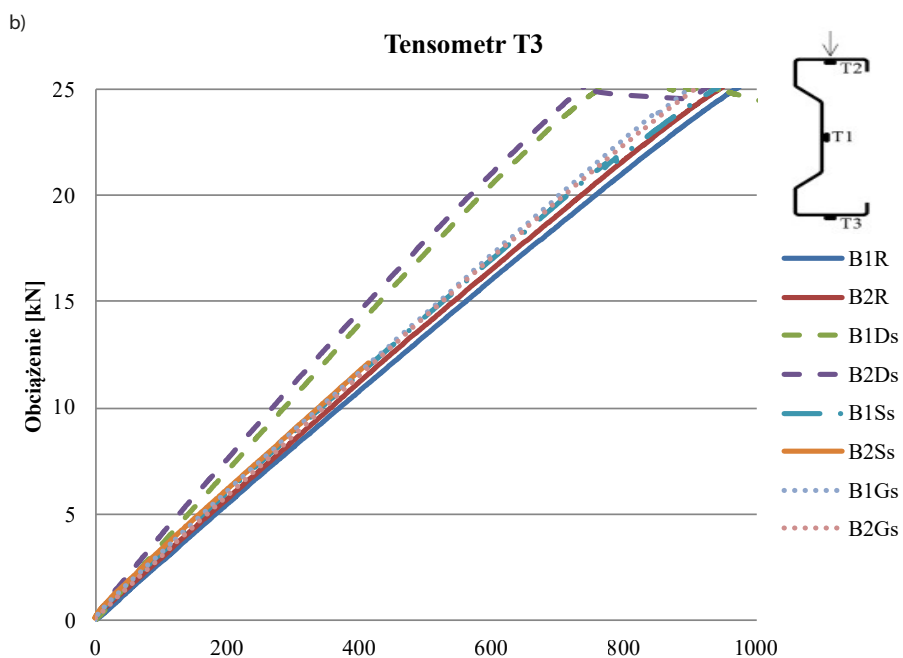
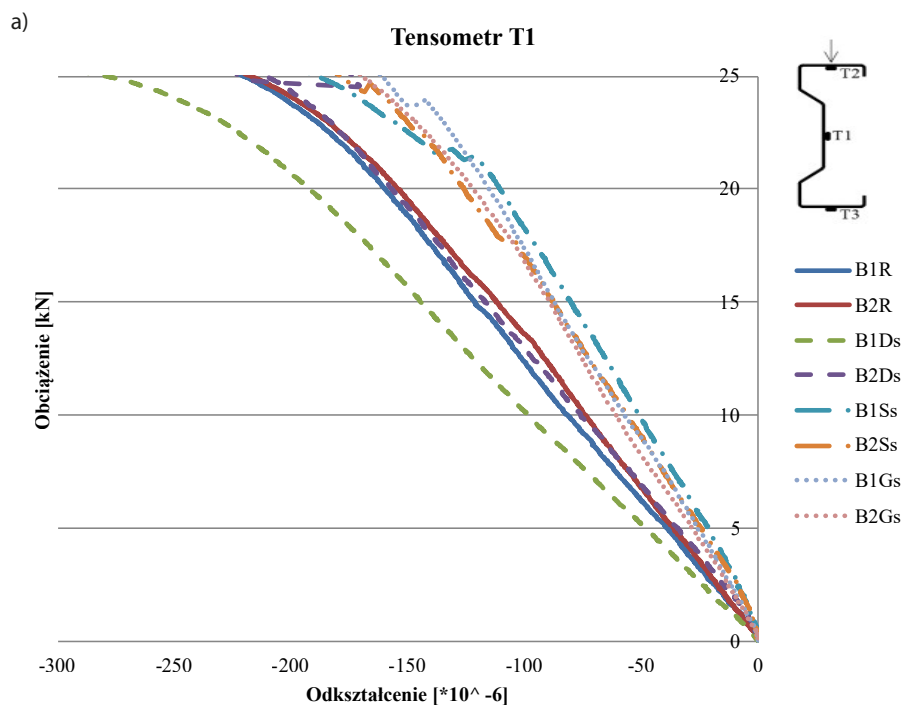
Ryc. 7.27. Odspojenie taśmy stalowej

Z uwagi na fakt, że pierwsze odspojenie taśmy stalowej nastąpiło przy obciążeniu 25,1 kN, a prawidłowy odczyt ze wszystkich tensometrów elektrooporowych był możliwy do obciążenia o wartości 25 kN, zdecydowano, że za siłę niszczącą, tak jak w pierwszym etapie badań, zostanie uznana siła 25 kN i przy takim poziomie obciążenia analizowany będzie wpływ zastosowania taśm stalowych na ograniczenie przemieszczeń i odkształceń badanych belek.

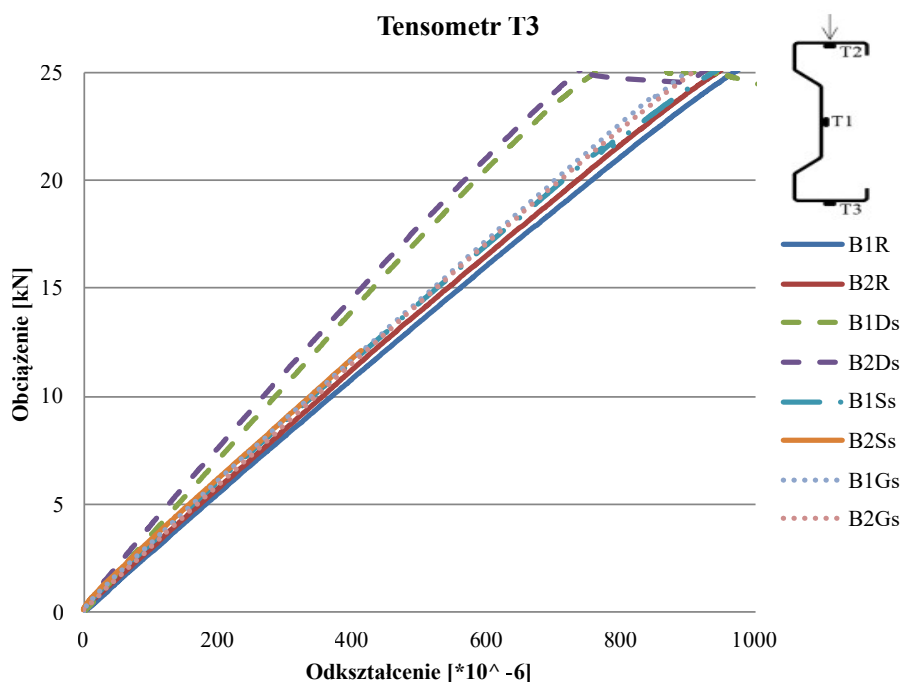
7.3.3. Analiza odkształceń

Podczas prowadzenia drugiego etapu badań laboratoryjnych, tak samo jak w przypadku etapu pierwszego, mierzono odkształcenia stalowych belek cienkościennych przy użyciu trzech tensometrów elektrooporowych umieszczonych w środku rozpiętości belki. Rozmieszczenie poszczególnych tensometrów w przekroju przedstawiono na wykresach (ryc. 7.28 i 7.29). Tensometry naklejono równolegle do podłużnej osi belki.

Wykres zależności obciążenie-odkształcenie uzyskanej na podstawie odczytów z trzech tensometrów elektrooporowych (T1, T2 i T3), dla różnych lokalizacji wzmocnienia taśmami CFRP, przedstawiono odpowiednio na rycinach 7.28 i 7.29.



Ryc. 7.28. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometrów elektrooporowych
a) T1, b) T2



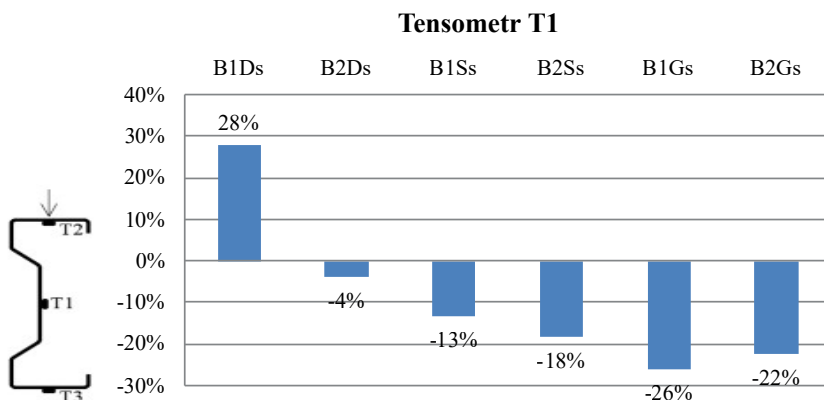
Ryc. 7.29. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru elektrooporowego T3

Szczegółowe zestawienie odkształceń odczytanych z tensometrów przy poziomie obciążenia o wartości 25 kN zawarto w tabeli 7.5.

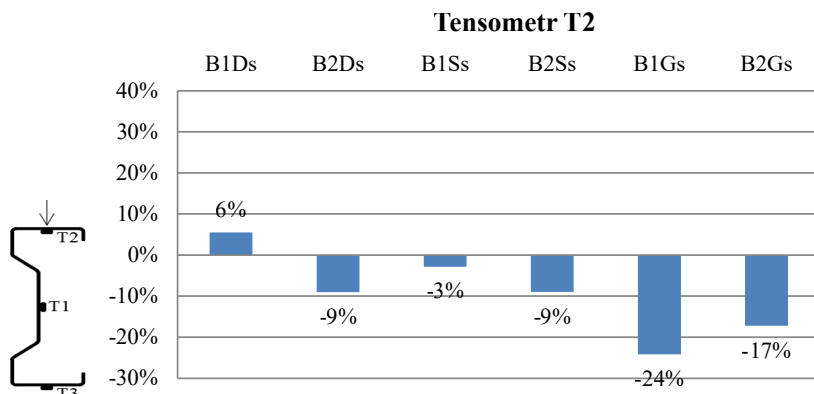
Tab. 7.5. Odształcenie poszczególnych próbek przy obciążeniu 25 kN

	odkształcenie [$\cdot 10^{-6}$]		
	Tensometr T1	Tensometr T2	Tensometr T3
B1R	-220,1	-741,3	968,9
B2R	-217,1	-773,8	944,5
B1Ds	-279,7	-799,4	764,6
B2Ds	-210,1	-689,0	734,9
B1Ss	-189,4	-736,0	938,1
B2Ss	-178,8	-689,6	939,1
B1Gs	-161,0	-574,4	897,9
B2Gs	-169,7	-627,0	907,1

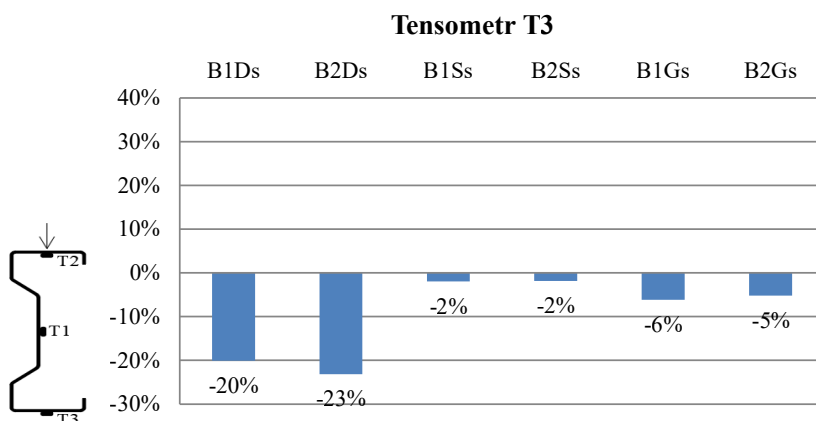
Wpływ różnych konfiguracji wzmocnienia na ograniczenie odkształceń belek przedstawiono na rycinach 7.30–7.32. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności (7.1).



Ryc. 7.30. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek względem belek referencyjnych w miejscu przyklejenia tensometru T1 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.31. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek względem belek referencyjnych w miejscu przyklejenia tensometru T2 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.32. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek względem belek referencyjnych w miejscu przyklejenia tensometru T3 przy obciążeniu 25 kN

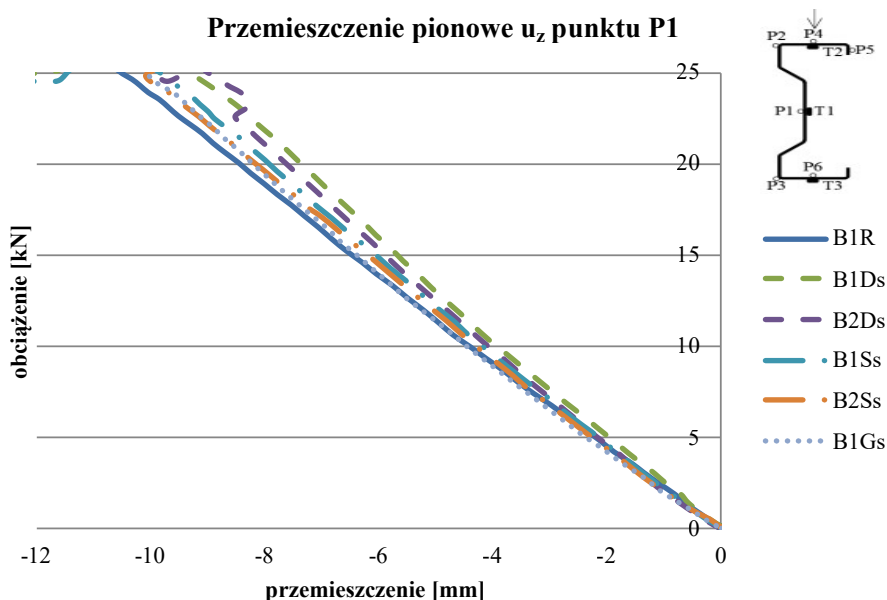
7.3.4. Analiza przemieszczeń

Przemieszczenia belek mierzono za pomocą dwóch sprzężonych ze sobą soczewek systemu Aramis w taki sam sposób jak w etapie pierwszym. Przemieszczenia analizowano w sześciu naklejonych na belki punktach w środku ich rozpiętości. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawiono na rysunkach 7.33–7.34 i 7.36–7.37.

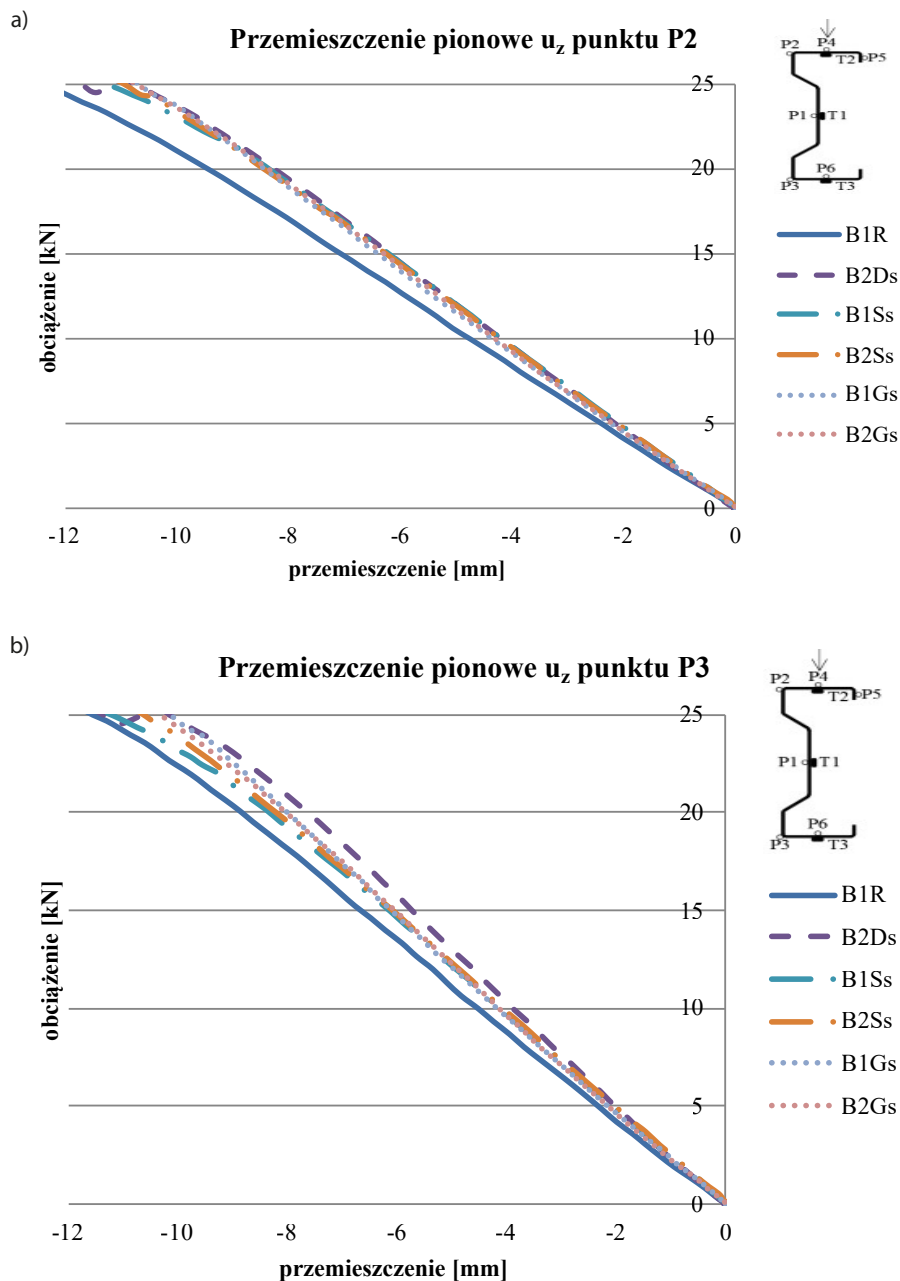
W pracy pominięto prezentacje przemieszczeń punktów P4, P5 i P6, gdyż były to wykresy niekompletne z uwagi na zacinienie punktu oraz nie wnosiły one nowych informacji o wpływie taśm stalowych na ograniczenie przemieszczeń belek. Analogicznie brak wyników dla poszczególnych belek na wykresach wynika z zacinienia punktu pomiarowego, a tym samym braku możliwości wykonania odczytu w programie GOM Correlate.

7.3.4.1. Przemieszczenia w kierunku pionowym

Zależność przemieszczenia w kierunku pionowym (u_z) od obciążenia badanych belek przedstawiono na poniższych wykresach (ryc. 7.33 i 7.34).

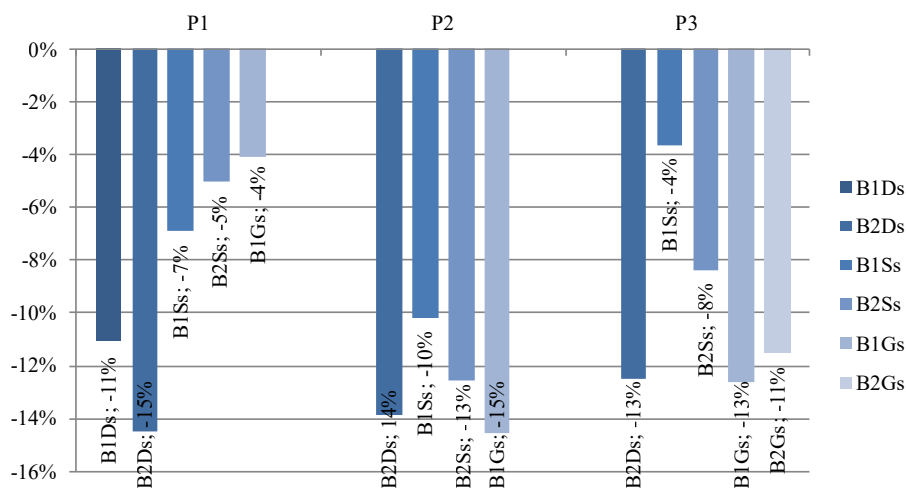


Ryc. 7.33. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punkcie P1 w kierunku pionowym



Ryc. 7.34. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach:
a) P2, b) P3 w kierunku pionowym

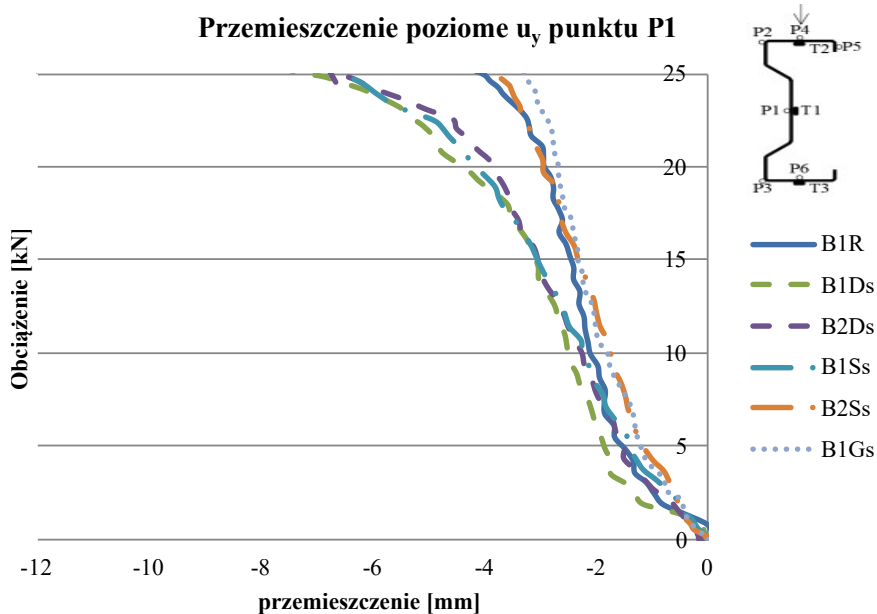
W celu ułatwienia sformułowania wniosków wykonano wykres słupkowy (ryc. 7.35) przedstawiający wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich przemieszczeń wywołanych działaniem obciążenia o wartości 25 kN. Na wykresie przedstawiono wyniki uzyskane dla punktów P1, P2 i P3. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności 7.2.



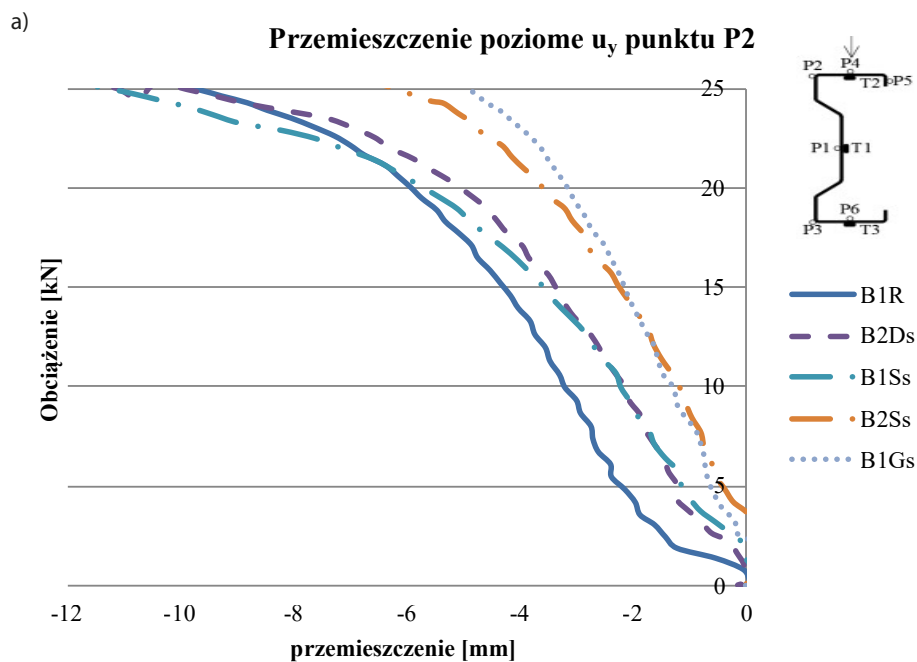
Ryc. 7.35. Procentowe ograniczenie przemieszczeń pionowych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1, P2 i P3 przy obciążeniu 25 kN

7.3.4.2. Przemieszczenia w kierunku poziomym

Zależność przemieszczenia w kierunku poziomym (u_y), prostopadłe do osi podłużnej belki, od obciążenia badanych belek przedstawiono na wykresach (ryc. 7.36 i 7.37).

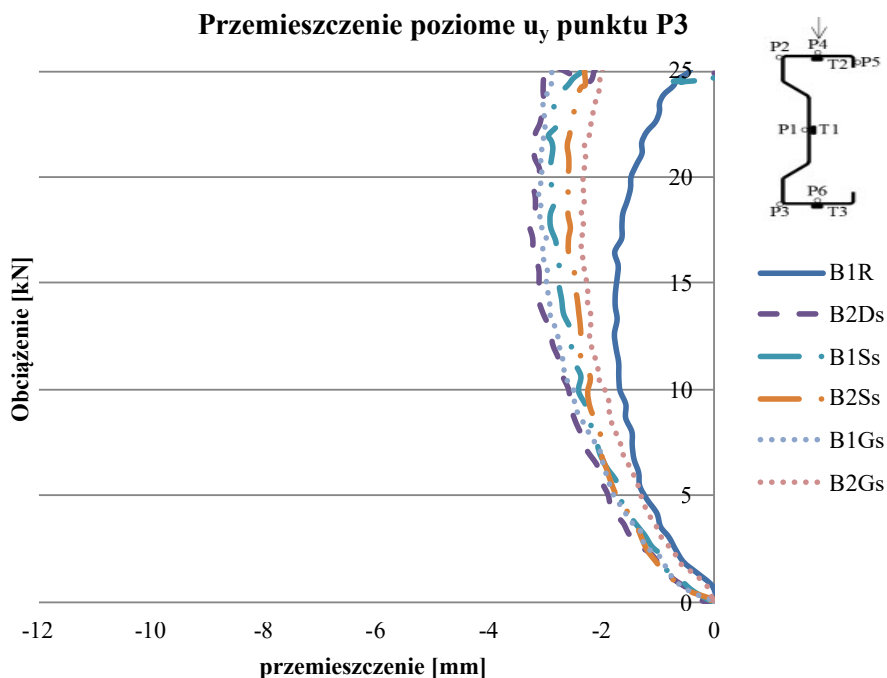


Ryc. 7.36. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punkcie P1 w kierunku poziomym, prostopadłe do osi podłużnej belki



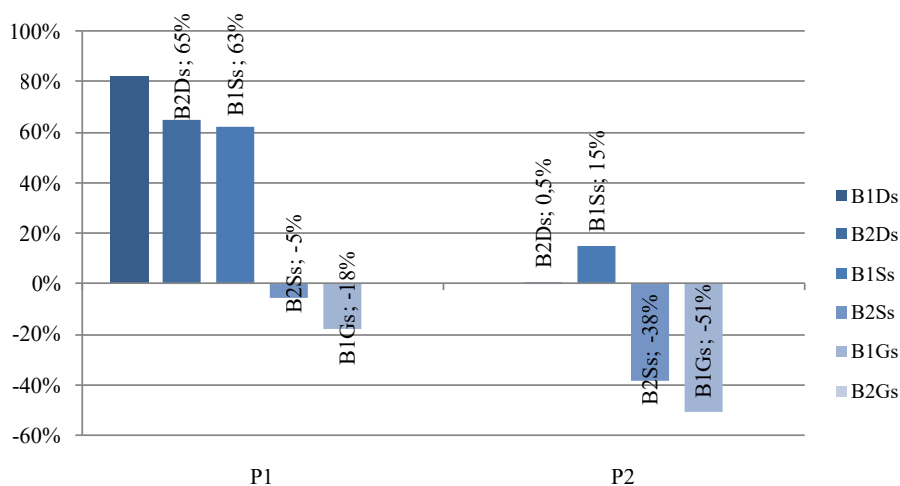
Ryc. 7.37. (a) Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach: a) P2

b)



Ryc. 7.37. (b) Zależność obciążenie–przesunięcie mierzona w punktach:
b) P3 w kierunku poziomym, prostopadle do osi podłużnej belki

Analogicznie do punktu 7.3.4.1 w celu ułatwienia sformułowania wniosków wykonano wykres słupkowy (ryc. 7.38) przedstawiający wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich przemieszczeń na poziomie obciążenia 25 kN. Na wykresie przedstawiono wartości dla punktów P1 i P2. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności 7.2. Pominięto określenie procentowego ograniczenia przemieszczeń poziomych, w kierunku prostopadłym do osi podłużnej belki, w punkcie P3. Wartości przemieszczenia poziomego belek w tym punkcie są niewielkie, a z uwagi na sposób pracy belek przy tym poziomie obciążenia (przejście przez położenie równowagi) procentowe analizy nie oddają wprost wpływu zastosowania taśm na ograniczenie przemieszczeń (patrz ryc. 7.37b).



Ryc. 7.38. Procentowe ograniczenie przemieszczeń poziomych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1 i P2 przy obciążeniu 25 kN

7.3.5. Wnioski z drugiego etapu badań

Na podstawie analiz przedstawionych w punktach 7.3.3 i 7.3.4 sformułowano następujące wnioski:

1. Sposób pracy belek wzmocnionych taśmami stalowymi był taki sam jak w przypadku wzmocnienia CFRP. Taśmy uległy odklejeniu przy podobnej wartości obciążenia. Moment odklejenia taśmy stanowił kryterium zniszczenia belek. Za siłę niszczącą uznano obciążenie 25 kN.
2. W przypadku zastosowania taśm stalowych na górnej półce wystąpiło największe ograniczenie odkształceń w środku wysokości belki (średnio o 24%) w stosunku do belek referencyjnych. Co zaskakujące, zastosowanie taśm w środku wysokości przekroju ograniczyło odkształcenia zarejestrowane przez tensometr T1 w mniejszym stopniu (średnio o 15,5%) niż w przypadku zastosowania taśm na półce górnej. Wyniki otrzymane dla belek wzmocnionych w półce dolnej są bardzo rozbieżne, przez co trudno wyciągnąć jednoznaczne wnioski.
3. W konsekwencji zastosowania taśm stalowych na górnej półce nastąpiło zmniejszenie odkształceń półki górnej w miejscu tensometru T2 średnio o 20,5% względem belek nieposiadających wzmocnienia. Uzyskane wyniki dla belek B1Ds i B2Ds są dosyć

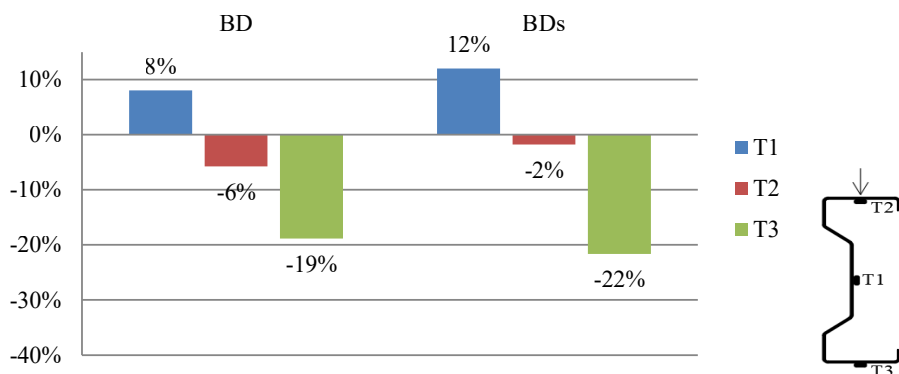
rozbieżne, co utrudnia wyciągnięcie jednoznacznych wniosków. Zastosowanie taśm stalowych w środniku pozwoliło ograniczyć odkształcenia półki górnej w punkcie umieszczenia tensometru T2 średnio o 6% w stosunku do belek referencyjnych.

4. Zastosowanie taśm w półce dolnej spowodowało ograniczenie odkształceń półki dolnej w miejscu tensometru T3 średnio o 21,5% względem belek referencyjnych. Umieszczenie taśm w półce górnej ograniczyło odkształcenia w punkcie umieszczenia tensometru T3 średnio o 5,5%, a umieszczenie taśm na środniku wpłynęło minimalnie na ograniczenie odkształceń mierzonych przez tensometr T3 w porównaniu z odczytami odkształceń belek referencyjnych.
5. Chcąc ograniczać przemieszczenia pionowe, należy umieszczać taśmę stalową w półce dolnej belki, czyli rozciąganej. W celu ograniczenia przemieszczenia poziomego, a co za tym idzie skrzywienia belki, należy wzmacniać przy użyciu taśmy stalowej półkę górną.
6. Umieszczenie taśmy stalowej w półce górnej przekroju pozwoliło ograniczyć przemieszczenie poziome środnika belki (w punkcie P1) średnio o 18%, a przemieszczenia poziome górnej części belki w punkcie P2 o 51%. Umieszczenie taśmy stalowej w półce dolnej nie powodowało zmniejszenia przemieszczeń poziomych w żadnym z analizowanych punktów, z kolei zastosowanie wzmocnienia w środniku spowodowało ograniczenie przemieszczeń poziomych w punkcie P1 i P2 tylko w przypadku belki B2Ss.
7. W celu ograniczenia przemieszczeń pionowych należy wzmacniać rozciąganą półkę dolną. W przeprowadzonych badaniach pozwoliło to na ograniczenie przemieszczenia pionowego środnika (punkt P1) średnio o 13%, części górnej przekroju w punkcie P2 o 14%, a w części dolnej (punkt P3) o 13%. Maksymalnie udało się osiągnąć ograniczenie pionowych przemieszczeń w punkcie P1 o 15% (B2Ds).
8. Przemieszczenia pionowe ogranicza każde umiejscowienie wzmocnienia w postaci taśm stalowych, przy czym zastosowanie wzmocnienia w środniku belki ogranicza przemieszczenia pionowe w najmniejszym stopniu.

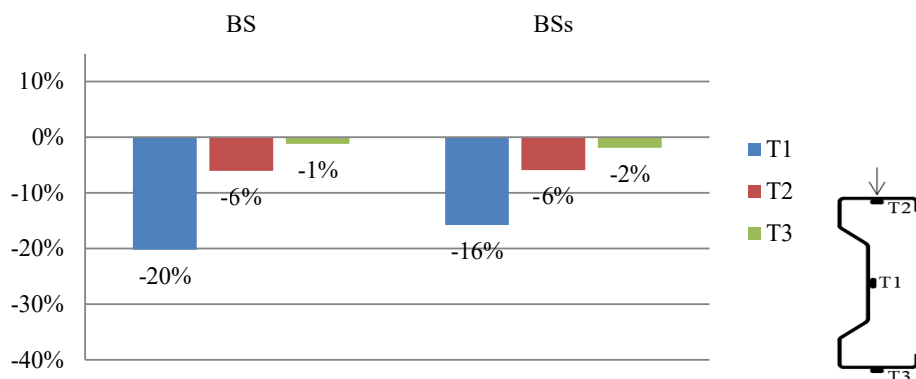
7.4. Porównanie wyników badań z pierwszego i drugiego etapu

7.4.1. Odształcenia

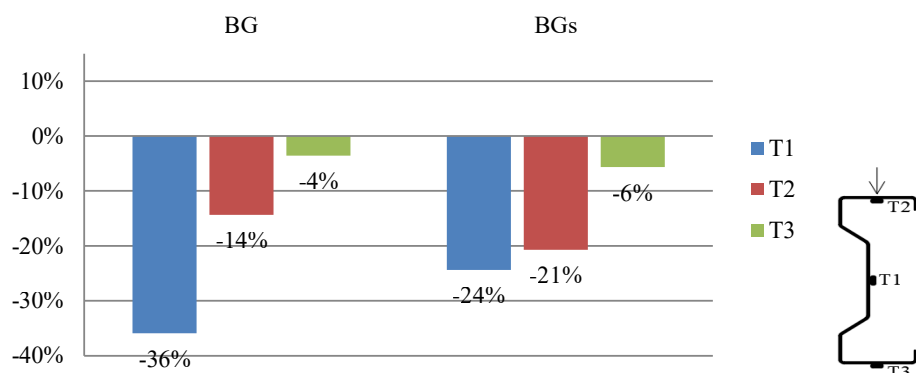
W celu porównania ze sobą wyników odkształceń belek wzmocnionych taśmami z włókien węglowych i taśmami stalowymi sporządzono wykresy (ryc. 7.39–7.41). Podane na wykresach oznaczenia BD, BS i BG to grupy belek wzmocnionych taśmą CFRP umieszczoną na półce dolnej, na środniku i na półce górnej. Analogicznie oznaczenia BDs, BSs i BGs to grupy belek wzmocnionych taśmą stalową umieszczoną na półce dolnej, na środniku i na półce górnej. Procentowe wartości przyrostu lub ograniczenia odkształceń podane na wykresach stanowią średnią arytmetyczną wyznaczoną z wyników uzyskanych przez belki należące do poszczególnej grupy. Przykładowo do grupy BD należały belki B1D, B2D i B3D. Na podstawie zależności 7.1 wyznaczono, że zastosowane wzmocnienie przyczyniało się do przyrostu odkształceń o odpowiednio 7%, 5% i 12% względem belek referencyjnych. Średnia arytmetyczna z tych wartości wynosi 8%.



Ryc. 7.39. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek wzmocnionych w pasie dolnym taśmami CFRP (BD) i taśmami stalowymi (BDs) względem belek referencyjnych przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.40. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek wzmocnionych w środku taśmami CFRP (BS) i taśmami stalowymi (BSs) względem belek referencyjnych przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.41. Procentowe ograniczenie odkształceń badanych belek wzmocnionych w pasie górnym taśmami CFRP (BG) i taśmami stalowymi (BGs) względem belek referencyjnych przy obciążeniu 25 kN

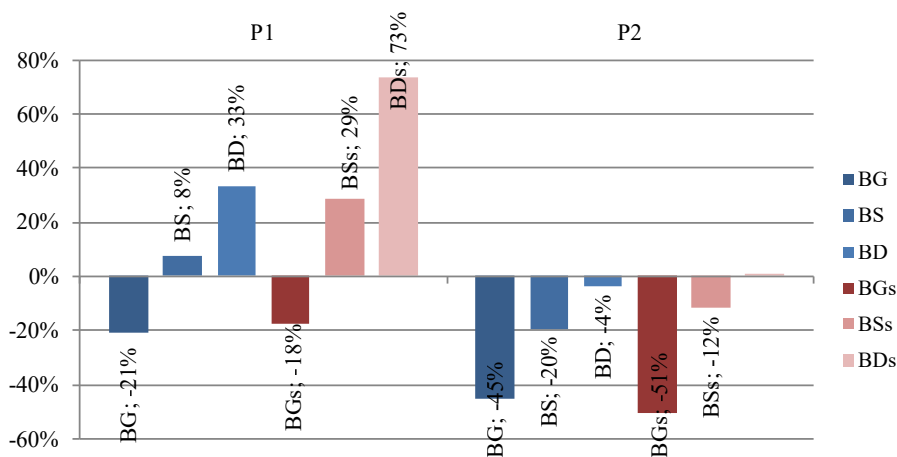
Na podstawie zaprezentowanych zestawień stwierdzono, że w celu ograniczenia odkształceń środka (w miejscu tensometru T1) korzystniejsze jest zastosowanie wzmocnienia z taśm CFRP. Chcąc ograniczyć odkształcenia w półce ściskanej (tensometr T2), dla większości przypadków również korzystniej będzie zastosować wzmocnienie taśmami kompozytowymi. W półce rozciąganej w miejscu umieszczenia tensometru T3 na podstawie danych zaprezentowanych na wykresach można stwierdzić, że bardziej efektywne jest wzmocnienie przy użyciu taśm stalowych. Warto jednak zwrócić uwagę, że w tym punkcie procentowe ograniczenie przemieszczeń uzyskane przez belki wzmocnione taśmą stalową i taśmą CFRP jest bardzo zbliżone. Ponadto wyniki odkształceń

poszczególnych belek wzmocnionych taśmą stalową cechował znaczny rozrzut, więc na podstawie tak ograniczonej liczby próbek nie należy wyciągać jednoznacznych wniosków.

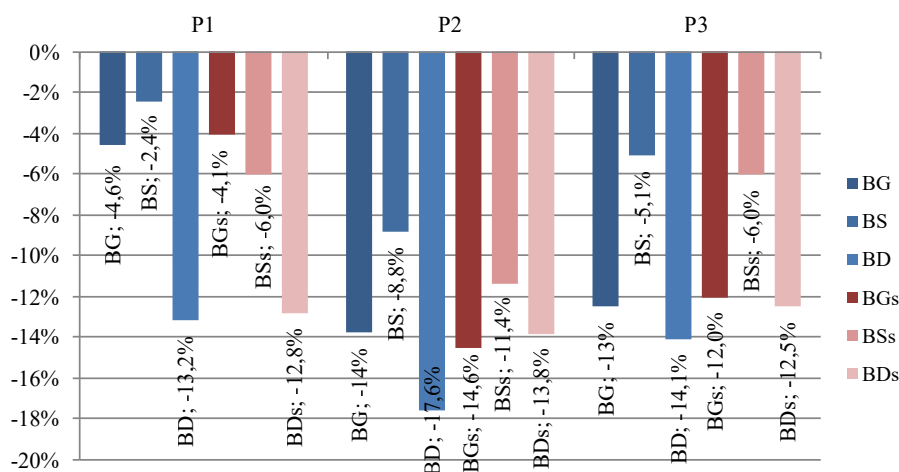
7.4.2. Przemieszczenia

Analogicznie do punktu 7.4.1 w celu porównania ze sobą wyników przemieszczeń belek wzmocnionych taśmami z włókien węglowych i taśmami stalowymi sporządzono wykresy (ryc. 7.42–7.43). Podane na wykresach wartości obliczono poprzez wyznaczenie średniej arytmetycznej z wartości wyznaczonej z zależności 7.2 dla wszystkich próbek wzmocnionych w ten sam sposób, a więc należących do jednej grupy.

Na podstawie uzyskanych wyników przemieszczeń belek wzmocnionych zarówno taśmą CFRP, jak i taśmą stalową stwierdzono, że w celu ograniczenia przemieszczeń pionowych należy umieszczać wzmocnienie w półce dolnej belek, czyli rozciąganej. Natomiast chcąc ograniczyć przemieszczenie poziome, należy wzmacniać przy użyciu taśm CFRP półkę górną (ściskaną).



Ryc. 7.42. Procentowe ograniczenie przemieszczeń poziomych, w kierunku prostym do osi podłużnej belki, badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1, P2 i P3 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.43. Procentowe ograniczenie przemieszczeń pionowych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1, P2 i P3 przy obciążeniu 25 kN

W przypadku zastosowania wzmocnienia w półce górnej ograniczono przemieszczenia poziome w punktach P1 i P2 względem belek referencyjnych o odpowiednio 21% i 45% w przypadku wzmocnienia taśmą CFRP oraz o 17,8% i 50,7% w przypadku zastosowania taśm stalowych (ryc. 7.42).

W przypadku zastosowania wzmocnienia w półce dolnej ograniczono przemieszczenia pionowe w punktach P1, P2 i P3 w stosunku do belek nieposiadających wzmocnienia o 13,2%, 17,6% i 14,1%, gdy wzmocnienie wykonano z taśm CFRP, oraz 12,8%, 13,8% i 12,5%, gdy do wzmocnienia użyto taśm stalowych.

Wykonanie wzmocnienia z taśm CFRP pozwoliło w większym stopniu ograniczyć przemieszczenia, co przemawia na korzyść tego typu wzmocnienia. W celu jednoznacznego sformułowania wniosków należałoby przeprowadzić badania na większej liczbie próbek.

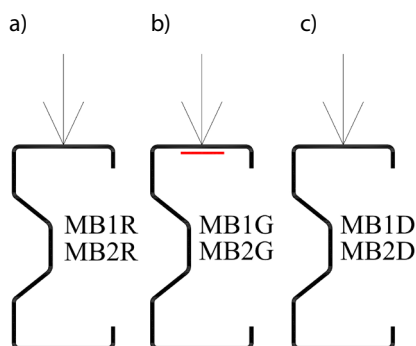
7.5. Trzeci etap badań

7.5.1. Zakres badań

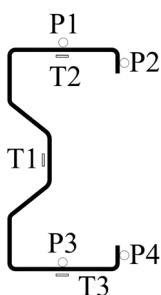
W trzecim etapie badania laboratoryjne przeprowadzono na sześciu cienkościennych belkach stalowych typu sigma o wysokości 140 mm, szerokości 70 mm i grubości ścianki 2,5 mm. Dokładną charaktery-

stykę geometryczną przekroju podano w tabeli 6.2 oraz na rycinie 6.2. Belki wykonano ze stali S350 GD i wyprodukowano w firmie Blachy Pruszyński. Jako wzmocnienie użyto taśm z włókna węglowego Sika CarboDur S, które przyklejono do belek za pomocą odpowiednio przygotowanego kleju SikaDur®-30. Grubość warstwy kleju wynosiła 1,3 mm, natomiast długość taśmy CFRP 207,5 cm (długość zakotwienia w odniesieniu do ryciny 2.1 wynosiła 32,7 cm). Belki przygotowano zgodnie z opisem zamieszczonym w punkcie 7.1.2 i umieszczono w stanowisku badawczym zaprezentowanym w punkcie 7.1.1.

Obciążeniu poddano dwie belki referencyjne bez wzmocnienia (MB1R i MB2R). Następnie badaniu poddano dwie belki wzmocnione taśmą CFRP umieszczoną na wewnętrznej stronie półki górnej-ściskanej (MB1G, MB2G) oraz dwie belki ze wzmocnieniem usytuowanym na zewnętrznej stronie półki dolnej-rozciąganej (MB1D, MB2D). Schemat rozmieszczenia taśm z włókien węglowych wraz z oznaczeniem próbek przedstawiono na rycinie 7.44.



Ryc. 7.44. Rozmieszczenie taśm CFRP i oznaczenie próbek: a) belki typu MB bez wzmocnienia, b) belki typu MB wzmocnione górną – (G), c) belki typu MB wzmocnione dołem – (D)

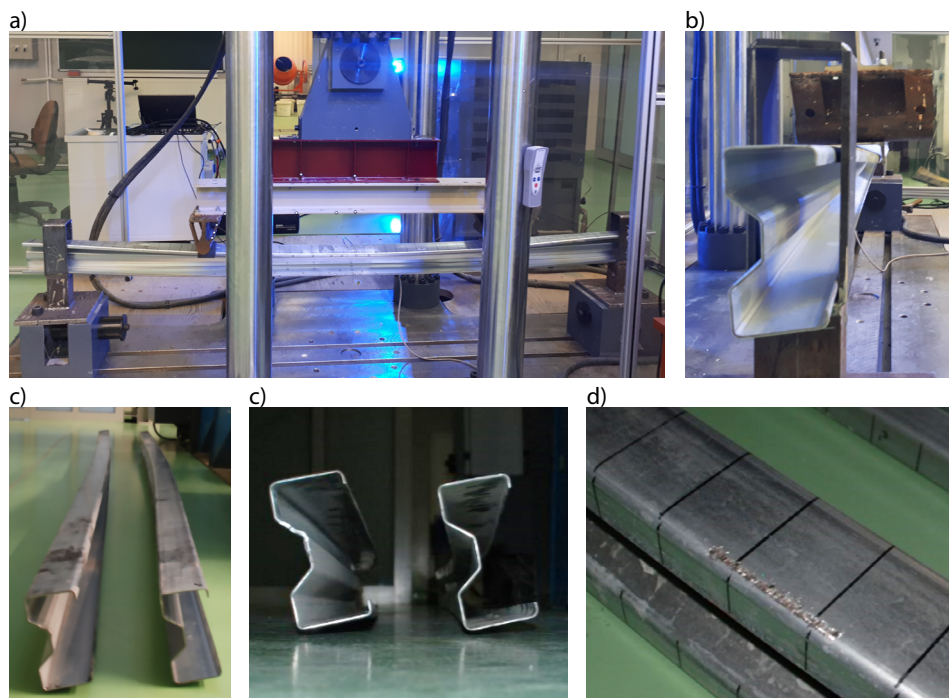


Ryc. 7.45. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w środku rozpiętości belki – tensometry elektrooporowe (T1, T2, T3) i punkty pomiaru przemieszczeń (P1, P2, P3, P4)

Odształcenia belki mierzono za pomocą trzech tensometrów elektrooporowych, usytuowanych w środku jej rozpiętości w miejscach wskazanych na rycinie 7.45 oraz przemieszczenia w punktach P1–P4 z wykorzystaniem programu Aramis i Tritop.

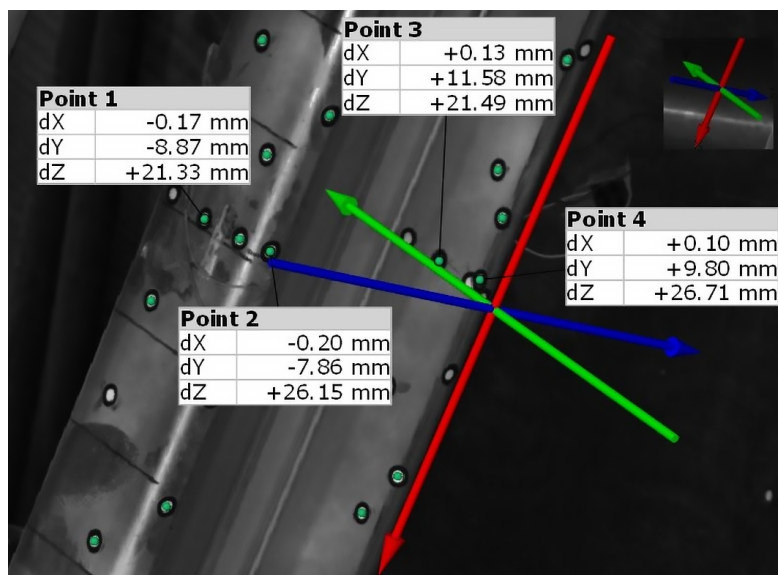
7.5.2. Postacie zniszczenia próbek

W trzecim etapie badań wszystkie belki doznawały równocześnie ugięcia i znacznego skręcenia. Sposób pracy belki oraz jej formy deformacji pojawiające się przy obciążeniu wynoszącym 25 kN przedstawiono na rycinie 7.46. Przykładowe przemieszczenia punktów pomiarowych wybranej próbki w środku jej rozpiętości uzyskane przy obciążeniu 25 kN przedstawiono na rycinie 7.47.



Ryc. 7.46. Obraz zniszczenia belek z trzeciego etapu badań:

a, b) praca belek podczas obciążenia, c, d) zdjęcie zniszczonych belek po badaniu, e) uszkodzenie lokalne belek po badaniu – zadrapanie w miejscu przyłożenia obciążenia



Ryc. 7.47. Przeszacowania poszczególnych punktów przekroju w środku rozpiętości jednej z badanych belek przy obciążeniu 25 kN

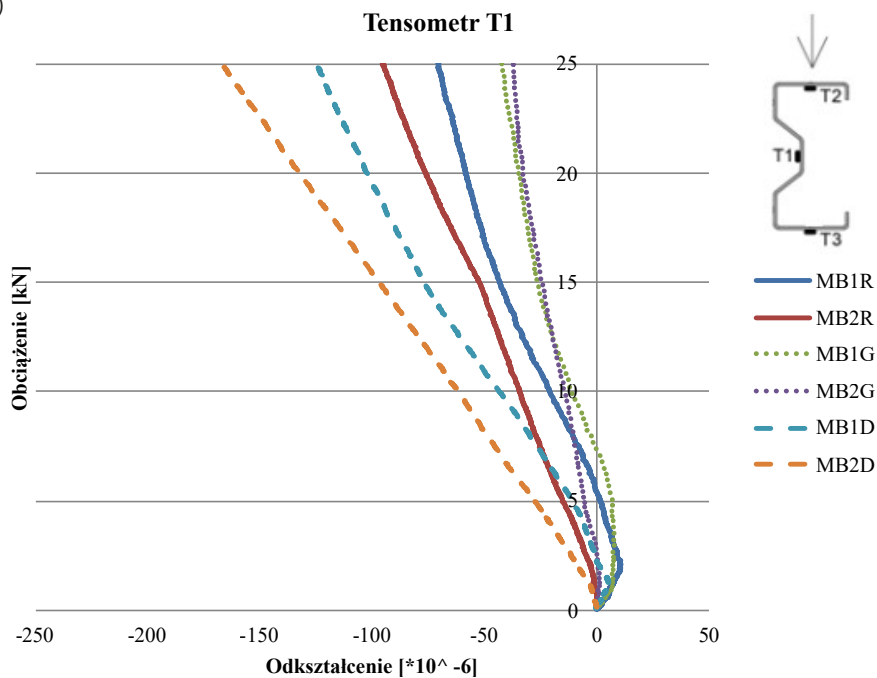
W czasie badań zaobserwowano odspojenie taśmy CFRP na granicy stal-klej tylko w jednej belce MB1G. Odspojenie wystąpiło tylko z jednej strony taśmy na około 10% jej długości i pojawiło się przy obciążeniu przekraczającym 30 kN.

7.5.3. Analiza odkształceń

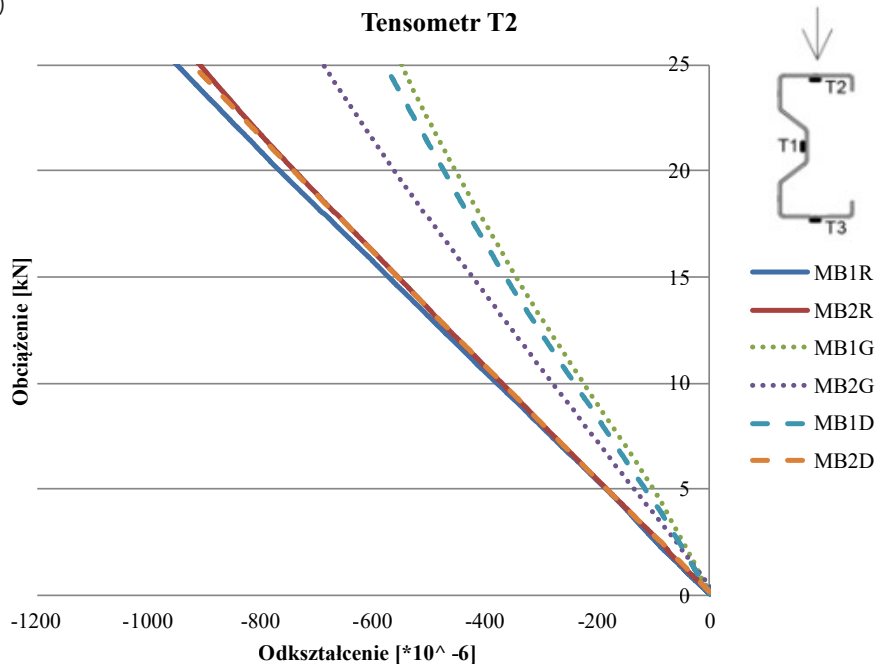
W trzecim etapie badań laboratoryjnych mierzono odkształcenia stalowych belek cienkościennych przy użyciu trzech tensometrów elektrooporowych umieszczonych w środku rozpiętości belki. Rozmieszczenie poszczególnych tensometrów w przekroju przedstawiono na rysunku 7.48. Tensometry naklejono równolegle do podłużnej osi belki.

Wykres zależności obciążenie-odkształcenie uzyskanej na podstawie odczytów z trzech tensometrów elektrooporowych (T1, T2 i T3) dla różnych lokalizacji wzmocnienia taśmami CFRP przedstawiono odpowiednio na rycinach 7.48 i 7.49.

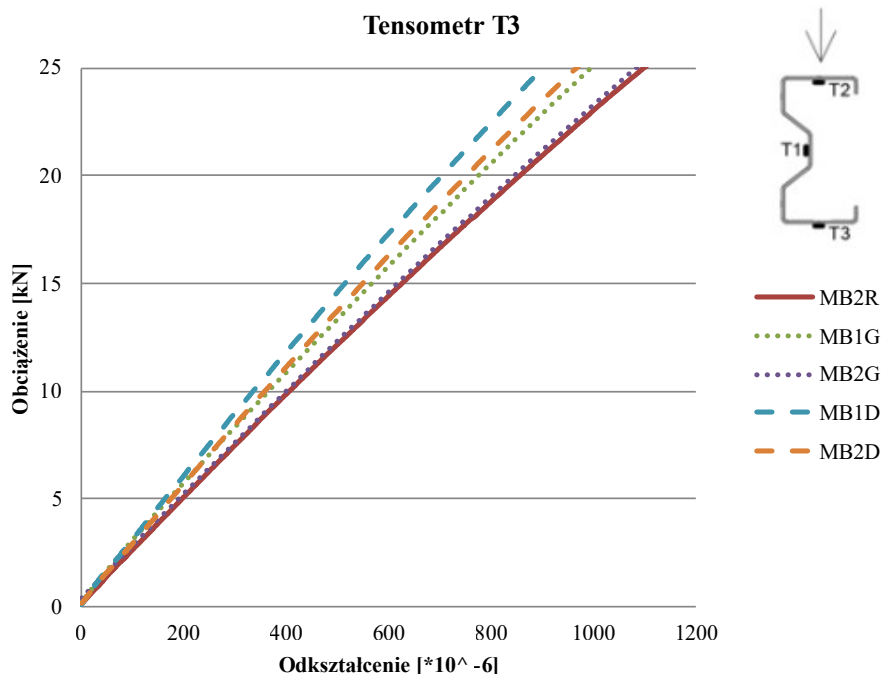
a)



b)



Ryc. 7.48. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometrów elektrooporowych:
a) T1, b) T2



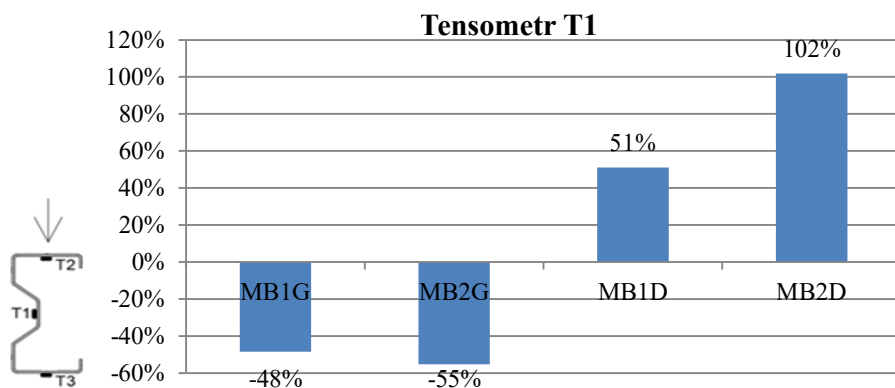
Ryc. 7.49. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru elektrooporowego T3

W celu precyzyjniejszego przedstawienia uzyskanych wyników sporządzono tabelę 7.6, w której podano wartości odkształceń odczytanych z tensometrów przy poziomie obciążenia równym 25 kN. Po przekroczeniu tego obciążenia część tensometrów uległa uszkodzeniu.

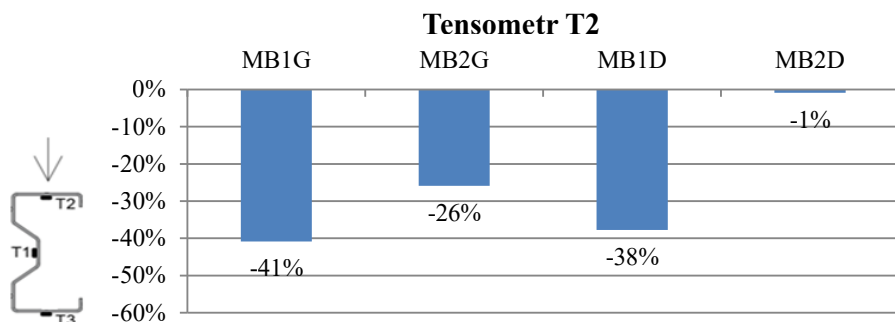
Tab. 7.6. Odkształcenie poszczególnych próbek przy obciążeniu 25 kN

	Odkształcenie [$\cdot 10^{-6}$]		
	Tensometr T1	Tensometr T2	Tensometr T3
MB1R	-70,3	-949,8	
MB2R	-95,1	-909,0	1097,7
MB1G	-42,7	-549,4	994,8
MB2G	-37,0	-688,8	1082,5
MB1D	-124,9	-578,8	900,2
MB2D	-166,9	-921,1	966,1

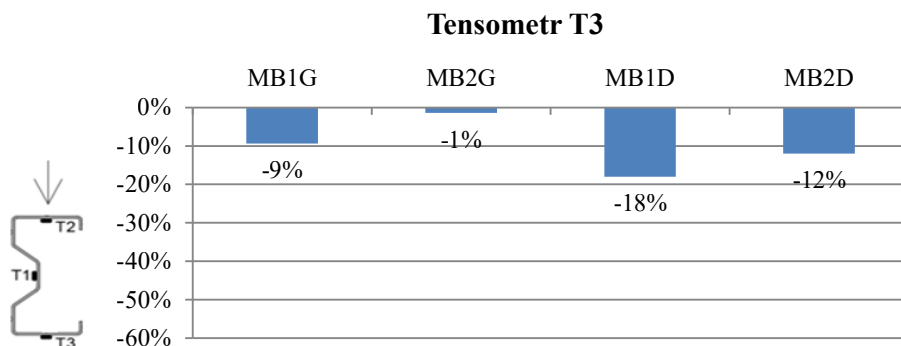
Następnie wykonano wykresy słupkowe (ryc. 7.50–7.52) przedstawiające wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach, na ograniczenie ich odkształceń. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności (7.1).



Ryc. 7.50. Wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich odkształceń w miejscu tensometru T1 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.51. Wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich odkształceń w miejscu tensometru T2 przy obciążeniu 25 kN



Ryc. 7.52. Wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich odkształceń w miejscu tensometru T3 przy obciążeniu 25 kN

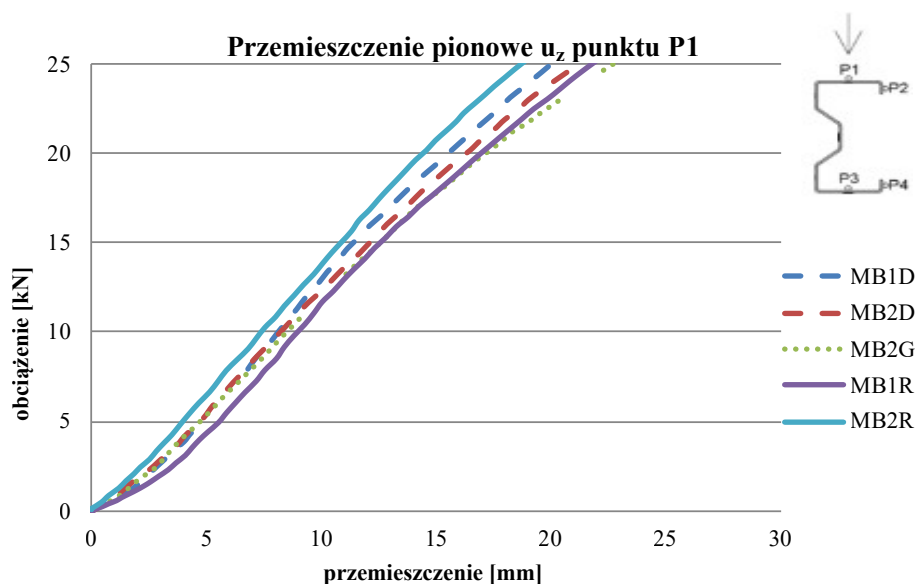
7.5.4. Analiza przemieszczeń

Podczas prowadzenia badań laboratoryjnych etapu trzeciego przemieszczenia mierzono za pomocą dwóch sprzężonych ze sobą soczewek systemu Aramis, tak samo jak w przypadku dwóch pierwszych etapów badań. Przemieszczenia analizowano w czterech naklejonych na belki punktach w środku ich rozpiętości. Lokalizację punktów pomiarowych na przekroju poprzecznym belki przedstawiono na rycinach 7.53–7.55 i 7.57–7.58.

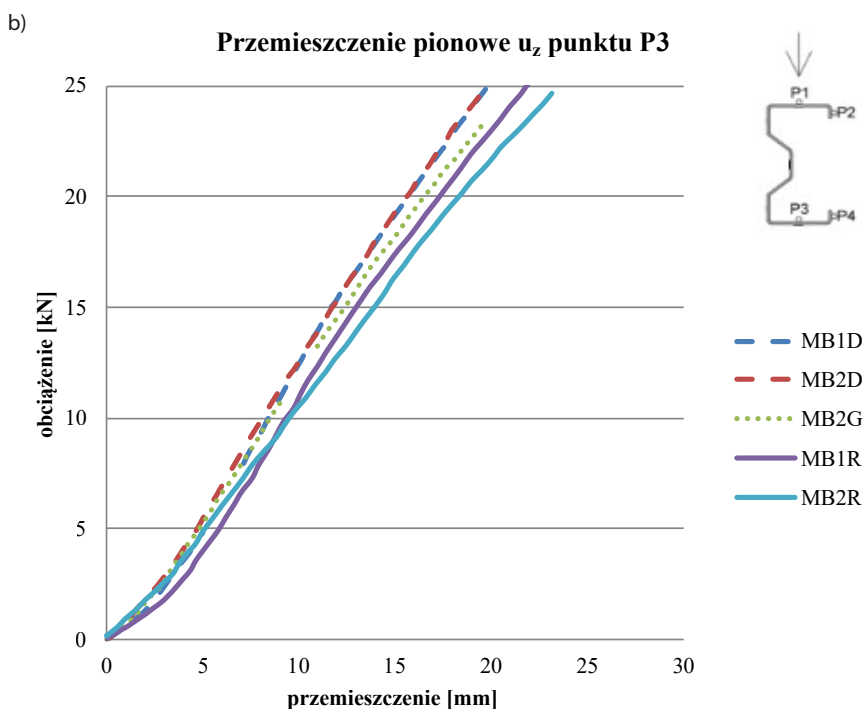
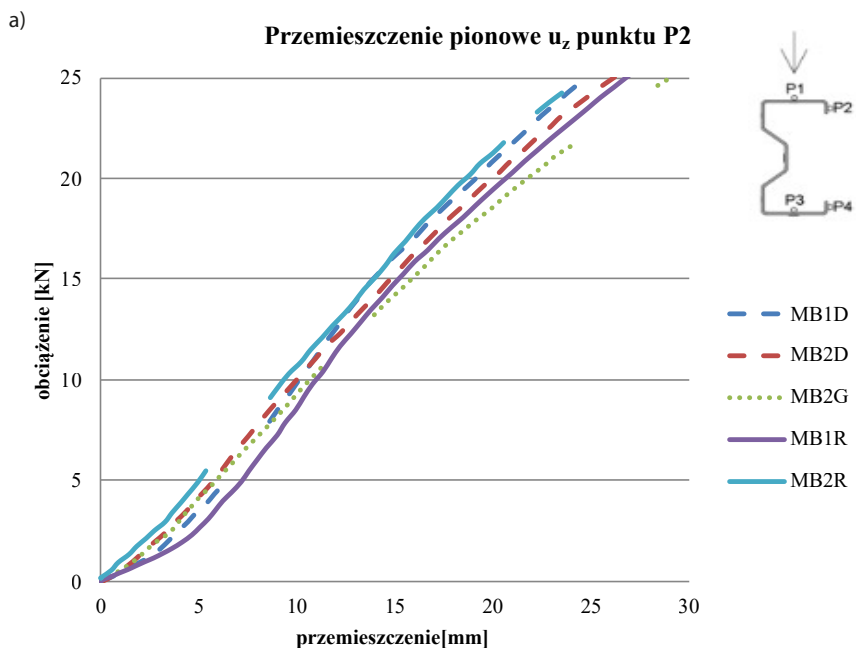
Brak kompletu wyników dla niektórych belek wynika z zacięcia punktu pomiarowego, a tym samym braku możliwości wykonania odczytu w programie GOM Correlate.

7.5.4.1. Przemieszczenia w kierunku pionowym

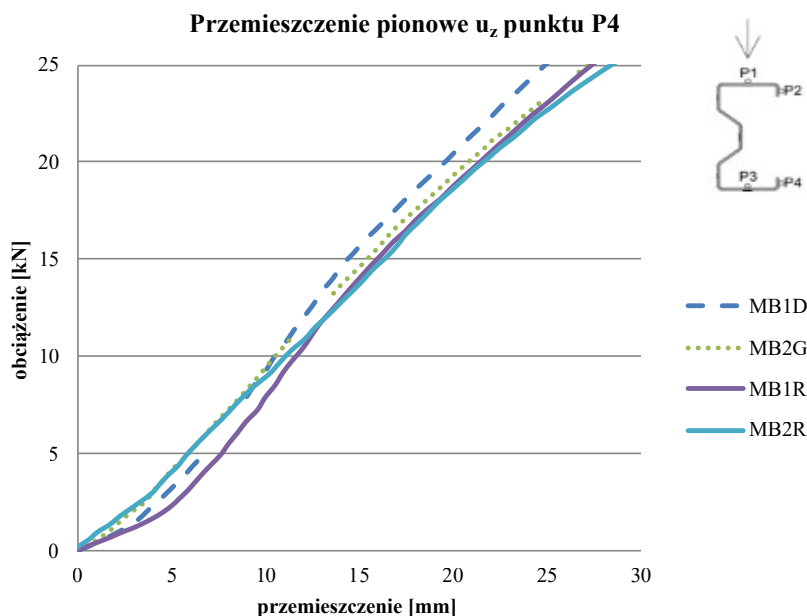
Zależność przemieszczenia w kierunku pionowym (u_z) od obciążenia badanych belek przedstawiono na wykresach (ryc. 7.53–7.55).



Ryc. 7.53. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punkcie P1 w kierunku pionowym

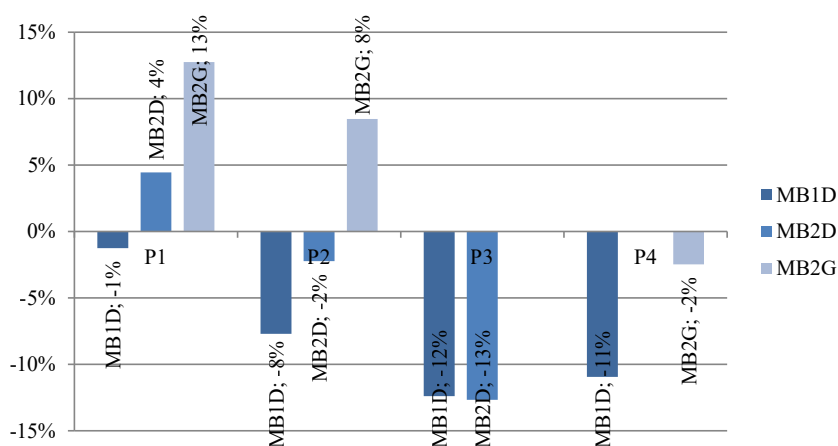


Ryc. 7.54. Zależność obciążenie–przemieszczenie mierzona w punktach:
a) P2, b) P3 w kierunku pionowym



Ryc. 7.55. Zależność obciążenie–przesunięcie mierzona w punkcie P4 w kierunku pionowym

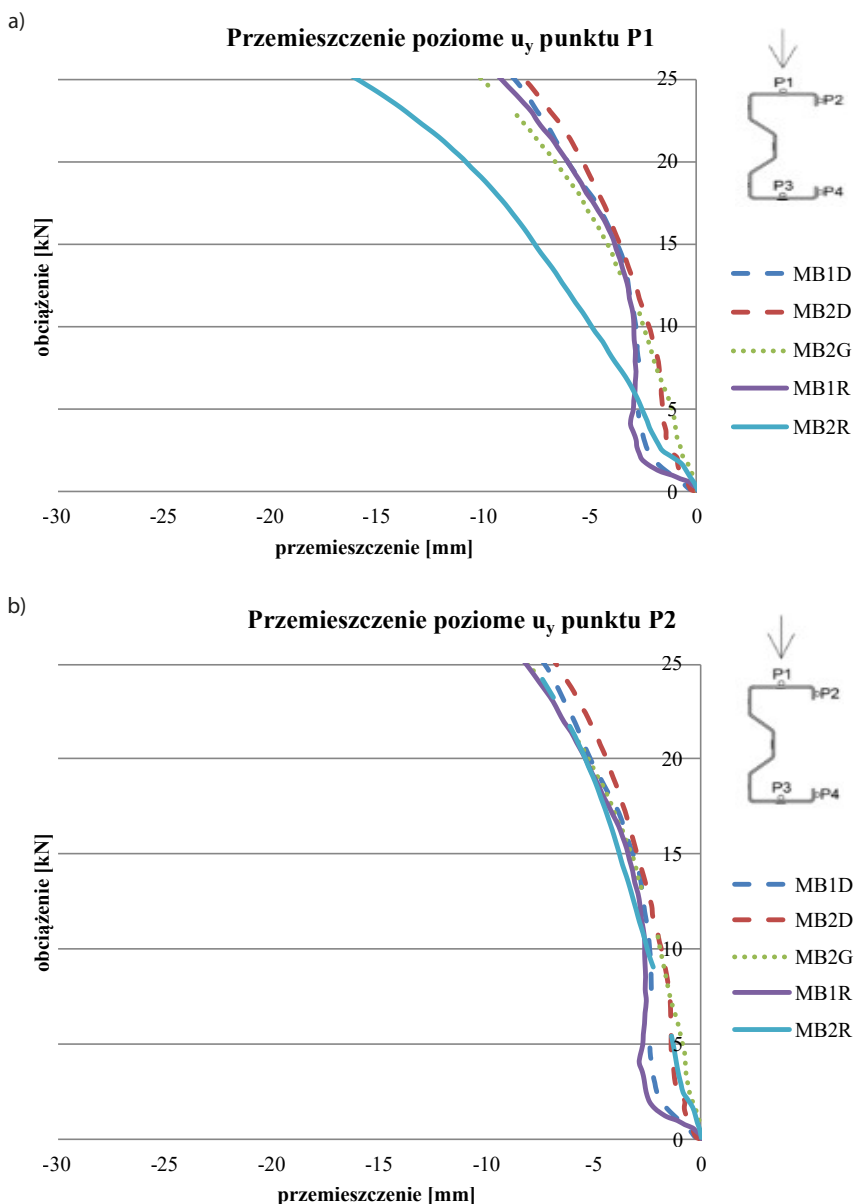
W celu ułatwienia sformułowania wniosków wykonano wykres słupkowy (ryc. 7.56) przedstawiający wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich przemieszczeń odczytanych na poziomie obciążenia 25 kN. Na wykresie przedstawiono wartości dla punktów P1, P2 i P3. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności 7.2.



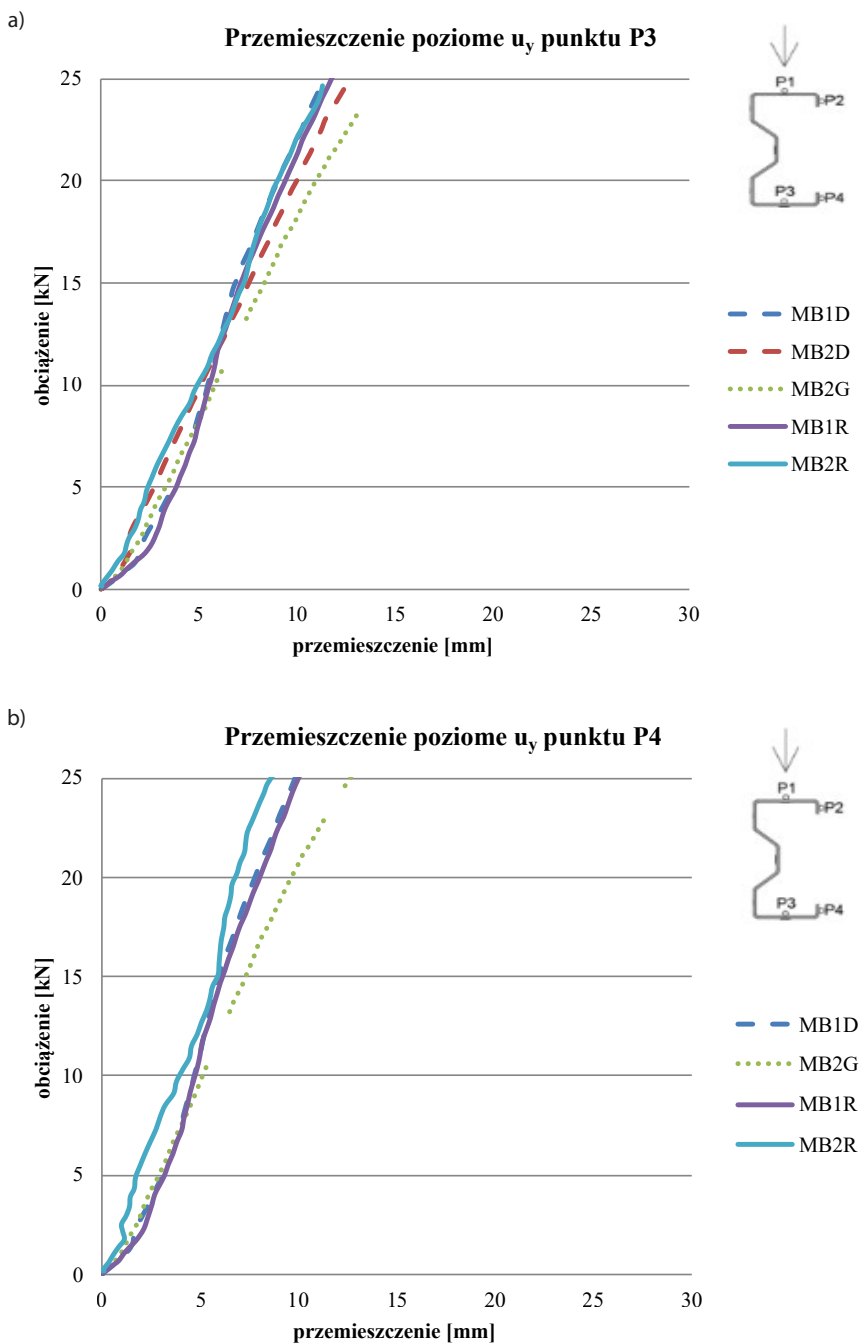
Ryc. 7.56. Procentowe ograniczenie przemieszczeń pionowych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1, P2 i P3 przy obciążeniu 25 kN

7.5.4.2. Przeszaczenia w kierunku poziomym

Zależność przeszaczenia w kierunku poziomym (u_y), prostopadłym do osi podłużnej belki, od obciążenia badanych belek przedstawiono na wykresach (ryc. 7.57–7.58).

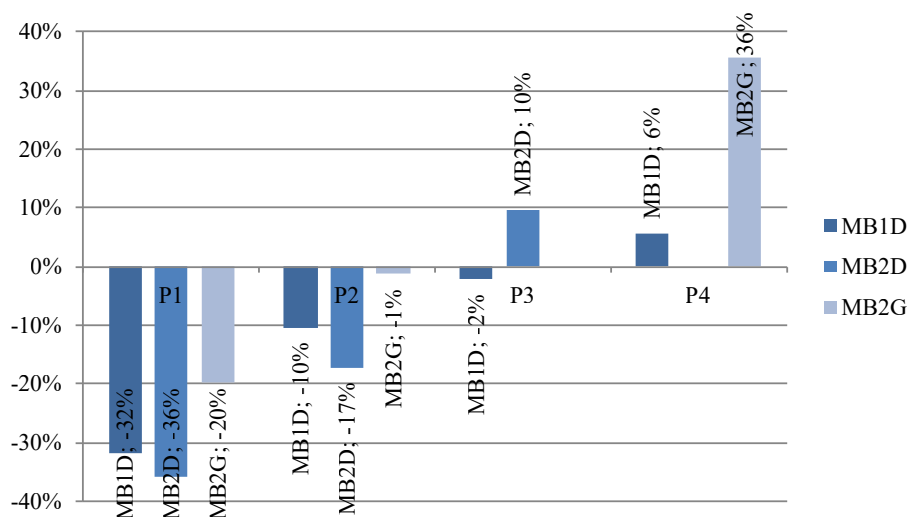


Ryc. 7.57. Zależność obciążenie–przeszaczenie mierzona w punktach:
a) P1, b) P2, w kierunku poziomym prostopadłym do osi podłużnej belki



Ryc. 7.58. Zależność obciążenie–przeszczenie mierzona w punktach:
a) P3, b) P4 w kierunku poziomym, prostopadłym do osi podłużnej belki

Analogicznie jak to uczyniono w przypadku wyników prezentowanych w punkcie 7.5.4.1, wykonano wykres słupkowy (ryc. 7.59) przedstawiający wpływ zastosowania wzmocnienia w poszczególnych belkach na ograniczenie ich przemieszczeń dla obciążenia 25 kN. Na wykresie przedstawiono wartości dla punktów P1, P2, P3 i P4. Podane wartości wyznaczono na podstawie zależności 7.2.



Ryc. 7.59. Procentowe ograniczenie przemieszczeń poziomych badanych belek względem belek referencyjnych w punktach P1, P2 i P3 przy obciążeniu 25 kN

7.5.5. Wnioski z trzeciego etapu badań

Na podstawie analiz przedstawionych w punktach 7.5.3 i 7.5.4 sformułowano wnioski:

1. Sposób deformacji badanych belek był taki sam jak dla belek w badaniu pilotażowym (pomimo innego sposobu przyłożenia obciążenia), tj. ulegały one zginaniu i skręcaniu, a przemieszczenia pionowe i poziome w środku ich rozpiętości były dwukrotnie większe od przemieszczeń belek o wysokości 200 mm. Za siłę niszczącą ponownie uznano obciążenie 25 kN, ponieważ po przekroczeniu tego obciążenia część tensometrów uległa zniszczeniu, a w przypadku pomiaru przemieszczeń po przekroczeniu obciążenia 25 kN belki ulegały tak dużemu skręceniu, że część punktów stawała się niewidoczna dla systemu Aramis.

2. W przeprowadzonych badaniach zastosowanie taśm CFRP na górnej półce spowodowało zmniejszenie odkształceń środka, w miejscu tensometru T1, średnio o 51,5% w stosunku do średniej wartości odkształceń belek referencyjnych. Zastosowanie taśm na półce dolnej spowodowało znaczące zwiększenie odkształceń względem belek nieposiadających wzmocnienia.
3. W przypadku zastosowania taśm CFRP na górnej półce nastąpiło zmniejszenie odkształceń półki górnej w miejscu tensometru T2 średnio o 33,5% względem średniej wartości odkształceń belek nieposiadających wzmocnienia. Zastosowanie taśm na półce dolnej również spowodowało zmniejszenie odkształceń względem belek nieposiadających wzmocnienia, ale uzyskane wyniki dla belek MB1D i MB2D są bardzo rozbieżne, co utrudnia wyciągnięcie jednoznacznych wniosków.
4. Zastosowanie taśm na półce górnej ograniczyło odkształcenia w miejscu tensometru T3 (na półce dolnej) średnio o 5% względem belki referencyjnej, natomiast zastosowanie taśm na półce dolnej średnio o 15%.
5. W celu ograniczenia przemieszczenia w punkcie P1 należy wzmocnić półkę dolną (rozciągana). Pozwoliło to na ograniczenie przemieszczeń poziomych, prostopadłych do osi podłużnej belki, średnio o 34%. Wzmocnienie pasa górnego ograniczyło to przemieszczenie o 20%.
6. W punkcie P2 zastosowanie wzmocnienia na półce dolnej pozwoliło ograniczyć przemieszczenia poziome, prostopadłe do osi podłużnej belki, względem belek nieposiadających wzmocnienia średnio o 13,5%, a przemieszczenia pionowe o 5%. Zastosowanie taśm CFRP na półce górnej ograniczyło przemieszczenia poziome jedynie o 1% i spowodowało wzrost przemieszczeń pionowych w tym punkcie.
7. Analizując przemieszczenia w punkcie P3, stwierdzono, że w skrajnym przypadku (belka MB1D) zastosowanie wzmocnienia na półce dolnej spowodowało ograniczenie przemieszczeń pionowych o 3,8%. Analizując wartości średnie, nie wykazano efektywnego wpływu zastosowania wzmocnienia na ograniczenie przemieszczeń poziomych. W przypadku przemieszczeń pionowych punktu P3 zastosowanie taśm CFRP na półce dolnej ograniczyło przemieszczenia średnio o 12,5%.
8. W przypadku pomiarów wykonywanych w punkcie P4 nie wykazano wpływu zastosowania wzmocnień z taśm CFRP na ograniczenie

przemieszczeń poziomych, prostopadłych do osi podłużnej belki. Przemieszczenia pionowe ograniczono poprzez wzmocnienie pasa dolnego o 11%, a pasa górnego o 2%.

Po przeanalizowaniu wykresów zamieszczonych na rycinach 7.53–7.55 i 7.57–7.58 stwierdzono, że w każdym przypadku najwyższą wartość obciążenia przyłożonego uzyskiwano dla belki wzmocnionej taśmą CFRP na półce dolnej, tj. rozciąganej.

Analiza numeryczna

8.1. Wstęp

Analizy numeryczne przeprowadzono dla modeli odpowiadających laboratoryjnym badaniom pilotażowym oraz trzem etapom badań właściwych (ryc. 5.3). W celu uzyskania najlepszej zgodności wyników badań laboratoryjnych i numerycznych opracowano szereg modeli, które poddano walidacji i weryfikacji z uwzględnieniem różnych rodzajów elementów skończonych, rozmiarów siatki MES oraz warunków brzegowych. Dla wszystkich modeli przeprowadzono nieliniową analizę numeryczną z zastosowaniem iteracyjnej metody Newtona-Raphsona, stanowiącą algorytm iteracyjny prowadzący do wyznaczenia przybliżonej wartości miejsca zerowego funkcji jednej zmiennej lub wielu zmiennych. Rozwiązanie jest określane w wyniku wykorzystania analizy przyrostowej – gdzie obciążenie jest przykładane stopniowo, w kolejnych przyrostach, w przypadku których prowadzone są obliczenia dla pewnego poziomu (porcji) obciążenia aż do osiągnięcia całej zadanej wartości. Wadą niniejszej metody jest to, iż często musi wystąpić bardzo duża liczba iteracji w danym przyroście kroku obliczeniowego, natomiast zaletę stanowi dość szybkie uzyskiwanie zbieżności. Niniejsza metoda jest podstawową metodą obliczeń w programie Abaqus, a w pracy postanowiono zachować jednolity schemat obliczeń niezależnie od rodzaju modelu numerycznego. Ponadto dla wybranych modeli numerycznych przeprowadzono analizę wpływu długości zakotwienia taśm CFRP.

8.2. Pilotażowe analizy numeryczne

8.2.1. Opis modelu numerycznego

Analizy numeryczne przeprowadzono, przyjmując warunki identyczne jak dla belek badanych w laboratorium. W związku z tym obciążenie zdefiniowano w taki sposób, aby odzwierciedlić jego przekazywanie za pomocą siedmiu stalowych lin wzdłuż długości belki. W przypadku modelowania stalowej belki przy przyjęciu sprężysto-plastycznego modelu materiału ze wzmocnieniem do programu wprowadzono wartość granicy plastyczności stali, wytrzymałości stali na rozciąganie, modułu Younga i współczynnika Poissona zgodną z wynikami badań laboratoryjnych (tab. 6.1). Natomiast wydłużalność stali przy zerwaniu została przyjęta na podstawie powszechnie dostępnych danych w literaturze dla stali o parametrach najbardziej zbliżonych z otrzymanymi podczas badań laboratoryjnych. Taśmy CFRP opisano, stosując ortotropowy model materiału typu Lamina, uwzględniając charakterystyki wytrzymałościowe, takie jak moduł Younga w kierunku wzdłużnym i poprzecznym, współczynnik Poissona i moduł Kirchhoffa uzyskane na podstawie własnych badań laboratoryjnych i danych producenta (patrz pkt 6.1.2).

Połączenie między taśmami CFRP a odpowiednią płaszczyzną (dolną lub górną półką) belki zostało wykonane przy użyciu numerycznego połączenia typu TIE.

Poszukując odwzorowania rzeczywistej pracy konstrukcji, sporządzono modele różniące się między sobą sposobem zamodelowania warunków brzegowych, gęstością siatki i typem elementu skończonego. Każdy z modeli MES przygotowano z uwzględnieniem kontaktu w kierunku stycznym i normalnym, pomiędzy belką i podporami. Podsumowanie analizowanych modeli numerycznych przedstawiono w tabeli 8.1.

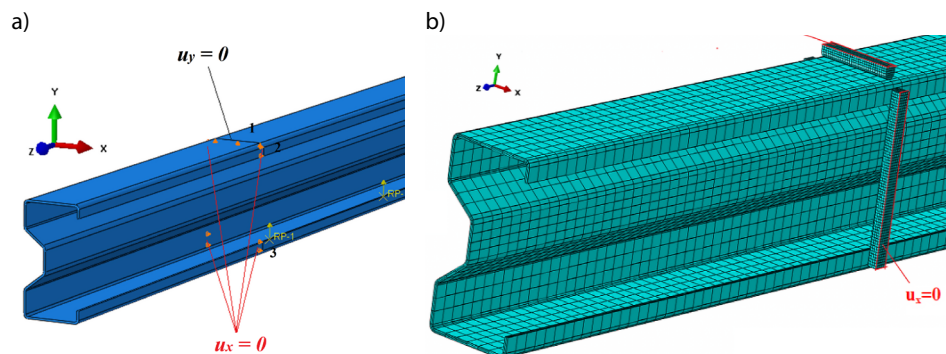
Tab. 8.1. Zestawienie wykonanych modeli numerycznych

Nr	Nazwa modelu numerycznego	Rodzaj modelu podparcia	Typ elementu	Liczba elementów/ węzłów
1.	Abaqus solid BP2p	Nieodkształcalne elementy powłokowe R3D4	SOLID C3D8R	45000/61404
2.	Abaqus solid BP2k	Kinematyczne warunki brzegowe	SOLID C3D8R	45000/61404

Tab. 8.1. Zestawienie wykonanych modeli numerycznych

Nr	Nazwa modelu numerycznego	Rodzaj modelu podparcia	Typ elementu	Liczba elementów/ węzłów
3.	Abaqus shell BP2l.p	Nieodkształcalne elementy powłokowe R3D4	SHELL S4R	46200/46878
4.	Abaqus shell BP2l.k	Kinematyczne warunki brzegowe	SHELL S4R	46200/46878
5.	Abaqus shell BP2k.p	Nieodkształcalne elementy powłokowe R3D4	SHELL S8R	46200/139955
6.	Abaqus shell BP2k.k	Kinematyczne warunki brzegowe	SHELL S8R	46200/139955

W modelach numerycznych podpory modelowano na dwa sposoby, z których każdy odzwierciedlał tzw. podparcie widełkowe. W pierwszej metodzie podpory modelowano przy użyciu kinematycznych warunków brzegowych nałożonych na stopnie swobody w punktach nr 1–5 znajdujących się na konturze belki w płaszczyźnie utworzonej przez partycję elementu. W punktach nr 1, 2, 3 i 4 ograniczono przemieszczenia w kierunku poziomym ($\mathbf{u}_x = \mathbf{0}$), a w punkcie nr 5 w kierunku pionowym ($\mathbf{u}_y = \mathbf{0}$). We wszystkich tych punktach obrót był nieograniczony (ryc. 8.1a). W drugiej metodzie podpory modelowano przy użyciu nieodkształcalnych elementów powłokowych typu R3D4 (ryc. 8.1b).



Ryc. 8.1. Modele numeryczne podpór:
a) warunki brzegowe, b) nieodkształcalny element powłokowy R3D4

Cienkościenne belki stalowe typu sigma modelowano przy użyciu trzech różnych rodzajów elementu skończonego. Jako pierwszy użyto element bryłowy z liniową funkcją kształtu typu C3D8R z trzema translacyjnymi stopniami swobody w każdym z ośmiu węzłów elementu

skończonego. Zastosowanie tego modelu może być dyskusyjne, gdyż jest kłopotliwy przy dyskretyzacji cienkościennych elementów, jednak dla celów analizy porównawczej zdecydowano się niniejszy model uwzględnić. Model ten powinien posiadać minimum trzy elementy na grubości konstrukcji, aby w pełni poprawnie odzwierciedlić efekt zginania konstrukcji i takie symulacje zostały przeprowadzone na etapie wstępnych analiz, jednakże zauważono niewielką rozbieżność wyników pomiędzy modelem podstawowym (gdzie zastosowano pojedynczy element skończony na grubości). W większości analiz powinno się dbać o to, by przy typowych zjawiskach statycznych przy bryłowych elementach skończonych o funkcji kształtu pierwszego rzędu była zapewniona odpowiednia (minimum trzy) liczba elementów na grubości – tworząc w ten sposób tzw. warstwę obojętną. W przypadku realizowanych badań utworzenie takiej warstwy obojętnej z zastosowaniem liczby elementów większej niż jeden nie miało większego wpływu.

Jako kolejny wykorzystano element powłokowy z liniową funkcją kształtu typu S4R (czterowęzłowy ze zredukowanym punktem całkowania) i na koniec element powłokowy typu S8R z kwadratową funkcją kształtu.

Analiza wpływu rozmiaru siatki została przeprowadzona tylko dla modelu numerycznego numer 4 (Abaqus shell BP2l.k) zmieniającego rozmiar elementu skończonego z 5 mm na 7,5 mm. Model o wielkości elementu skończonego 7,5 mm składał się z 24400 elementów i 24862 węzłów i był oznaczony akronimem Abaqus shell BP2l.k.g. Kolejny etap analizy polegał na usunięciu zagęszczenia siatki w zaokrąglonych narożach profilu, co powodowało utworzenie przekroju o ostrych krawędziach. Model ten składał się z 21 200 elementów, 21 665 węzłów i był oznaczony akronimami Abaqus shell BP2l.k.k.

W celu odzwierciedlenia badań laboratoryjnych, w których belki wzmocniono taśmami CFRP modele numeryczne nr 1 i nr 4 zostały rozszerzone o modelowanie taśmy CFRP. We wszystkich modelach numerycznych taśmy CFRP modelowano jako skończone elementy powłokowe typu S8R, posiadające sześć stopni swobody, w każdym z ośmiu węzłów elementu skończonego. Liczba elementów skończonych wynosiła 1040, a liczba węzłów obliczeniowych 1254. Połączenie między taśmą CFRP a odpowiednią powierzchnią półki belki modelowano za pomocą numerycznego łącznika typu TIE.

8.2.2. Zastosowane analizy numeryczne

Ścieżki równowagi uzyskano na podstawie nieliniowych analiz numerycznych, rozwiązując równanie równowagi, które można zapisać w następującej postaci przyrostowej:

$$(\mathbf{K}^O + \mathbf{K}^G + \mathbf{K}^U) \Delta \mathbf{U} = \Delta \mathbf{P} \quad (8.1)$$

gdzie:

- $\mathbf{K}^O$ – jest macierzą sztywności liniowej,
- $\mathbf{K}^G$ – jest początkową macierzą geometryczną,
- $\mathbf{K}^U$ – jest macierzą sztywności przemieszczeniowej,
- $\Delta \mathbf{U}$ – jest macierzą sztywności przemieszczeniowej,
- $\Delta \mathbf{P}$ – jest przyrostem wektora obciążenia zewnętrznego.

Do rozwiązywania równania używana jest iteracyjna metoda Newtona-Raphsona. (8.1), zarówno dla statecznych, jak i niestatecznych ścieżek równowagi.

Wektory własne $\mathbf{U}$ zostały obliczone przez rozwiązanie problemu liniowej wartości własnej:

$$(\mathbf{K}^O + \lambda \mathbf{K}^G) \mathbf{U} = \mathbf{O} \quad (8.2)$$

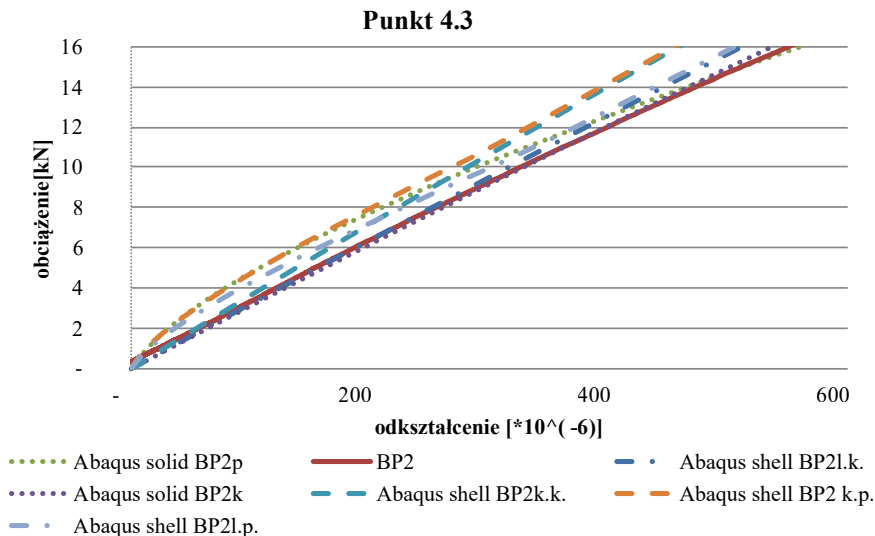
gdzie:

- λ – mnożnik obciążenia,
- $\mathbf{U}$ – reprezentuje kształt postaci wyboczenia.

8.2.3. Wpływ warunków brzegowych i rodzaju elementu skończonego

Wpływ warunków brzegowych i rodzaju elementu skończonego analizowano poprzez porównanie odkształcenia zmierzonego podczas badań laboratoryjnych za pomocą tensometru elektrooporowego 4.3 (patrz ryc. 6.5), umieszczonego na środku rozpiętości belki, w środku szerokości półki rozciąganej, z wynikami uzyskanymi z analizy MES

w punkcie odpowiadającym położeniu tensometru 4.3. Na rycinie 8.2 przedstawiono zależność obciążenie–odkształcenie dla niewzmocnionej belki. Wykres BP2 odnosi się do niewzmocnionej belki referencyjnej testowanej w laboratorium, a pozostałe wykresy ilustrują odpowiedź tej samej belki dla różnych modeli numerycznych (patrz tab. 8.1).



Ryc. 8.2. Zależność obciążenie–odkształcenie dla belki niewzmocnionej badanej w laboratorium i różnych modeli numerycznych

Analizując otrzymane wyniki, można zauważyć, że najwyższą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych uzyskano dla dwóch modeli numerycznych. Mianowicie dla modelu numerycznego, w którym wykorzystano elementy bryłowe o liniowej funkcji kształtu (Abaqus solid BP2k) oraz dla modelu numerycznego składającego się z elementów powłokowych o liniowej funkcji kształtu (Abaqus shell BP2l.k). W tych dwóch wariantach podpory modelowano poprzez zastosowanie ograniczeń przemieszczeń nałożonych na odpowiednie stopnie swobody. Można zauważyć, że model numeryczny (Abaqus solid BP2k) wykazuje zgodność odkształceń w całym zakresie obciążenia, podczas gdy model numeryczny (Abaqus shell BP2l.k) traci zbieżność przy wyższym poziomie obciążenia. Na uwagę zasługuje również model numeryczny (Abaqus solid BP2p) z elementami bryłowymi i podparami w postaci nieodkształcalnych elementów powłokowych R3D4. Model ten charakteryzuje się bardzo dobrą zbieżnością wyników z rezultatami uzyskanymi z badań laboratoryjnych przy maksymalnej wartości obciążenia. Najmniejszą

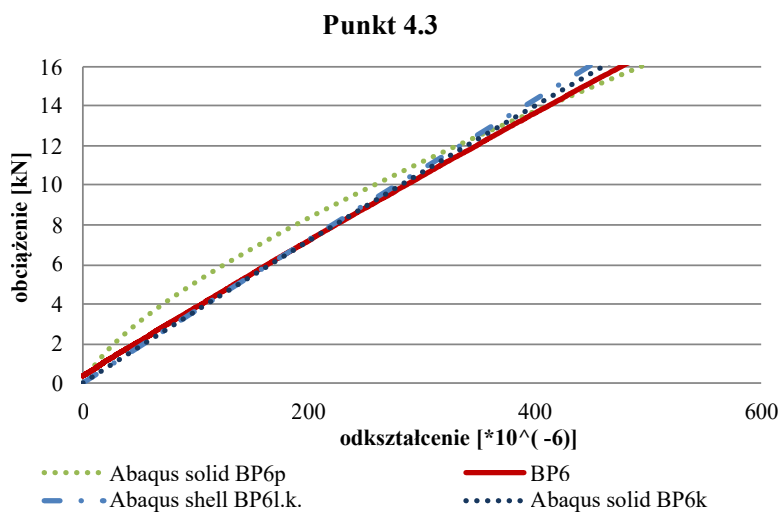
zgodność obserwuje się w przypadku belki modelowanej jako element powłokowy z kwadratową funkcją kształtu i podporami w postaci nieodkształcalnych elementów powłokowych R3D4 (Abaqus shell BP2k.p).

Na podstawie powyższych obserwacji wybrano trzy modele do dalszych analiz, tj.: Abaqus solid BP2k, Abaqus solid BP2p i Abaqus shell BP2l.k. Tak więc w przypadku wzmocnienia belek za pomocą taśmy CFRP walidacja i weryfikacja zostały ograniczone do trzech modeli numerycznych. Na rycinie 8.3 przedstawiono zależność obciążenie–odkształcenie dla belki wzmocnionej za pomocą taśm CFRP w odniesieniu do pomiaru wykonanego tensometrem elektrooporowym 4.3.

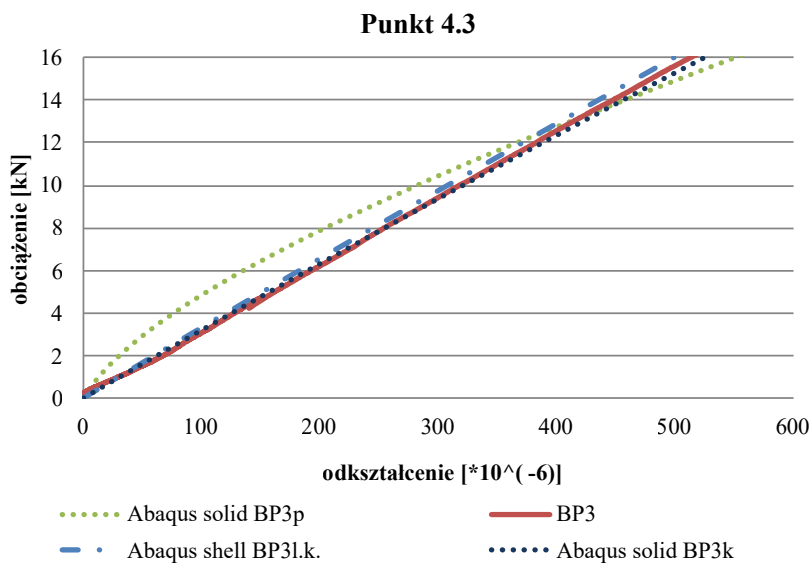
Na rycinie 8.3a wykres BP6 odnosi się do belki badanej w laboratorium, wzmocnionej za pomocą taśm CFRP w półce rozciąganej, a pozostałe wykresy ilustrują wyniki uzyskane dla trzech modeli numerycznych wzmocnionych w ten sam sposób (Abaqus solid BP6k, Abaqus solid BP6p, Abaqus shell BP6l.k). Rycina 8.3b przedstawia wartości odkształceń odczytane z tensometru 4.3 dla belki wzmocnionej za pomocą taśmy CFRP na półce ściskanej (BP3) i uzyskane z analogicznych modeli numerycznych (Abaqus solid BP3k, Abaqus solid BP3p, Abaqus shell BP3l.k).

W obu wykresach zamieszczonych na rycinie 8.3 największą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych uzyskano dla modelu zbudowanego z elementów powłokowych i modelu podpór w postaci ograniczeń przemieszczeń (Abaqus shell BP3l.k i Abaqus shell BP6l.k).

a)



b)

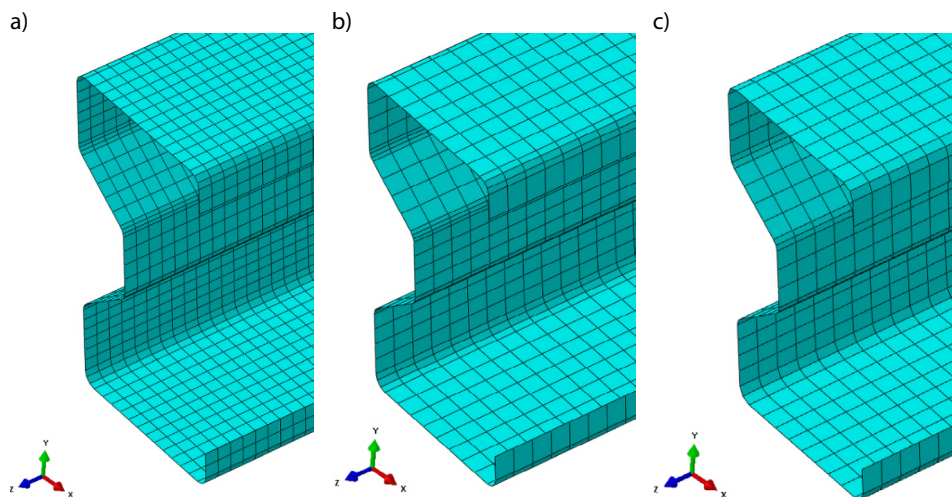


Ryc. 8.3. Zależność obciążenie–odkształcenie dla różnych modeli numerycznych i belki badanej w laboratorium: a) wzmocnionej taśmą CFRP w półce rozciąganej, b) w półce ściskanej

8.2.4. Wpływ rozmiaru siatki w modelu numerycznym

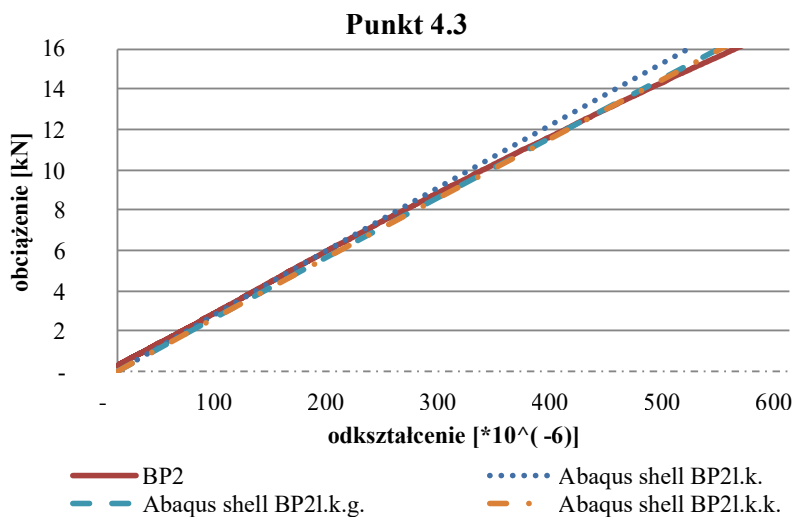
Kolejnym parametrem, który ma decydujący wpływ na wyniki analiz, jest rozmiar siatki MES w modelu numerycznym. W celu zbadania tego efektu przeprowadzono analizę rozmiaru siatki dla modelu

numerycznego z powłokowymi elementami skończonymi S4R, liniową funkcją kształtu i podporami modelowanymi jako ograniczenia przemieszczeń. Testowano dwa rozmiary siatki MES: 5 mm (Abaqus shell BP2l.k) i 7,5 mm (Abaqus shell BP2l.k.g). Kolejną modyfikacją było usunięcie zagęszczenia siatki na zaokrąglonych powierzchniach elementu. W ten sposób powstał uproszczony model o skończonym rozmiarze elementu 7,5 mm i stałej gęstości siatki (Abaqus shell BP2l.k.k). Różne konfiguracje siatki w modelach numerycznych przedstawiono na rycinie 8.4.

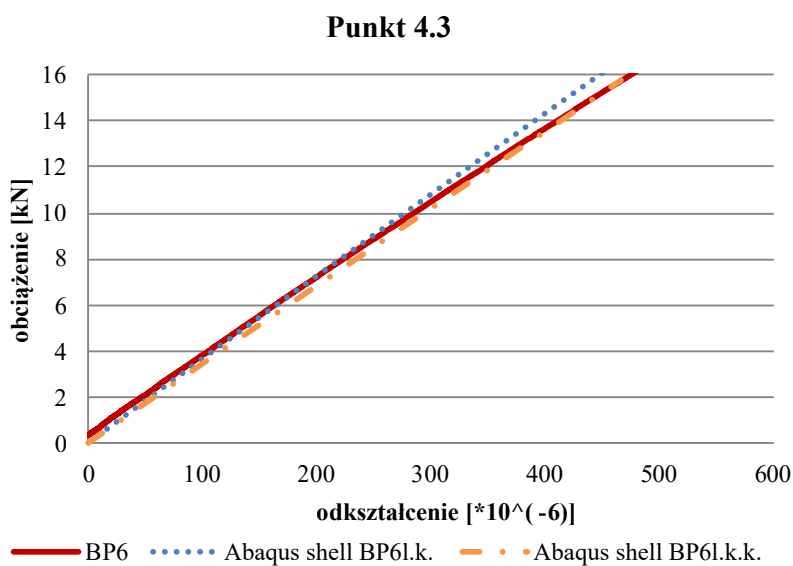


Ryc. 8.4. Różne konfiguracje siatki w modelu numerycznym:
a) Abaqus shell BP2l.k, b) Abaqus shell BP2l.k.g, c) Abaqus shell BP2l.k.k

Zależność obciążenie–odkształcenie uzyskana dla belek bez wzmocnienia dla różnych rozmiarów siatki w modelu numerycznym oraz z odczytu tensometru 4.3 została przedstawiona na rycinie 8.5. W przypadku belki wzmocnionej taśmą CFRP umieszczoną na rozciąganej półce (BP6) analizę wielkości oczek siatki (ryc. 8.6) przeprowadzono dla modeli numerycznych Abaqus shell BP6l.k.k i Abaqus shell BP6l.k. Analogicznie zależność obciążenie–odkształcenie dla belki wzmocnionej taśmą CFRP w półce ściskanej (BP3) i dla modeli numerycznych (Abaqus shell BP3l.k.k, Abaqus shell BP3l.k) pokazano na ryc. 8.7.

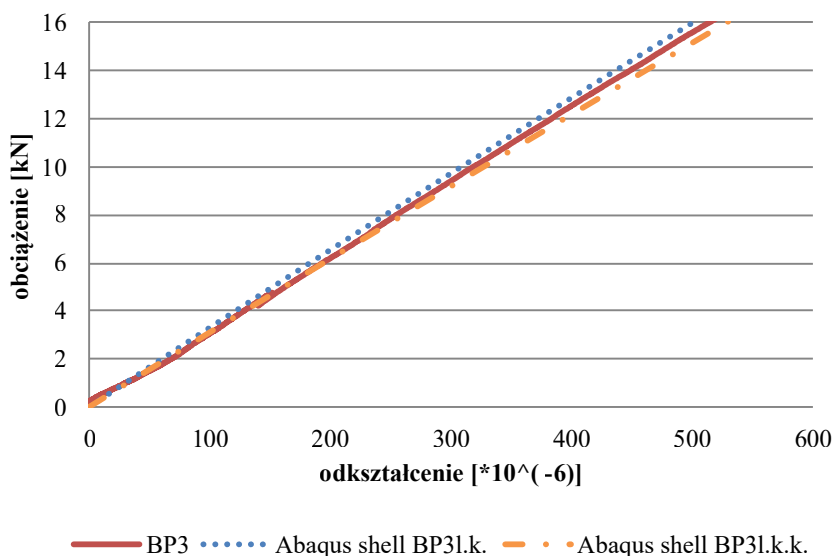


Ryc. 8.5. Zależność obciążenie–odkształcenie uzyskana z modelu numerycznego i odczyt z tensometru 4.3 dla belek niewzmocnionych dla różnych rozmiarów oczek siatki



Ryc. 8.6. Zależność obciążenie–odkształcenie uzyskana z modelu numerycznego i odczyt z tensometru 4.3 dla belek wzmacnionych w półce rozciąganej

Punkt 4.3



Ryc. 8.7. Zależność obciążenie–odkształcenie uzyskana z modelu numerycznego i odczyt z tensometru 4.3 dla belek wzmocnionych w płócie ściskanej

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że testy laboratoryjne najdokładniej opisuje model numeryczny (Abaqus shell BP21.k.k, Abaqus shell BP61.k.k, Abaqus shell BP31.k.k). Dlatego też w dalszych analizach stosowano powłokowy model numeryczny o wielkości elementu skończonego 7,5 mm, z usuniętym zagęszczeniem siatki w narożach profilu.

8.3. Model numeryczny do pierwszego etapu badań

Model stalowej belki cienkościennej typu sigma zbudowano z elementów powłokowych o liniowej funkcji kształtu. Podkładki stalowe służące podczas eksperymentu laboratoryjnego do przekazywania obciążenia z prasy na belki oraz stalowe obejmy podpór, których kształt umożliwił skonstruowanie tzw. podparcia widełkowego, zamodelowano jako nieodkształcalne elementy powłokowe. Ceownik umieszczony wewnątrz belki w obrębie podpór, celem ograniczenia deformacji profilu, wykonano jako element powłokowy o zdefiniowanej grubości i przypisano mu parametry stali S235 o charakterystyce liniowo-sprężystej.

Dla zbioru elementów skończonych modelujących podkładki i obejmy stalowe zdefiniowano punkty referencyjne, w których przypisano bezpośrednio warunki brzegowe. Punkty referencyjne określono na etapie modelowania tych części (dla płyt umieszczono je w środku ciężkości, a dla podpór w miejscu rzeczywistych przegubów), co umożliwiło realizację warunków brzegowych dla wygenerowanych punktów referencyjnych.

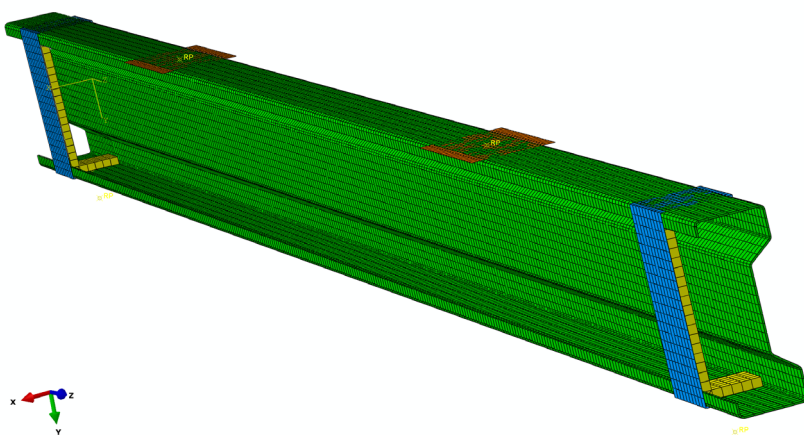
Obciążenie było realizowane w formie przyłożenia dwóch sił o równej wartości w punktach referencyjnych związanych z nieodkształcalnymi płytami względem osi Y.

W modelu numerycznym wykorzystano właściwości interakcji kontaktowych na kierunku stycznym i normalnym bez uwzględnienia współczynnika tarcia. Celem odwzorowania eksperymentu interakcje kontaktowe wprowadzono pomiędzy belką a podporami, belką a ceownikami oraz belką a podkładkami do przekazania obciążenia.

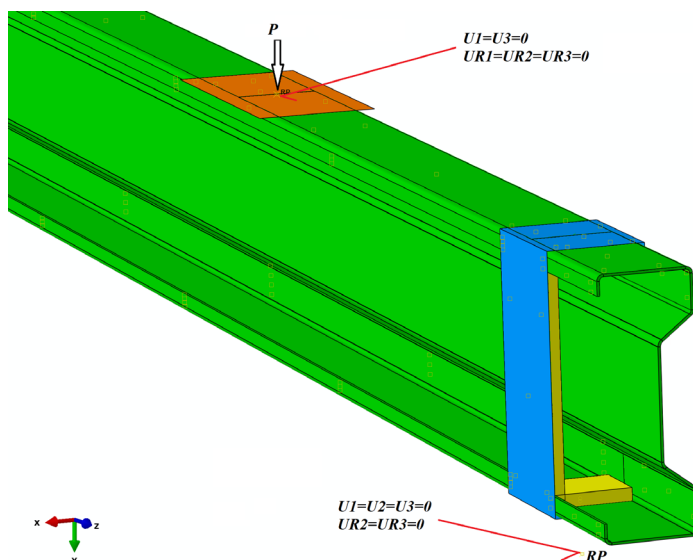
Model numeryczny składał się z 18312 węzłów obliczeniowych, przy liczbie elementów skończonych równej 17713, z czego 16273 elementy stanowią odkształcalne elementy powłokowe belki i ceownika, a 1440 elementy to nieodkształcalne liniowe elementy powłokowe podpór i płyt.

Model materiałowy przypisany elementom skończonym modelującym belkę określono jako bi-liniowy model sprężysto-plastyczny. Taśmy CFRP zamodelowano jako elementy powłokowe połączone z belką za pomocą węzłów TIE. Model materiałowy użyty do opisu taśm CFRP miał charakterystykę ortotropową. Wszystkie parametry materiałowe podane w programie Abaqus były zgodne z wartościami przedstawionymi w punkcie 6.1 pracy, tj. były przyjęte na podstawie wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych. Geometrię i dyskretyzację modelu numerycznego oraz przyjęte warunki brzegowe zaprezentowano na rycinach 8.8 i 8.9.

Na początku wykonano model belki niewzmocnionej (BRa), dla której dokonano walidacji i weryfikacji modelu, bazując na wynikach otrzymanych z badań laboratoryjnych. Po uzyskaniu zgodności wyników dla belek niewzmocnionych wykonano trzy kolejne modele numeryczne – model BGa odzwierciedlający pracę belki wzmocnionej taśmą CFRP w półce górnej (analogicznie do belek B1G, B2G i B3G badanych w laboratorium), model BDa, w którym taśmę CFRP umieszczono w półce dolnej (jak B1D, B2D i B3D), oraz model BSa z taśmą CFRP umieszczoną w środku belki (odpowiadający B1S, B2S i B3S).



Ryc. 8.8. Model numeryczny analizowanej belki

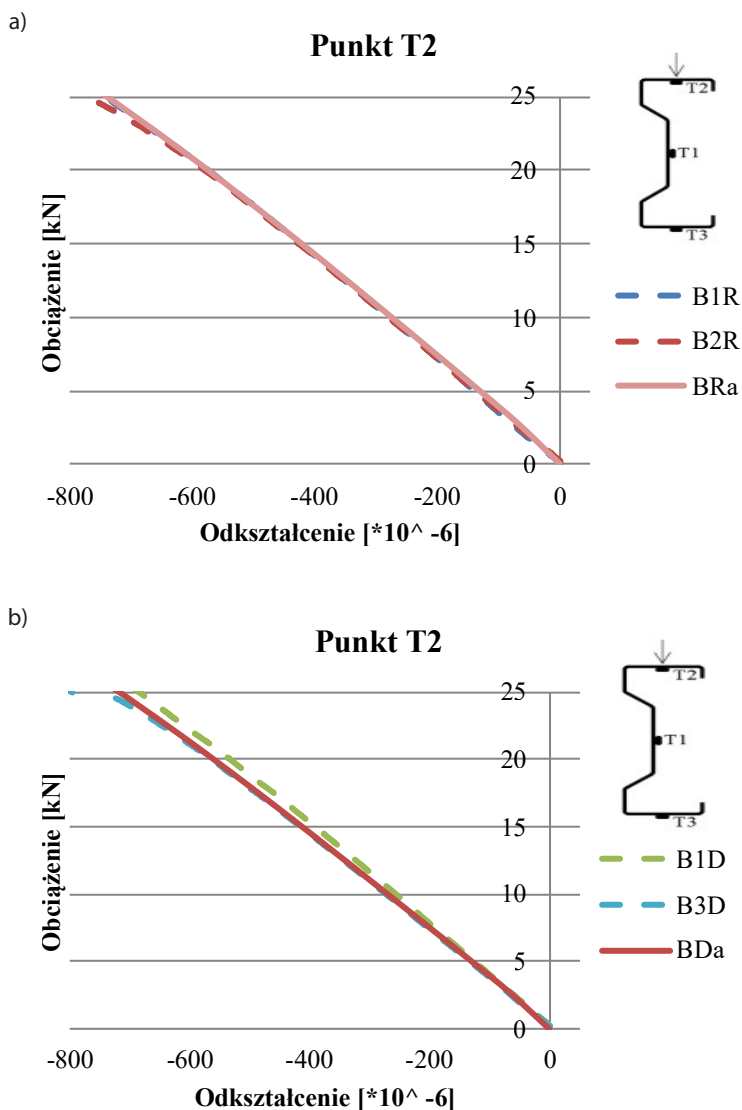


Ryc. 8.9. Szczegóły warunków brzegowych

8.3.1. Wyniki analiz numerycznych – odkształcenia

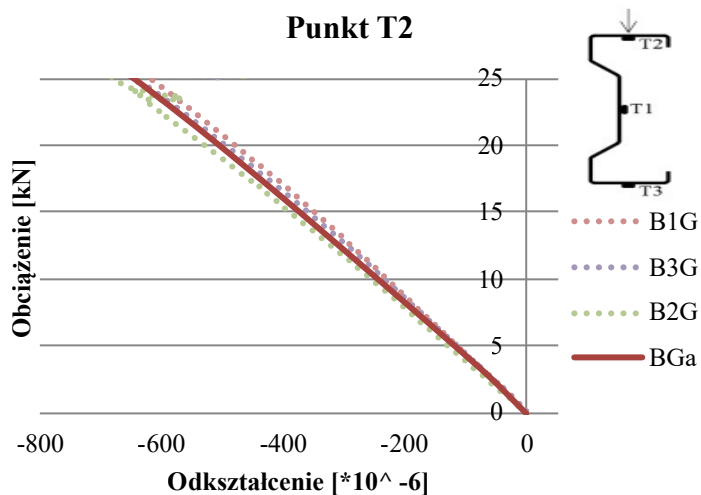
W trakcie analizy numerycznej odkształcenia belki odczytywano w miejscach, w których podczas badań laboratoryjnych umieszczone były tensometry elektrooporowe T2 i T3. W celu dokonania porównania wyników badań laboratoryjnych i numerycznych odkształcenia z programu Abaqus odczytywano jako Max. In-Plane Principal (Abs). Są to składowe obrazujące odkształcenia w kierunku podłużnym belki

w płaszczyźnie poszczególnych ścianek przekroju. Wykres zależności obciążenie-odkształcenie uzyskanej na podstawie odczytów z tensometrów elektrooporowych (T2 i T3) oraz analiz numerycznych dla różnych lokalizacji wzmocnienia taśmami CFRP, przedstawiono odpowiednio na rycinach 8.10–8.13.

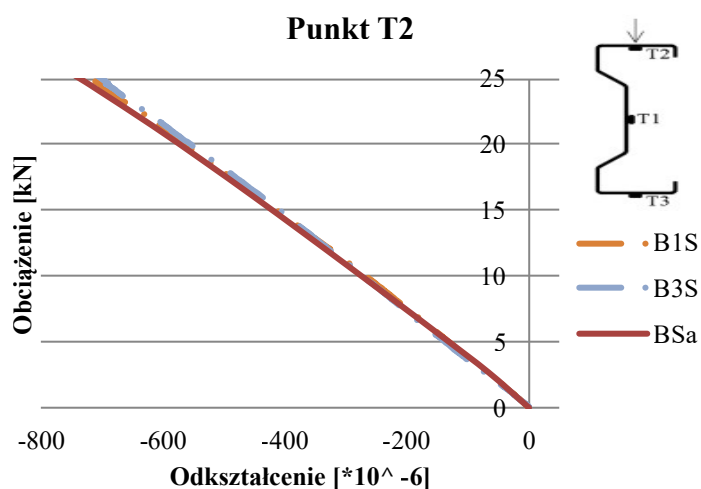


Ryc. 8.10. (a-b) Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T2 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: a) referencyjnych, b) wzmocnionych w półce dolnej

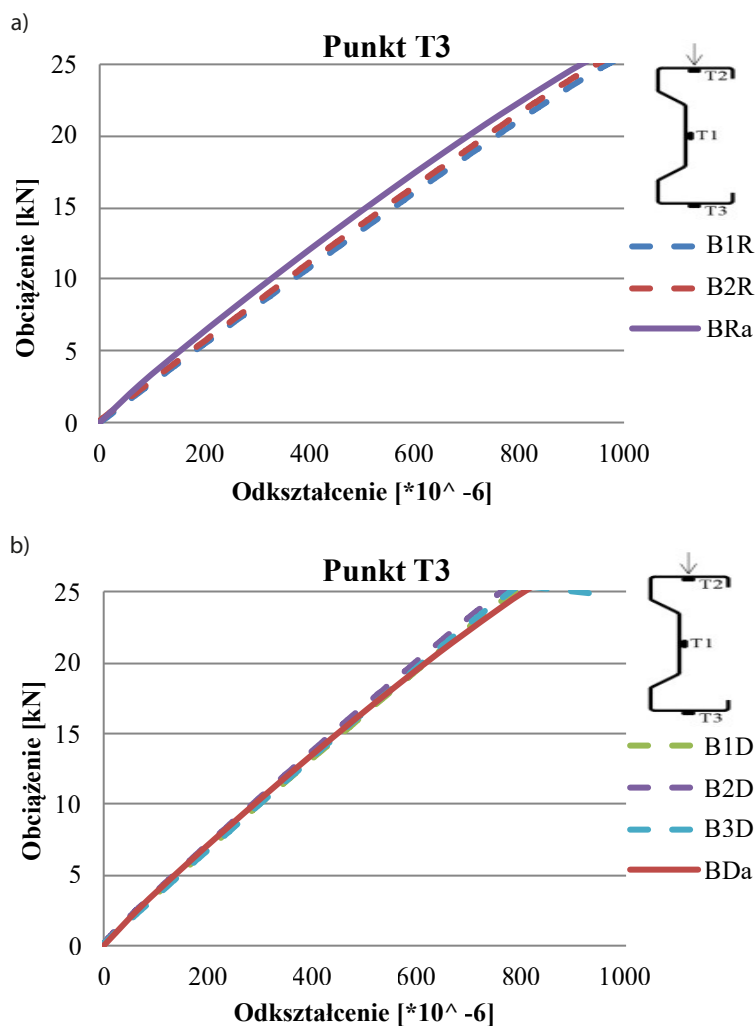
c)



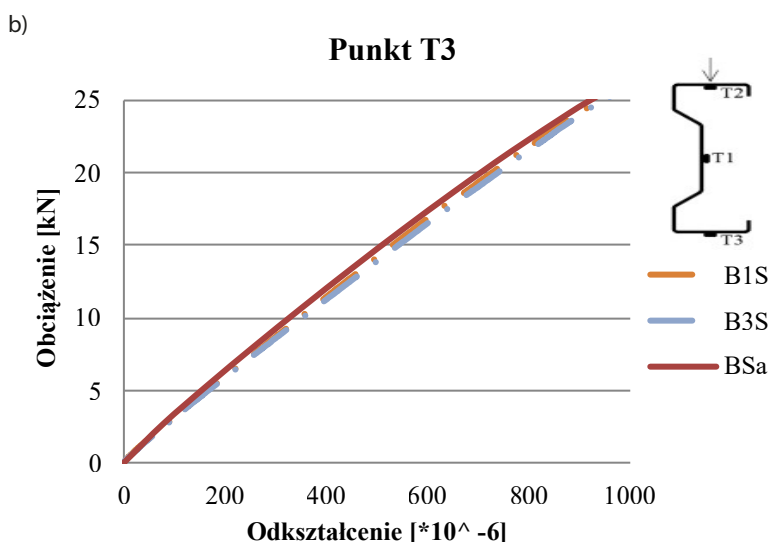
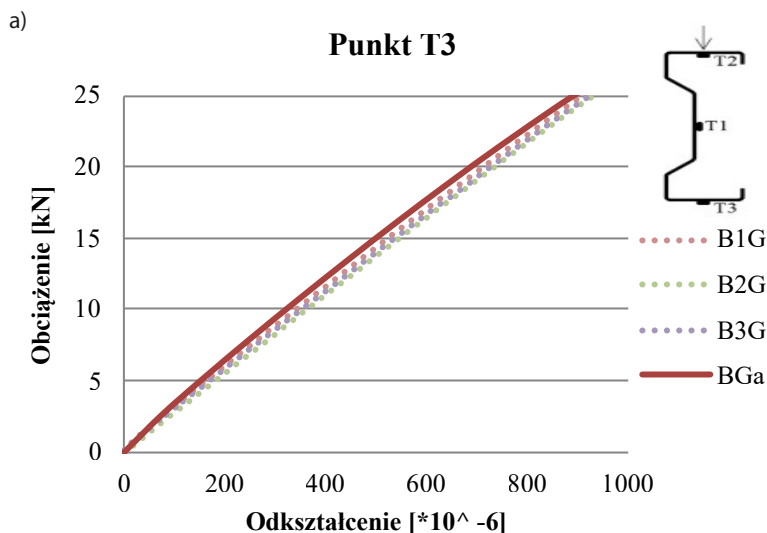
Ryc. 8.10. (c) Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T2 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: c) wzmocnionych w półce górnej



Ryc. 8.11. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T2 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek wzmocnionych w środkniku



Ryc. 8.12. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T3 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: a) referencyjnych, b) wzmocnionych w półce dolnej

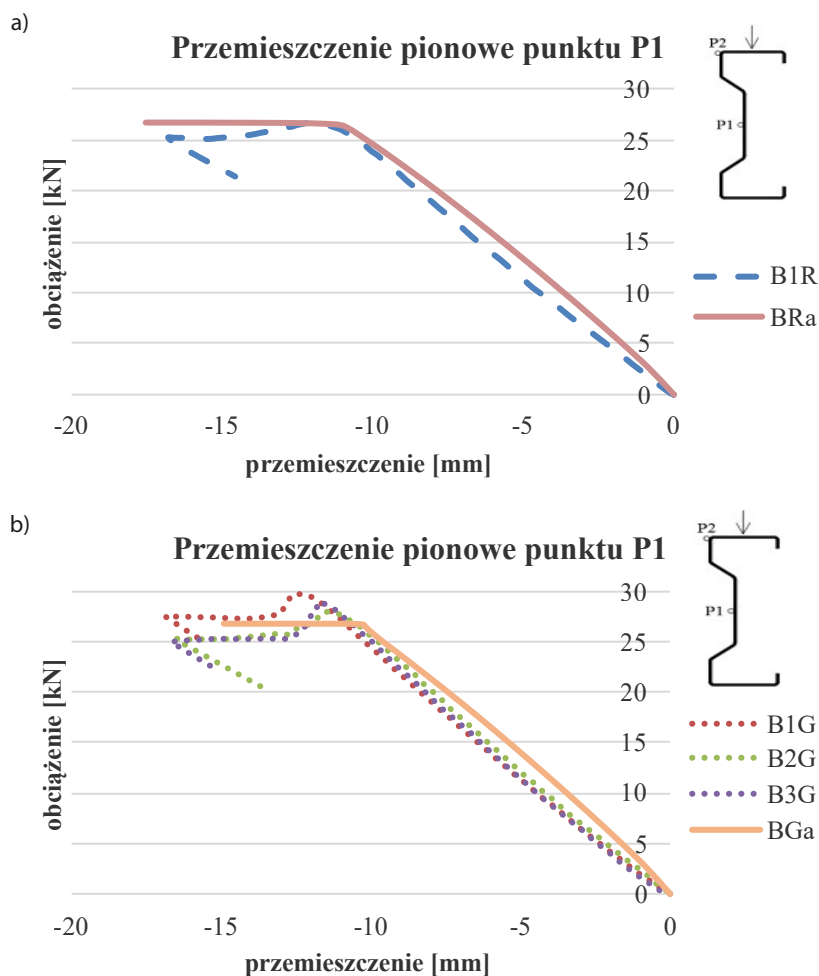


Ryc. 8.13. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T3 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek:
a) wzmocnionych w półce górnej, b) wzmocnionych w środkniku

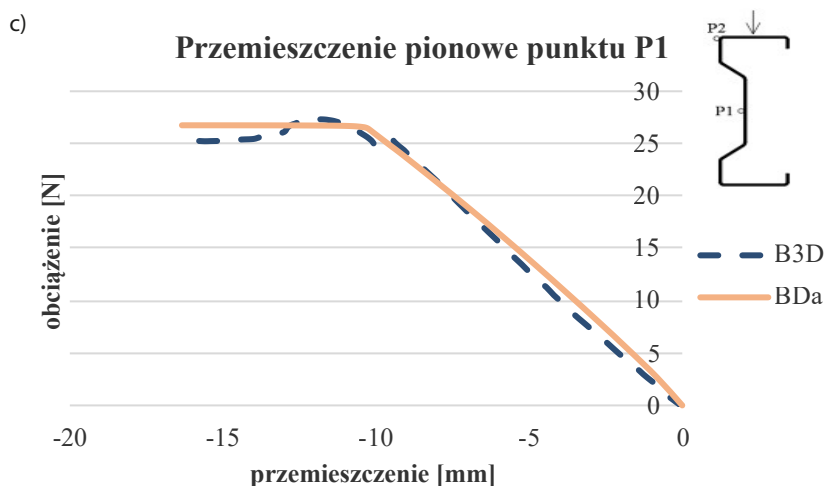
8.3.2. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia

Jak już wcześniej wspomniano w rozdziale 7.1, z uwagi na bardzo duże skręcanie towarzyszące zginaniu belek stalowych, podczas badań laboratoryjnych pomiar przemieszczeń prowadzony był za pomocą dwóch systemów Aramis. Umożliwiło to wykonanie trójwymiarowego pomiaru deformacji belki i prezentację wyników w formie filmów wideo czy

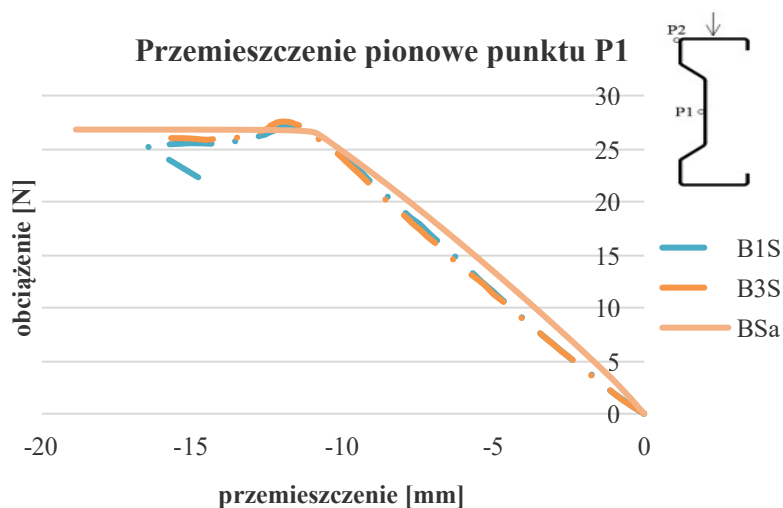
w postaci map przemieszczeń. Natomiast precyzyjny pomiar przemieszczeń w punkcie został wykonany w kilku punktach pomiarowych wcześniej przygotowanych do pomiaru deformacji za pomocą systemu Tritop. W związku z tym w niniejszym rozdziale, tak jakościową, jak i ilościową analizę przemieszczeń ograniczono do zaprezentowania wyników dla dwóch punktów. Na rycinach 8.14 i 8.15 przedstawiono przemieszczenia w kierunku pionowym w punkcie P1, natomiast na rycinach 8.16 i 8.17 przedstawiono przemieszczenia w punkcie P2. Rycina 8.18 przedstawia przemieszczenia pionowe belki bez wzmocnienia, przy obciążeniu 25 kN.



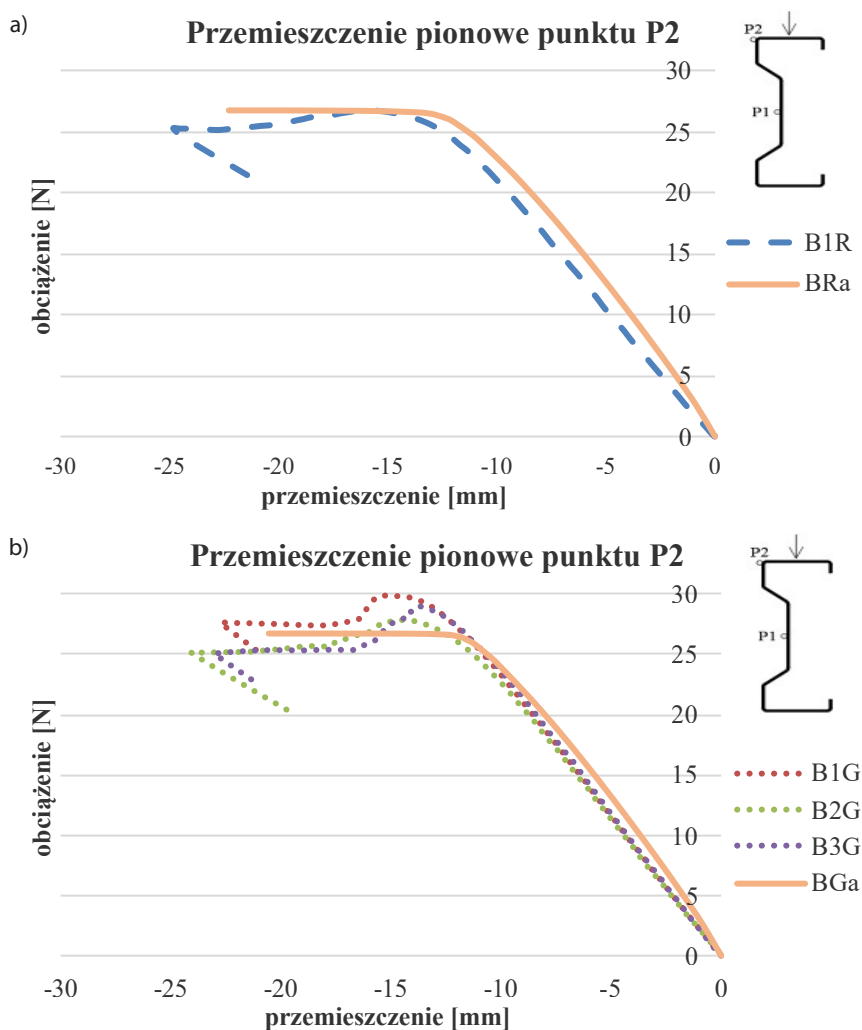
Ryc. 8.14. (a-b) Zależność obciążenie–przemieszczenie odczytana w punkcie P1 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: a) referencyjnych, b) wzmocnionych w półce dolnej



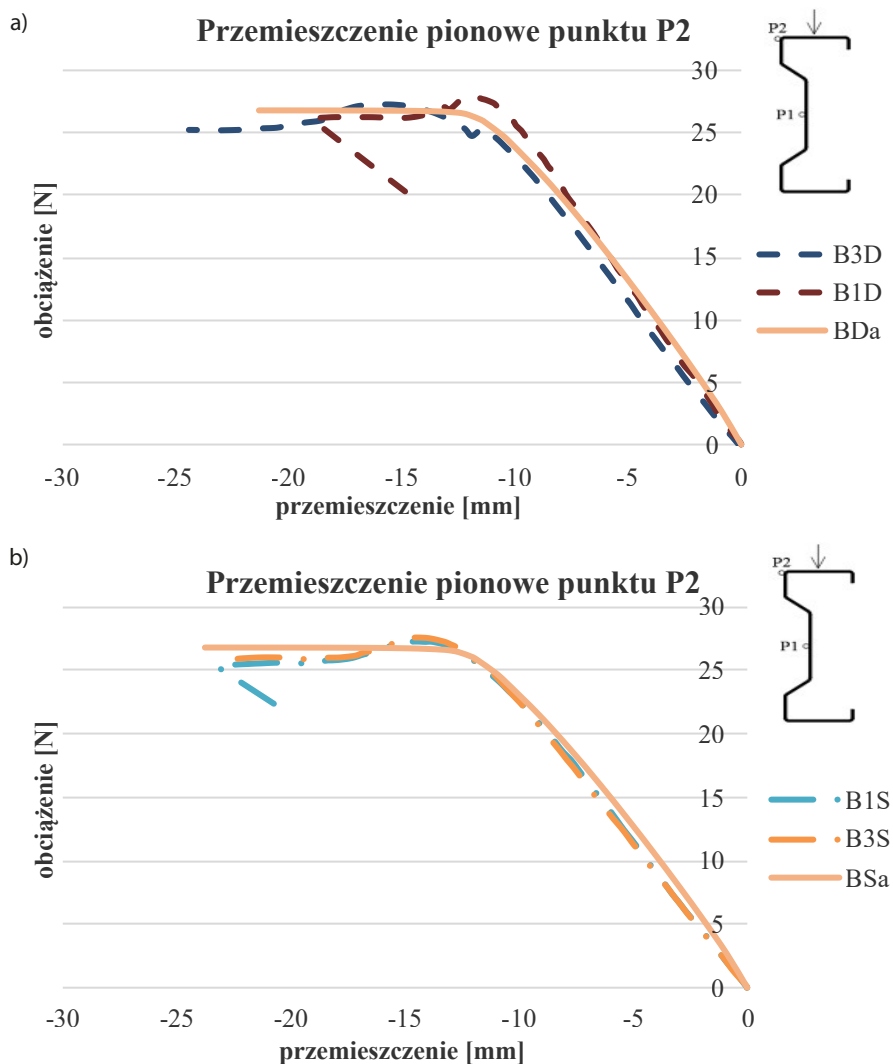
Ryc. 8.14. (c) Zależność obciążenie–przemieszczenie odczytana w punkcie P1 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: c) wzmocnionych w półce górnej



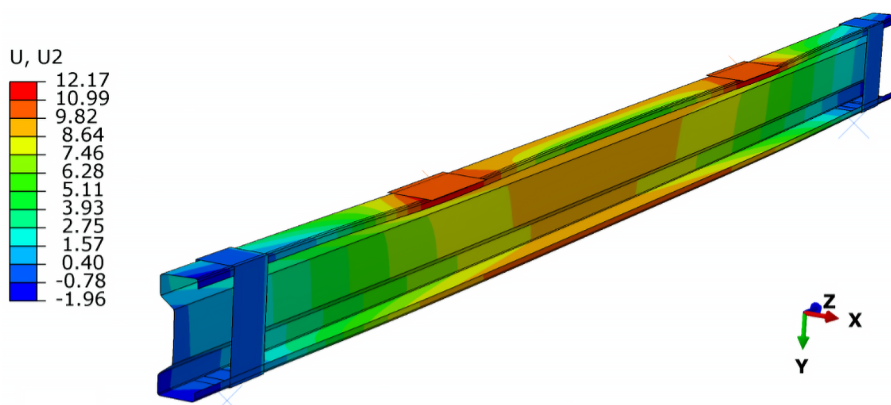
Ryc. 8.15. Zależność obciążenie–przemieszczenie odczytana w punkcie P1 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek wzmocnionych w środku



Ryc. 8.16. Zależność obciążenie–przemieszczenie odczytana w punkcie P2 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: a) referencyjnych, b) wzmocnionych w półce dolnej



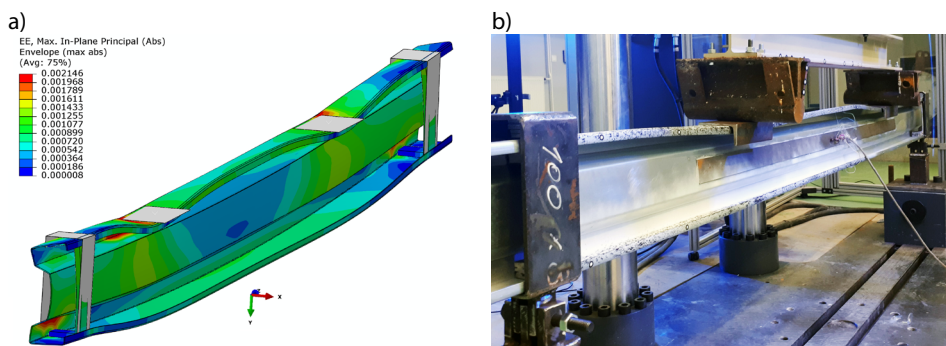
Ryc. 8.17. Zależność obciążenie–przemieszczenie odczytana w punkcie P2 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: a) wzmocnionych w półce górnej, b) wzmocnionych w środkniku



Ryc. 8.18. Przesunięcie pionowe belki bez wzmocnienia przy obciążeniu 25 kN

8.3.3. Wnioski

Na podstawie wyników przedstawionych w punktach 8.3.1–8.3.2 stwierdzono zadawalającą zgodność modelu numerycznego z wynikami badań laboratoryjnych. Obraz deformacji obciążonej belki na stanowisku laboratoryjnym także jest zgodny z obrazem otrzymanym w programie Abaqus (ryc. 8.19).



Ryc. 8.19. Deformacja belek podczas badań: a) numerycznych, b) laboratoryjnych

W przypadku odkształceń maksymalne rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi w programie Abaqus a średnią wartością pomiarów dla danej grupy belek w badaniu laboratoryjnym nie przekraczają 4,1% na poziomie obciążenia 25 kN. Analogicznie rozbieżności w przypadku przemieszczeń sięgają maksymalnie 10% (dla belek referencyjnych), a średnio 4,6%–6,8% przy obciążeniu 25 kN.

8.4. Analiza wpływu długości zakotwienia taśm CFRP

Dobór prawidłowej długości zakotwienia taśm CFRP jest przedmiotem prac badawczych, co szczegółowo przedstawiono w punkcie 2.4. Pomimo tego, w dostępnej literaturze, brak jest jednoznacznych wytycznych dotyczących zalecanej długości zakotwienia taśm w przypadku konstrukcji cienkościennych. W związku z tym w niniejszej pracy zdecydowano się na przeprowadzenie numerycznej analizy wpływu długości zakotwienia taśm CFRP na ograniczenie odkształceń w badanych belkach. Do analizy wykorzystano model numeryczny (opisany w punkcie 8.3), który został poddany weryfikacji i walidacji na podstawie badań laboratoryjnych, a całą analizę odniesiono do belek cienkościennych typu sigma z pierwszego etapu badań.

W celu analizy wpływu efektywnej długości zakotwienia taśm CFRP na odkształcenie cienkościennych stalowych belek typu sigma, wykonano szereg modeli numerycznych w programie Abaqus. W trakcie badań laboratoryjnych pierwszego etapu wykorzystano taśmy o długości 175 cm, a więc o długości zakotwienia 15 cm (patrz ryc. 2.1). Oznaczenie odpowiedników tych belek w badaniach numerycznych to BRa (belka bez wzmocnienia), BGa (belka wzmocniona w półce górnej) i BDa (belka wzmocniona w półce dolnej). Porównanie analiz numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych dla tej długości zakotwienia przedstawiono na ryc. 8.10–8.13. Następnie przeanalizowano jeszcze trzy długości zakotwienia taśmy CFRP – 7 cm, 10 cm i 35 cm, a oznaczenie modeli numerycznych z taką długością zakotwienia taśmy umieszczonej w półce dolnej to odpowiednio BD7a, BD10a i BD35a.

Wpływ efektywnej długości zakotwienia taśm CFRP na wartość odkształcenia z uwzględnieniem różnych lokalizacji taśmy CFRP przedstawiono w tabeli 8.2. Wartości procentowe reprezentują związek między wartością odkształcenia dla belki wzmocnionej za pomocą taśmy CFRP umieszczonej na półce dolnej (ϵ_{BDa}) lub półce górnej (ϵ_{BGa}) w porównaniu z wartością odkształcenia uzyskaną dla belki nieposiadającej wzmocnienia (ϵ_{BRa}), przyjętej jako belka referencyjna.

Tab. 8.2. Wartości odkształceń przekroju belek w zależności od położenia taśmy wzmacniającej

Obciążenie [kN]	Wartość odkształcenia [-]		Ograniczenie wartości odkształcenia [%]												
	ϵ_{BRa}	ϵ_{BGa}	ϵ_{BDa}	ϵ_{BD35a}	ϵ_{BD7a}	ϵ_{BD10a}	$\epsilon_{BGa}/\epsilon_{BRa}$	$\epsilon_{BDa}/\epsilon_{BRa}$	$\epsilon_{BD35a}/\epsilon_{BRa}$	$\epsilon_{BD7a}/\epsilon_{BRa}$	$\epsilon_{BD10a}/\epsilon_{BRa}$				
Tensometry elektrooporowe		13,4	375,7	329,7	369,4	369,3	369,5	369,7	87,8	CFRP Lz = 15cm	CFRP Lz = 15cm	CFRP Lz = 35cm	CFRP Lz = 7cm	CFRP Lz = 10cm	CFRP Lz = 10cm
	24,12	702,2	606,8	685,9	685,9	686,0	680,6	86,4	97,7	98,3	98,3	98,3	98,3	98,3	98,4
	13,4	443,9	434,3	384,8	387,0	383,5	383,7	97,8	86,7	87,2	86,4	86,4	86,4	86,4	86,4
24,12	866,6	842,2	749,8	753,2	747,6	748,6	97,2	86,5	86,9	86,3	86,3	86,3	86,3	86,4	

Należy zauważyć, że nie wykazano znaczących różnic w wartościach odkształceń w odniesieniu do różnych efektywnych długości zakotwienia taśmy CFRP. Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 8.4 można wnioskować, że stosowanie większej długości zakotwienia taśmy CFRP jest nieuzasadnione. Zwiększenie efektywnej długości zakotwienia spowodowało zmniejszenie odkształcenia tylko o ok. 0,5%. Jednocześnie wzrost długości taśmy CFRP podnosi koszty modernizacji konstrukcji. Ostatecznie stwierdzono, że efektywna długość zakotwienia wynosząca $L_z = 7$ cm jest najbardziej odpowiednia dla rozpatrywanej belki i jest najbliższa zaleceniom podanym przez autorów H. Jiao i in. (2004).

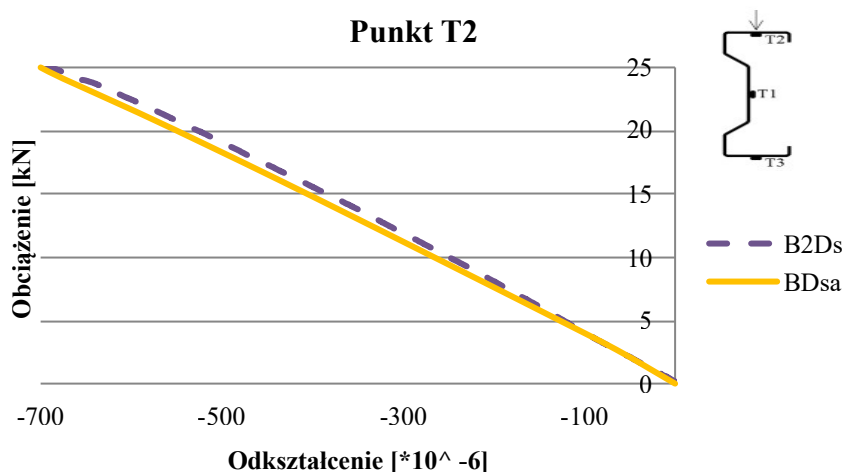
8.5. Model numeryczny – drugi etap badań

Model numeryczny dotyczący drugiego etapu badań laboratoryjnych przyjęto taki sam, jak model wykonany dla etapu pierwszego, opisany w punkcie 8.3. Jedynym elementem różniącym te dwa modele był materiał, z którego wykonano taśmę do wzmocnienia belki, ponieważ w drugim etapie badań laboratoryjnych zastosowano taśmy stalowe wykonane ze stali S235.

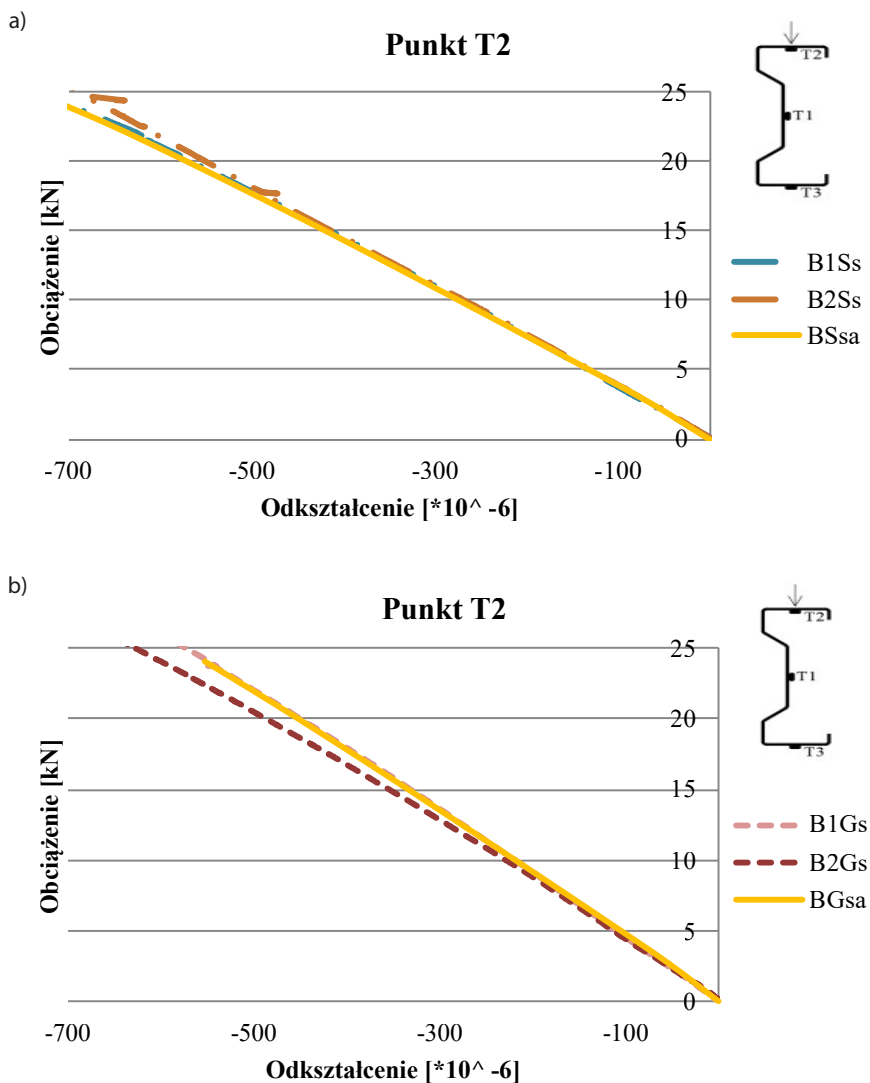
W programie Abaqus stalową taśmę zamodelowano z elementów powłokowych typu „shell” (QUAD/FREE zagęszczonych względem osi centralnej). Grubość taśmy zdefiniowano w module materiałowym równą 1,5 mm. Wprowadzone właściwości materiałowe były zgodne z parametrami stali S235, zatem do obliczeń przyjęto moduł Younga $E = 210000$ MPa, współczynnik Poissona $\nu = 0,30$, granicę plastyczności $f_y = 235$ MPa, granicę wytrzymałości na rozciąganie $f_u = 410$ MPa oraz wydłużenie procentowe przy zerwaniu 22,5%. Model materiału dla taśmy stalowej przyjęto o charakterystyce biliniowej, sprężysto-plastycznej.

8.5.1. Wyniki analiz numerycznych – odkształcenia

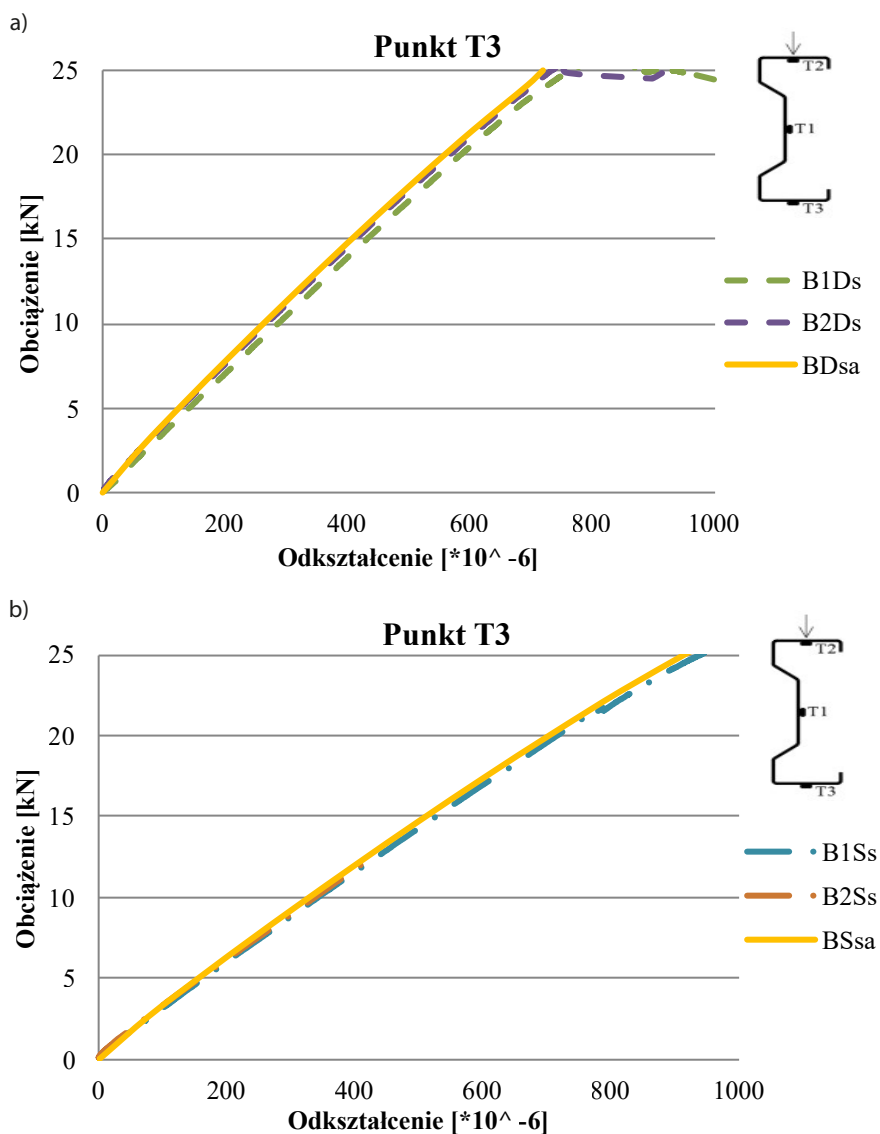
W trakcie analizy numerycznej odczytywano odkształcenia belki w miejscach, w których podczas badań laboratoryjnych umieszczone były tensometry elektrooporowe T2 i T3. Odkształcenia z programu Abaqus odczytywano jako Max. In-Plane Principal (Abs). Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych przedstawiono na rycinach 8.20–8.22. Na poniższych wykresach nie przedstawiono wyników uzyskanych dla belki referencyjnej, ponieważ zostały on już zaprezentowane na rycinach 8.10 i 8.12.



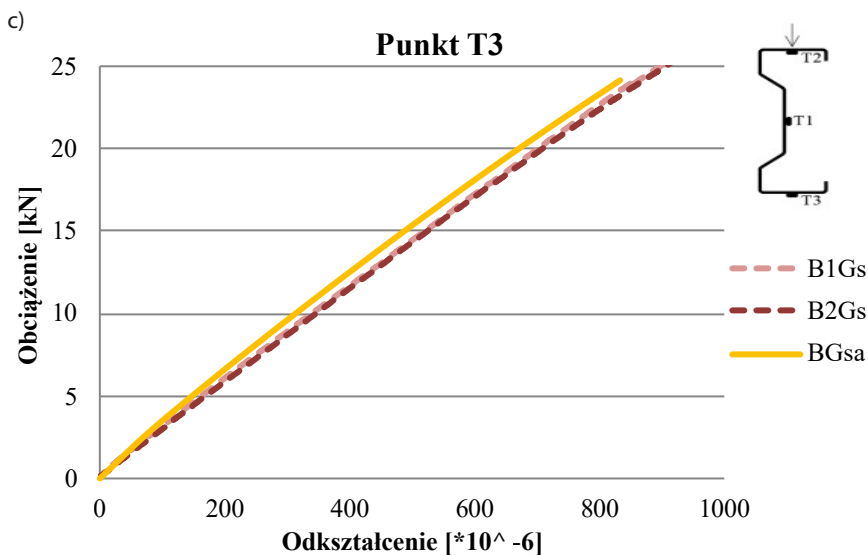
Ryc. 8.20. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T2 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek wzmocnionych w półce dolnej



Ryc. 8.21. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T2 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek:
a) wzmocnionych w środku, b) wzmocnionych w półce górnej



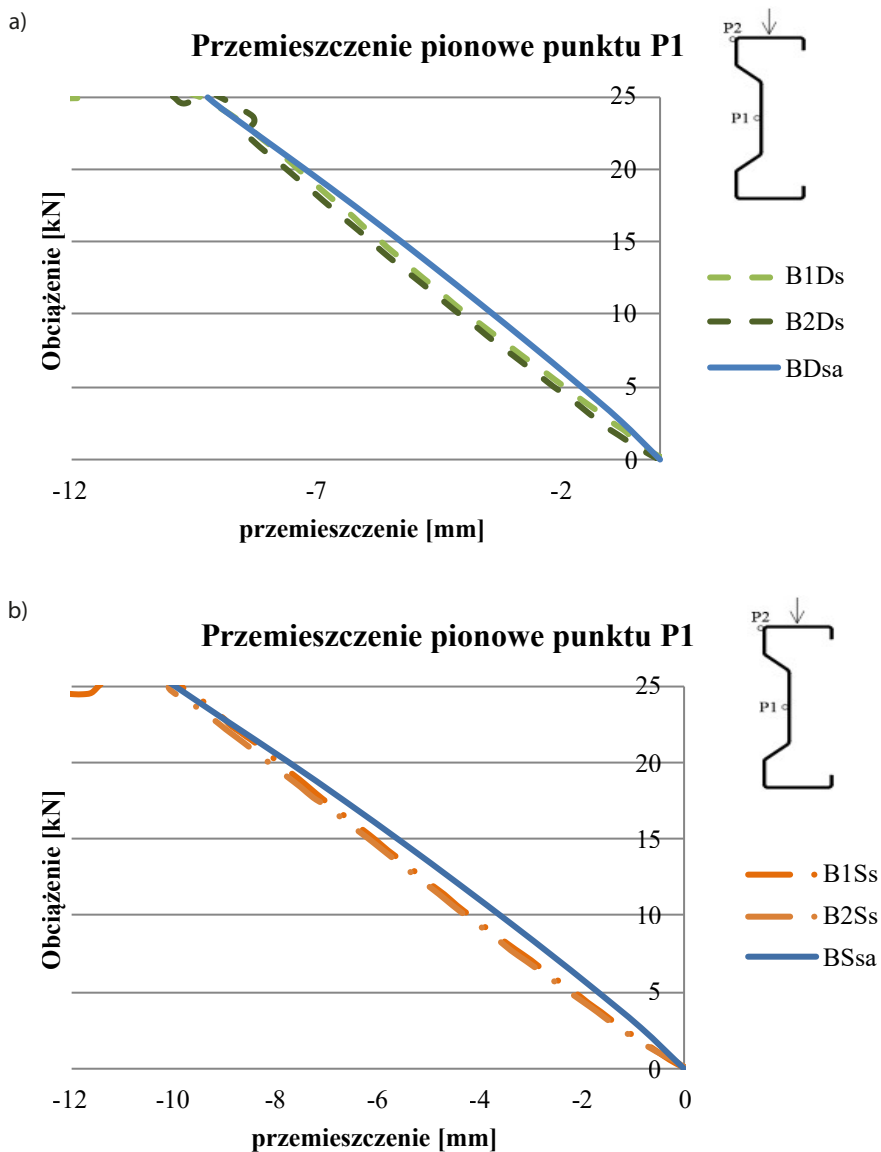
Ryc. 8.22. (a, b) Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T3 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek:
a) wzmocnionych w półce dolnej, b) wzmocnionych w środku



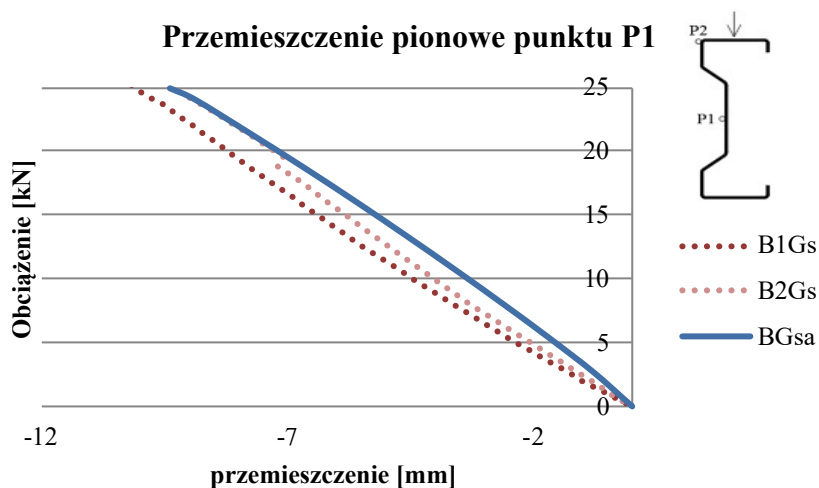
Ryc. 8.22. (c) Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometru T3 w badaniu laboratoryjnym i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek:
c) wzmocnionych w półce górnej

8.5.2. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia

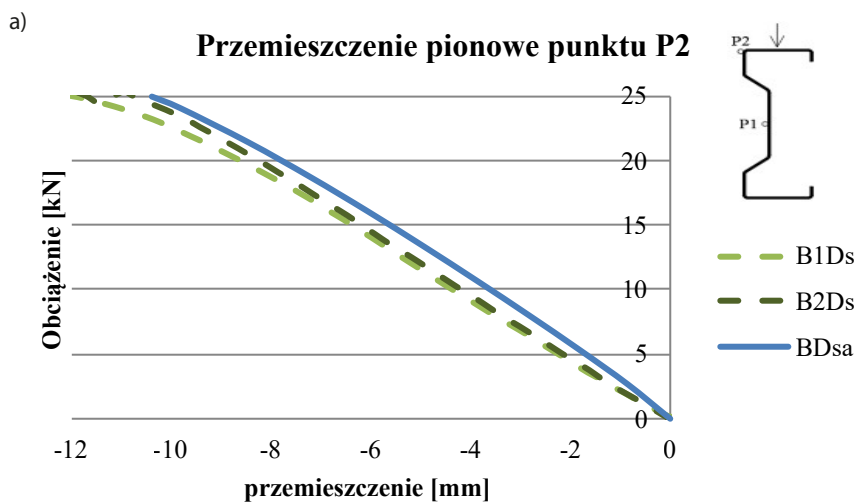
W przypadku analizy przemieszczeń uzyskano zadowalającą zgodność modelu numerycznego z wynikami uzyskanymi podczas badań laboratoryjnych. Z uwagi na znaczną liczbę punktów, w których badano przemieszczenia belek w niniejszym rozdziale, tak samo jak w punkcie 8.3, ograniczono się do zaprezentowania wyników dla dwóch punktów. Przemieszczenia w kierunku pionowym w punkcie P1 przedstawiono na rycinach 8.23 i 8.24, a w punkcie P2 na rycinach 8.25 i 8.26.



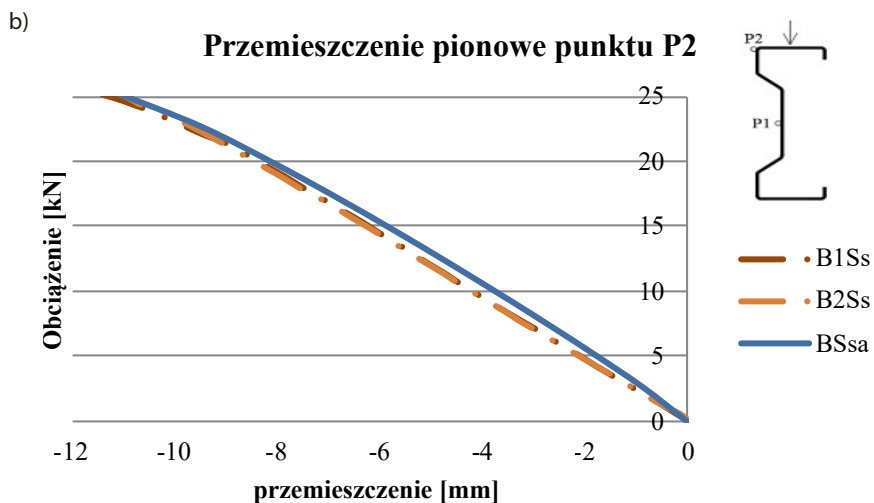
Ryc. 8.23. Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu P1 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek:
a) wzmocnionych w półce dolnej, b) wzmocnionych w środku



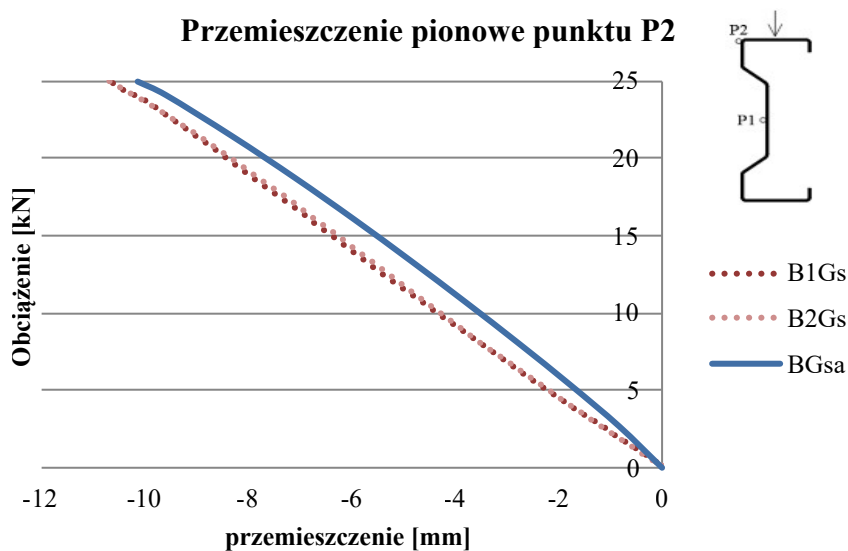
Ryc. 8.24. Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu P1 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek wzmocnionych w półce górnej



Ryc. 8.25. (a) Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu P2 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek:
a) wzmocnionych w półce dolnej



Ryc. 8.25. (b) Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu P2 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek: b) wzmocnionych w środku



Ryc. 8.26. Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu P2 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus dla belek wzmocnionych w półce górnej

8.5.3. Wnioski

Na podstawie wyników zaprezentowanych w punktach 8.5.1–8.5.2 stwierdzono zgodność modelu numerycznego z wynikami drugiego etapu badań laboratoryjnych. Forma deformacji belki zaobserwowana podczas badań laboratoryjnych także jest zgodna z kształtem otrzymanym w programie Abaqus (patrz ryc. 8.19).

W przypadku odkształceń maksymalne rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi w programie Abaqus a średnią wartością pomiarów dla danej grupy belek w badaniu laboratoryjnym sięgają maksymalnie 6% na poziomie obciążenia 25 kN. Analogicznie rozbieżności w przypadku przemieszczeń sięgają maksymalnie 9,5% (dla belek wzmocnionych w pasie dolnym), a średnio 4%–5,5% przy obciążeniu 25 kN.

8.6. Model numeryczny – trzeci etap badań

Model stalowej belki cienkościennej typu sigma o wysokości 140 mm wykonano z elementów powłokowych o aproksymacji w postaci liniowej funkcji kształtu. Podkładki służące do przekazywania obciążenia z prasy na belki oraz obejmowy podpór, których kształt odzwierciedlał podparcie widełkowe, tak samo jak w dwóch pierwszych etapach, zamodelowano jako nieodkształcalne elementy powłokowe.

Obejmom i podkładkom przyporządkowano punkty referencyjne, w których bezpośrednio przypisano warunki brzegowe. Punkty referencyjne zdefiniowano na etapie projektowania tych części (dla podkładek umieszczono je w środku ciężkości, a dla podpór w miejscu rzeczywistych przegubów). Obciążenie było realizowane w postaci przyłożenia dwóch sił po kierunku osi Y, o równej wartości w punktach referencyjnych powiązanych z nieodkształcalnymi podkładkami.

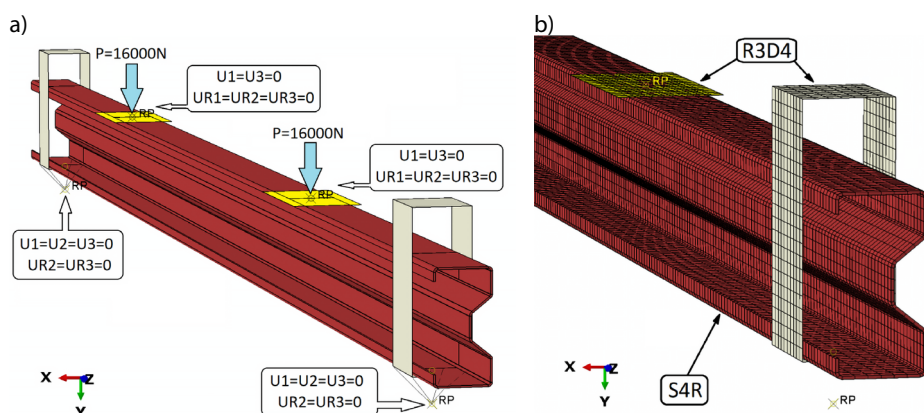
W modelu numerycznym uwzględniono właściwości interakcji kontaktowych na kierunku stycznym i normalnym bez tarcia. Celem odwzorowania eksperymentu, interakcje kontaktowe wprowadzono pomiędzy belką a podporami, belką a ceownikami oraz belką a podkładką służącą do przekazania obciążenia.

Model numeryczny składał się z 16104 węzłów obliczeniowych, przy liczbie elementów skończonych równej 15587, z czego 14147 to elementy typu S4R stanowiące odkształcalne elementy powłokowe belki,

a 1440 to elementy typu R3D4 będące nieodkształcalnymi liniowymi elementami powłokowymi tworzącymi elementy podpór i podkładek.

Materiał przyjęty dla elementów skończonych belki modelowano, wykorzystując sprężysto-plastyczny model materiału o charakterystyce biliniowej. W przypadku belek wzmocnionych, taśmy CFRP modelowano jako elementy powłokowe połączone z belką za pomocą węzłów TIE.

Model numeryczny i warunki brzegowe zaprezentowano na rycinie 8.27.

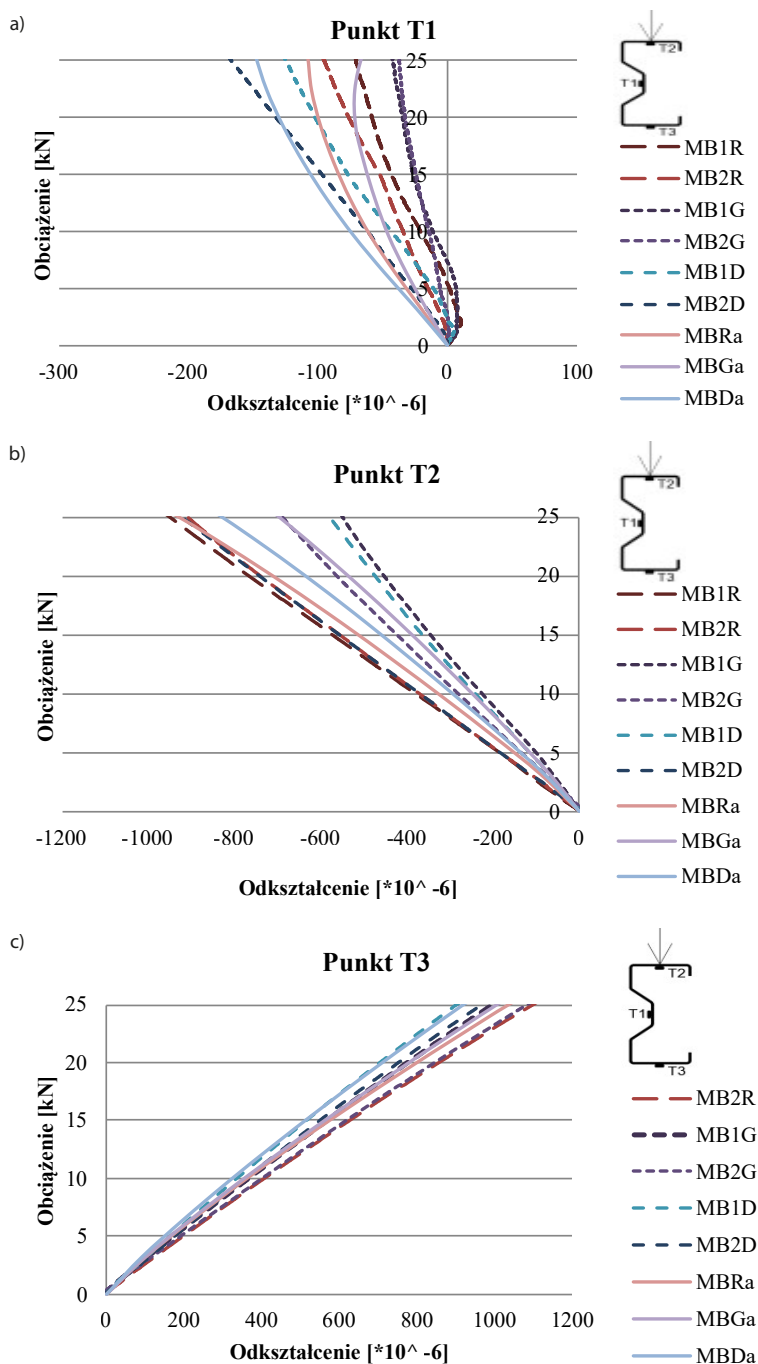


Ryc. 8.27. Model numeryczny do trzeciego etapu badań: a) warunki brzegowe, b) wygląd siatki

8.6.1. Wyniki analiz numerycznych – odkształcenia

W trakcie analizy numerycznej odczytywano odkształcenia belki w miejscach, w których podczas badań laboratoryjnych umieszczone były tensometry elektrooporowe T1, T2 i T3. Odkształcenia z programu Abaqus odczytywano jako Max. In-Plane Principal (Abs).

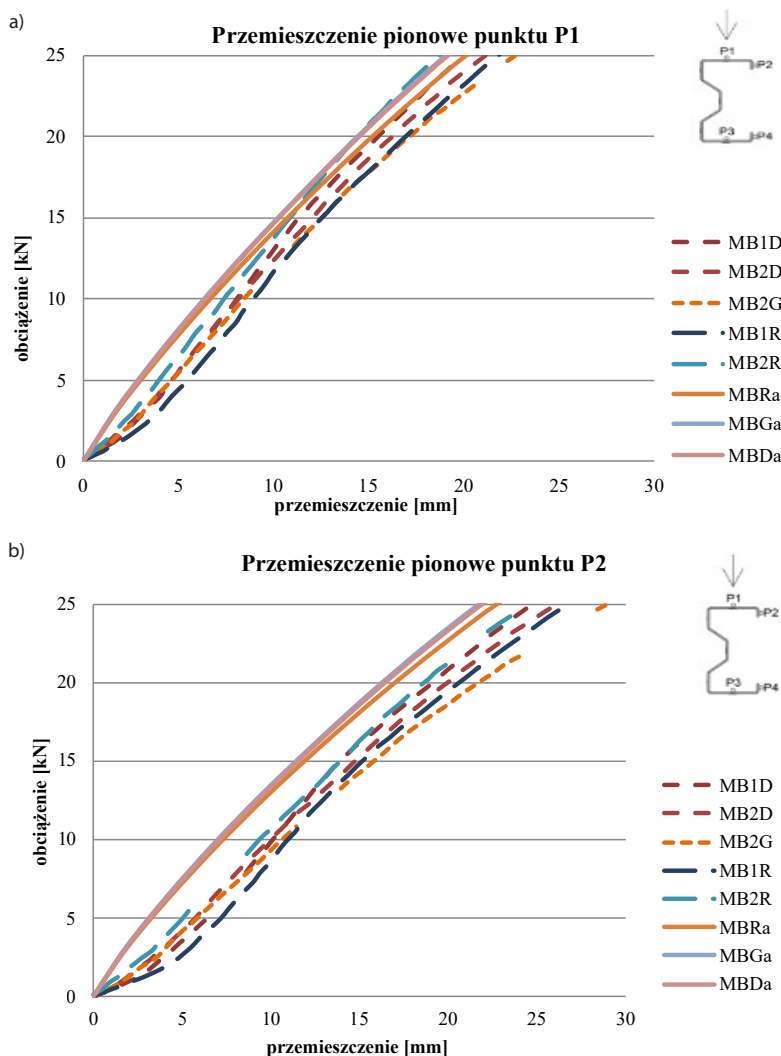
Belkę nieposiadającą wzmocnienia oznaczono w analizach numerycznych jako MBRa, belkę wzmocnioną w półce górnej MBGa, a belkę wzmocnioną taśmą CFRP w półce dolnej MBDa. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych przedstawiono na rycinie 8.28.



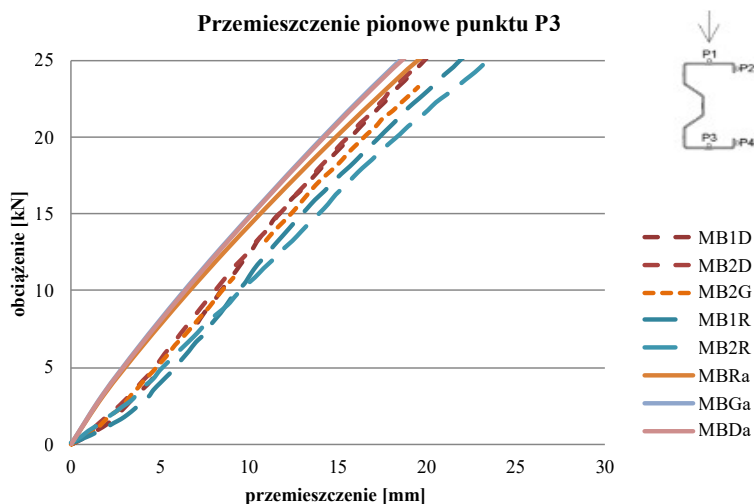
Ryc. 8.28. Zależność obciążenie–odkształcenie odczytana z tensometrów elektrooporowych w badaniu laboratoryjnym i w analogicznych punktach w programie Abaqus: a) w miejscu tensometru T1, b) w miejscu tensometru T2, c) w miejscu tensometru T3

8.6.2. Wyniki analiz numerycznych – przemieszczenia

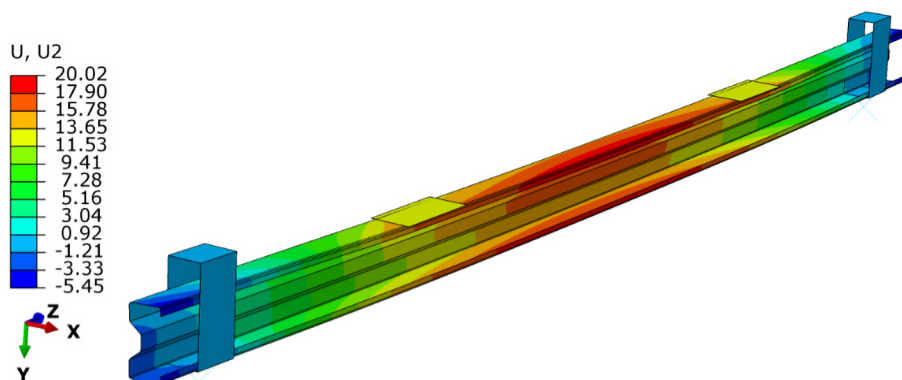
W trakcie badań laboratoryjnych kontrolowano przemieszczenia próbek w czterech punktach, oznaczonych symbolami P1, P2, P3 i P4. Na rycinach 8.29 i 8.30 przedstawiono wyniki przemieszczeń w kierunku pionowym dla wybranych punktów, celem sprawdzenia zgodności analiz numerycznych i badań laboratoryjnych. Na rycinie 8.31 zamieszczono mapę przemieszczeń pionowych belki bez wzmocnienia, uzyskaną z analizy numerycznej.



Ryc. 8.29. Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu: a) P1, b) P2 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus



Ryc. 8.30. Zależność obciążenie–przemieszczenie dla punktu P3 na kierunku pionowym podczas badań laboratoryjnych i w analogicznym punkcie w programie Abaqus



Ryc. 8.31. Przemieszczenia pionowe belki bez wzmocnienia przy obciążeniu 25 kN

8.6.3. Wnioski

Analizując wykresy przedstawione na rysunku 8.28 dotyczące odkształceń uzyskanych dla belek trzeciego etapu badań, należy stwierdzić, że opracowane modele numeryczne, pod względem jakościowym, odwzorowują rzeczywistą odpowiedź konstrukcji wzmocnionych taśmami CFRP. To znaczy reprezentują one taki sam trend tak w zakresie wyników testów laboratoryjnych, jak i analiz numerycznych. Pod względem ilościowym odczyty odkształceń z tensometrów elektrooporowych

dla belek z danej grupy (referencyjnych, wzmocnionych w półce dolnej i górnej) nieznacznie różniły się. Na poziomie obciążenia 25 kN rozbieżność pomiędzy uzyskanymi wynikami osiągnęła maksymalnie 12%, a średnio 3,5–5,5% dla tensometrów T2 i T3. Podobnie w przydatku przemieszczeń rezultaty badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych, przedstawione na rysunkach 8.29 i 8.30, charakteryzuje zbliżony charakter ścieżki równowagi obciążenie-przemieszczenie. Ponadto forma deformacji belek uzyskana na podstawie badań numerycznych i badań laboratoryjnych jest zgodna, co dodatkowo potwierdza właściwy sposób modelowania badanych belek cienkościennych typu sigma. Jednakże w przeciwieństwie do pierwszego i drugiego etapu badań numerycznych, model numeryczny w trzecim etapie nie wykazuje pełnej zgodności ilościowej w zakresie wpływu umiejscowienia taśm CFRP na ograniczenie przemieszczeń pionowych. Belki użyte w trzecim etapie badań laboratoryjnych nie zostały poddane pomiarom wstępnych imperfekcji geometrycznych. Być może, w przeciwieństwie do belek z pierwszego i drugiego etapu badań (belek typu B), wstępne imperfekcje geometryczne belek typu MB wykraczały poza dopuszczalne odchyłki wymiarowe, co może być przyczyną braku zgodności badań laboratoryjnych i numerycznych. Dlatego też, w tym przypadku, model numeryczny wymagałby dalszych modyfikacji pod kątem uwzględnienia ewentualnych wstępnych imperfekcji geometrycznych belek.

Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy dokonano analizy efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych profilowanych na zimno typu sigma przy użyciu taśm CFRP i taśm stalowych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu ich umiejscowienia na pole odkształceń i przemieszczeń. W tym celu przeprowadzono szeroki wachlarz badań naukowych obejmujący pilotażowe i właściwe testy laboratoryjne oraz odpowiadające im symulacje numeryczne, w których analizowano różne konfiguracje wzmocnienia. Mając na uwadze, że w laboratorium bardzo trudne jest wierne odwzorowanie warunków panujących w rzeczywistych konstrukcjach poddawanych wzmocnieniu, tj. występujących pod wstępnym obciążeniem, każdorazowo badano także belki niewzmocnione (referencyjne), względem których określano efektywność poszczególnych rodzajów wzmocnienia. Jak powszechnie wiadomo istnienie początkowego stanu naprężeń może wydatnie wpłynąć na skuteczność przeprowadzonego wzmocnienia. Dlatego też, w praktyce inżynierskiej, zalecane jest maksymalne odciążenie konstrukcji podlegającej wzmocnieniu. Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, w niniejszej pracy przyjęto, że przeprowadzenie badań efektywności wzmocnienia belek bez wstępnego obciążenia, ale w odniesieniu do belek referencyjnych, może być uznane za miarodajne i dostarczyć istotnych informacji przydatnych do projektowania wzmocnienia tego typu elementów. Wnioski szczegółowe wynikające z przeprowadzonych analiz opisano w punktach 6.2.4, 7.2.5, 7.3.5 i 7.5.5. Uwagi dotyczące stosowanych metod zestawiono poniżej. Ponadto przedstawiono propozycje tematyki badań, które mogą być rozwijane w przyszłości.

9.1. Uwagi i wnioski dotyczące metod pomiarowych

Na podstawie obserwacji poczynionych podczas badań pilotażowych oraz badań właściwych sformułowano następujące wnioski, dotyczące zastosowanych metod pomiarowych:

- a. Zastosowany do pomiarów wstępnych imperfekcji geometrycznych belek typu B system Tritop pozwolił na precyzyjny pomiar geometrii belek.
- b. Wykorzystane do pomiarów odkształceń tradycyjne tensometry elektrooporowe umożliwiają prawidłowy pomiar odkształceń elementów cienkościennych. Jednak z uwagi na złożony stan naprężeń występujący w zginanym przekroju monosymetrycznym, pełna analiza naprężeń wymaga pomiaru odkształceń za pomocą tensometrów w układzie rozety.
- c. Zastosowany system Aramis z dwoma czujnikami pozwala na pomiar 3D przemieszczeń i odkształceń badanych elementów. Należy jednak pamiętać, że właściwie wykorzystanie możliwości pomiarowych systemu zależy od precyzyjnego określenia celu pomiaru, a co za tym idzie odpowiedniego doboru rozmiaru badanego obszaru i rodzaju soczewki pomiarowej. Na jakość uzyskanych wyników ma również wpływ wybór prędkości wykonywania pomiarów, jakość płatów wzoru (czyli jakość wzoru wykonanego na powierzchni próbki) i kąt soczewki. Nieprawidłowy wybór tych parametrów może powodować znaczny „szum” w uzyskanych wynikach. W przeprowadzonych badaniach system pozwalał na pomiar przemieszczeń na około 120 cm długości belek. Tym samym precyzyjny pomiar odkształceń na niewielkim obszarze okazał się niemożliwy.
- d. Wykorzystane w badaniach pilotażowych czujniki indukcyjne do pomiaru przemieszczeń nie spełniają swojej funkcji podczas badania zginanych elementów monosymetrycznych (w tym przypadku belek o przekroju sigma), które z uwagi na swoją charakterystykę geometryczną podczas obciążenia ulegają znacznemu skręcaniu. Wynika to z faktu, że podczas badania czujnik nie mierzy stale przemieszczenia jednego punktu, co uniemożliwia uzyskanie miarodajnych wyników.
- e. Jak już wcześniej wspomniano, do pomiaru przemieszczeń podczas badań właściwych wykorzystano system Aramis. System zdecydowanie sprawdził się podczas dokonywania pomiarów. Jediną wadą

jest konieczność ustawienia czujników systemu w taki sposób, by podczas badania wszystkie powierzchnie elementu były dobrze widoczne. W przypadku badanych belek, z uwagi na ograniczenia stanowiska laboratoryjnego, przy wyższych poziomach obciążenia niektóre obszary ulegały zacienieniu, co uniemożliwiło pomiar.

9.2. Uwagi końcowe

Podsumowując, w niniejszej pracy wykazano korzystny wpływ zastosowania taśm CFRP na ograniczenie przemieszczeń i odkształceń zginiętych cienkościennych belek stalowych o przekroju typu sigma. W badaniach celowo wykorzystano dwa typy belek (B i MB). Belki typu MB (niższe i o grubszej ścianie przekroju) cechowała mniejsza smukłość ścianki i większa smukłość prętowa, w związku z tym pod wpływem obciążenia obserwowano globalne formy deformacji. Belki typu B (wyższe i o cieńszej ścianie przekroju) charakteryzowały się większą smukłością ścianki i mniejszą smukłością prętową, a więc pod wpływem obciążenia dominowały lokalne formy deformacji. Korzystne efekty wzmocnienia taśmami CFRP uzyskano zarówno w przypadku belek wysokich, jak i niskich, a więc przy dwóch różnych sposobach pracy elementu. Zastosowanie taśm CFRP pozwoliło w skrajnych przypadkach i w wybranych punktach na ograniczenie odkształceń w belkach wysokich o 36%, a w belkach niskich nawet o 51%, a ograniczenie przemieszczeń odpowiednio o 49% i o 33%. Stanowi to odpowiedź na pierwsze pytanie stawiane w pracy: Jaki wpływ ma zastosowanie taśm CFRP na ograniczenie odkształceń i przemieszczeń cienkościennych belek stalowych o przekroju sigma? Ponadto przeprowadzone badania wykazały, że umiejscowienie wzmocnienia z taśm CFRP na wysokości przekroju cienkościennego silnie wpływa na pole odkształceń i przemieszczeń stalowych belek cienkościennych o przekroju typu sigma. Przeprowadzone badania ujawniły słabość powszechnie zalecanego sposobu stosowania wzmocnienia konstrukcji stalowych za pomocą taśm CFRP, który polegał na wykonaniu wzmocnienia poprzez przyklejenie taśm CFRP jedynie do spodu dolnej półki profilu, tj. półki rozciąganej. Zatem w świetle przeprowadzonych badań można sformułować pewne wytyczne projektowe dotyczące sposobu wzmocniania stalowych elementów profilowanych na zimno typu sigma. Na przykład dla rozpatrywanej rozpiętości

i sposobu obciążenia belek umieszczenie taśm CFRP na półce ściskanej może być rekomendowane, kiedy celem wzmocnienia jest maksymalne ograniczenie przemieszczeń poziomych (belki typu B) lub maksymalne zmniejszenie odkształceń w środku (belki typu B i MB). Jeśli celem wzmocnienia jest ograniczenie przemieszczeń pionowych, taśmy CFRP należy umieszczać na półce rozciąganej (belki typu B i MB). Ponadto, porównując wyniki badań z pierwszego i drugiego etapu, stwierdzono, że w celu ograniczenia przemieszczeń (zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym) oraz odkształceń środka i półki ściskanej belki korzystniejsze jest zastosowanie taśm CFRP. Z kolei w celu ograniczenia odkształceń półki rozciąganej bardziej efektywne okazało się zastosowanie taśm stalowych. Należy pamiętać, że wykonanie wzmocnienia z taśm stalowych przyczynia się do zwiększenia ciężaru własnego elementu, jednak koszt taśmy stalowej jest zdecydowanie niższy niż taśmy CFRP. Zatem przystępując do projektowania wzmocnienia stalowego elementu cienkościennego, należy dokładnie przeanalizować zalety i wady płynące z prezentowanych powyżej sposobów wzmocnienia i dopiero na tej podstawie podjąć uzasadnioną wytrzymałościowo i ekonomicznie decyzję o typie taśmy wzmacniającej.

Warto wspomnieć, że w niniejszej pracy dla wszystkich etapów badań laboratoryjnych opracowano modele numeryczne w programie Abaqus, osiągając zadowalającą zbieżność wyników analiz numerycznych z wynikami badań laboratoryjnych. Analizy numeryczne także potwierdziły zaobserwowany w badaniach laboratoryjnych wpływ zastosowania wzmocnienia na ograniczenie odkształceń i przemieszczeń belek o przekroju typu sigma. Z uwagi na zadowalającą zbieżność wyników uzyskanych z modelu MES z wynikami badań laboratoryjnych oraz ze względu na fakt, że przeprowadzone badania wstępnych imperfekcji geometrycznych belek typu B nie wykazały przekroczenia dopuszczalnych tolerancji wymiarowych, w pracy nie przeprowadzono analiz numerycznych uwzględniających wstępne imperfekcje geometryczne.

Autorka pracy podkreśla, że przeprowadzone badania oparte były na autorskim pomysle dotyczącym lokalizacji taśmy w innych miejscach niż półka rozciągana i miały na celu potwierdzenie jego zasadności poprzez wykazanie wpływu umiejscowienia taśm CFRP na pracę stalowych belek typu sigma w warunkach laboratoryjnych. Uzyskane wyniki nie odnoszą się wprost do rzeczywistego wzmacniania istniejącej konstrukcji,

choćby przez fakt, że musiałaby być ona uprzednio całkowicie odciążona i pozbawiona współpracy z innymi elementami. Nie można też odnosić bezpośrednio opisywanych badań do wzmacniania płatwi dachowych, wykonywanych jako belki wieloprzęsłowe i obciążonych obciążeniem równomiernie rozłożonym. Nie umniejsza to jednak wartości poznawczych badań opisanych w pracy i stanowi motywację do prowadzenia dalszych prac naukowych dotyczących wzmacniania istniejących stalowych konstrukcji cienkościennych wykonanych z kształtowników profilowanych na zimno.

9.3. Kierunki dalszych badań

Podjęty w niniejszym opracowaniu temat nadal nie został wyczerpany. Autorka pracy planuje dalsze zgłębianie zagadnienia wzmacniania stalowych profilowanych na zimno elementów cienkościennych, co zamierza zrealizować poprzez:

- badania laboratoryjne dotyczące określenia efektywnej długości zakotwienia taśm CFRP do wzmacniania konstrukcji stalowych cienkościennych,
- badania laboratoryjne dotyczące efektywności wzmacniania zginanych belek cienkościennych o innych przekrojach,
- poszerzenie badań dotyczących zginanych belek typu sigma połączonych z poszyciem celem wierniejszego odwzorowania pracy płatwi dachowych,
- dokonanie pomiaru imperfekcji innych partii belek cienkościennych i wykonanie analiz numerycznych uwzględniających wpływ imperfekcji na pracę zginanych belek o przekroju monosymetrycznym,
- opracowanie modeli numerycznych uwzględniających proces odrywania w warstwie kleju.

Literatura

1. Ajdukiewicz C., Gajewski M., Mossakowski P. (2010): Zastosowanie systemu optycznej korelacji obrazu „Aramis” do identyfikacji rys w elementach betonowych. TRANSCOMP – XIV International Conference Computer Systems Aided Science, Industry and Transport. Zakopane.
2. Alexandrowicz M. (2005): Podstawowe informacje o systemach wzmacniania konstrukcji budowlanych i inżynierskich za pomocą materiałów kompozytowych Sika CarboDur System. Buduj z Głową. 3/2004. <http://www.bzg.pl/node/282>.
3. Ali-Ahmad M., Subramaniam K., Ghosn M. (2006): Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*. 132(9), pp. 914–923.
4. Amoush E.A., Ghanem M.A. (2018): Axially loaded capacity of alternatively strengthened cold-formed channel columns with CFRP. *Journal of Constructional Steel Research*. 140, pp. 139–152.
5. Anbarasu M. (2019): Simulation of flexural behaviour and design of cold-formed steel closed built-up beams composed of two sigma sections for local buckling. *Engineering Structures*. 191, pp. 549–562.
6. Ashvini, Subramanian S. (2015): Study on the performance of CFRP strengthened circular hollow steel sections. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 04(06), pp. 118–121.
7. Babcock C.D. (1974): Experiments in shell buckling [w:] Y.C. Fung, E.E. Sechler (eds), *Thin shell structures. Theory, experiment, and design*. New Jersey. pp. 345–369.
8. Bambach M.R., Elchalakani M. (2007): Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation. *Thin-Walled Structures*. 45(2), pp. 159–170.
9. Bambach M.R., Jama H.H., Elchalakani M. (2009): Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. *Thin-Walled Structures*. 47(10), pp. 1112–1121.
10. Bambach M.R. (2009): Photogrammetry measurements of buckling modes and interactions in channels with edge-stiffened flanges. *Thin-Walled Structures*. 47, pp. 485–504.
11. Bambach M.R. (2014): Strengthening of thin-walled (hollow) steel sections using fibre-reinforced polymer (FRP) composites [w:] V.M. Karbhari (ed.), *Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites*. Amsterdam, The Netherlands. pp. 140–168.
12. Barszcz A.M., Gizejowski M.A. (2007): An equivalent stiffness approach for modelling the behaviour of compression members according to Eurocode 3. *Journal of Constructional Steel Research*. 63(1), pp. 55–70.

13. Bastani A., Das S., Kenno S. (2019): Rehabilitation of thin walled steel beams using CFRP fabric. *Thin-Walled Structures*. 143. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106215>.
14. Becque J., Rasmussen K.J.R. (2009): Experimental investigation of local-overall interaction buckling of stainless steel lipped channel columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 65, pp. 1677–1684.
15. Błażejowski W., Gąsior P., Kaleta J., Mażulis J., Rybczyński R. (2011): Wzmocnienie konstrukcji stalowej materiałami kompozytowymi [w:] G. Wróbel (red.), *Polimery i kompozyty konstrukcyjne*. Cieszyn.
16. Bocciarelli M., Colombi P. (2013): On the elasto-plastic behavior of continuous steel beams reinforced by bonded CFRP lamina. *Engineering Structures*. 49, pp. 756–766.
17. Bródka J., Broniewicz M., Giżejowski M. (2006): *Kształtowniki gięte: poradnik projektanta*. Rzeszów.
18. Bródka J., Łubiński M. (1978): *Lekkie konstrukcje stalowe*. Warszawa.
19. Chataigner S., Benzarti K., Foret G. i in. (2018): Design and testing of an adhesively bonded CFRP strengthening system for steel structures. *Engineering Structures*. 177, pp. 556–565.
20. Chodraui G.M.B., Shifferaw Y., Malite M., Schafer B.W. (2007): On the stability of cold-formed steel angles under compression. *Rem Revista Escola de Minas*. 60(2), pp. 355–363.
21. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., Peters W.H. (1985): Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*. 25(3), pp. 232–244.
22. Colombi P., Fava G., Sonzogni L. (2014): Fatigue behavior of cracked steel beams reinforced by using CFRP materials. *Procedia Engineering*. 74, pp. 388–391.
23. Coppola A.P. (1965): Measurement of initial geometrical imperfections of cylindrical shells. *AIAA Journal*. 4(1), pp. 172–175. <https://doi.org/10.2514/3.3411>.
24. De Vries J. (2009): *The imperfection data bank and its applications* (PhD thesis). Delft University of Technology, Den Helder, The Netherlands.
25. Degenhardt R., Zimmermann R., Rohwer K., Hillger W. (2007): Experiments on buckling and postbuckling of thin-walled CFRP structures using advanced measurement systems. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 7(2), pp. 337–358. <https://doi.org/10.1142/S0219455407002253>.
26. Deng J., Lee M.M.K. (2007): Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate. *Composite Structures*. 78, pp. 232–242.

27. Dębski H., Kubiak T., Teter A. (2013): Buckling and postbuckling behaviour of thin-walled composite channel section column. *Composite Structures*. 100(2013), pp. 195–204.
28. Dębski H., Teter A., Kubiak T., Samborski S. (2016): Local buckling, post-buckling and collapse of thin-walled channel section composite columns subjected to quasi-static compression. *Composite Structures*. 136, pp. 593–601.
29. Dinis P.B., Camotim D. (2011): Post-buckling behaviour and strength of cold-formed steel lipped channel columns experiencing distortional/global interaction. *Computers and Structures*. 89, pp. 422–434.
30. Dinis P.B., Camotim D., Silvestre N. (2010): On the local and global buckling behaviour of angle, T-section and cruciform thin-walled members. *Thin-Walled Structures*. 48, pp. 786–797.
31. Djughash A.C.R., Kalyanaraman V. (1990): Experimental study on the lateral buckling behaviour of cold-formed beams. *Proceedings of the 10th International Specialty Conference on Cold-formed Steel Structures*. St. Louis, Missouri, USA.
32. Dubina D., Ungureanu V. (2002): Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members. *Thin-Walled Structures*. 40(3), pp. 239–262.
33. Dubina D., Ungureanu V., Szabo I. (2001): Codification of imperfections for advanced finite analysis of cold-formed steel members. *Proceedings of the 3rd ICTWS*. pp. 179–186.
34. Feng Y., Tong G., Zhang L. (2018): Distortional and lateral buckling of Z-purlins with sloping lips in flexure. *Journal of Structural Engineering*. 144(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000217](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000217).
35. Garstecki A., Kakol W., Rzeszut, K. (2002): Classification of local-sectional geometric imperfections of steel thin-walled cold-formed sigma members. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*. 1, pp. 87–96.
36. Ghafoori E., Motavalli M. (2011): Analytical calculation of stress intensity factor of cracked steel I-beams with experimental analysis and 3D digital image correlation measurements. *Engineering Fracture Mechanics*. 78, pp. 3226–3242.
37. Ghafoori E., Schumacher A., Motavalli M. (2012): Fatigue behavior of notched steel beams reinforced with bonded CFRP plates. *Engineering Structures*. 45, pp. 270–283.
38. Gontarz S., Mączak J., Szulim P. (2015): Online monitoring of steel constructions using passive methods [w:] P. Tse, J. Mathew, K. Wong, R. Lam, C. Ko (eds), *Engineering asset management – systems, professional practices and certification*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09507-3_54.

39. Gosowski B. (2004): Skręcanie i zginanie otwartych elementów konstrukcji metalowych. Wrocław.
40. Gosowski B. (2015): Zginanie i skręcanie cienkościennych elementów konstrukcji metalowych. Wrocław.
41. Gotluru B.P., Schafer B.W., Pekoz T. (2000): Torsion in thin-walled cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*. 37(2), pp. 127–145.
42. Grenda M., Paczos P. (2019): Experimental and numerical study of local stability of non-standard thin-walled channel beams. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 57(3), pp. 549–562.
43. Guru Agastheesh M., Senthil Selvan S. (2016): Behaviour of cold formed steel starred section subjected to axial and eccentric load condition. *Indian Journal of Science and Technology*. 9(23). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i23/95971>.
44. Han X., Hou S., Ying L., Hou W., Aliyev H. (2019): On the fracture behaviour of adhesively bonded CFRP hat-shaped thin-walled beam under axial crushing load: An experimental and modelling study. *Composite Structures*. 215, pp. 258–265.
45. Hancock G.J. (2003): Cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 59, pp. 473–487.
46. He J., Gao F., Wu S. i in. (2012): Measure dimension of rotating large hot steel shell using pulse laser on PRRR robot. *Measurement*. 45, pp. 1814–1823. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.04.001>.
47. Imran M., Mahendran M., Keerthan P. (2018): Experimental and numerical investigations of CFRP strengthened short SHS steel columns. *Engineering Structures*. 175, pp. 879–894.
48. Jiao H., Zhao X.-L. (2004): CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-Walled Structures*. 42, pp. 963–978.
49. Kalavagunta S., Naganathan S., Nasharuddin K., Mustapha K.N.B. (2013): Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections. *Thin-Walled Structures*. 72, pp. 14–19.
50. Kałuża M., Bartosik T. (2015): Wzmacnianie konstrukcji budowlanych materiałami kompozytowymi FRP. *Inżynier budownictwa*. 127, 04/2015. <https://inzynierbudownictwa.pl/wzmacnianie-konstrukcji-budowlanych-materialami-kompozytowymi-frp/>.
51. Kappus R. (1937): Drillknicken zentrisch gedruckter Stabe mit offenen Profil im elastischen Bereich. *Luftfahrt-Forschung*. Berlin.
52. von Karman T., Sechler E.E., Donnell L.H. (1932): Strength of thin plates in compression. *Transaction ASME*. 54, pp. 54–55.
53. Kecman D. (1979): Bending collapse of rectangular section tubes in relation to bus roll over problem (PhD thesis). Cranfield Institute of Technology, Cranfield, UK.

54. Koller R.E., Stoecklin I., Weisse B., Terrasi G.P. (2012): Strengthening of fatigue critical welds of a steel box girder. *Engineering Failure Analysis*. 25, pp. 329–345.
55. Kotelko M., Lim T.H., Rhodes J. (2000): Post-failure behaviour of box section beams under pure bending (an experimental study). *Thin-Walled Structures*. 38(2), pp. 179–194.
56. Kowal M. (2015): Wzmacnianie elementów stalowych kompozytami FRP. Lublin.
57. Kowalewski Z., Dietrich L., Kopeć M., Szymczak T., Grzywna P. (2016): Nowoczesne systemy optyczne w badaniach mechanicznych – budowa, działanie, zastosowania. XXII Seminarium Nieniszczące badania materiałów. Zakopane.
58. Kowalewski Z., Szymczak T. (2013): Podstawy tensometrii elektrooporowej oraz praktyczne jej zastosowania. XIX Seminarium Nieniszczące badania materiałów. Zakopane.
59. Kozłowski A. (2008): Imperfekcje oraz efekty II rzędu w projektowaniu ram stalowych według PN-EN 1993-1-1. *Problemy naukowo-Badawcze Budownictwa*, tom VI. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej. Białystok 2008.
60. Krawczyk Ł., Gołdyn M., Urban T. (2017): O niedokładnościach systemów cyfrowej korelacji obrazu. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*. JCEEA. t. XXXIV, 64 (3/I/17), s. 259–270.
61. Królak M., Kowal-Michalska K., Mania R.J., Świniarski J. (2007): Experimental tests of stability and load carrying capacity of compression thin-walled multi-cell columns of triangular cross-section. *Thin-Walled Structures*. 45(10–11), pp. 883–887.
62. Królak M., Młotkowski A. (1996): Experimental analysis of post-buckling and collapse behaviour of thin-walled box-section beam. *Thin-Walled Structures*. 26(4), pp. 287–314.
63. Kubiniec G. (2008): Nośność blachownic stalowych wzmacnianych z zastosowaniem klejenia. Praca doktorska. Biblioteka Cyfrowa Politechniki Krakowskiej. Kraków.
64. Kujawińska M., Malesa M., Malowany K., Błaszczak P.M. (2012): Application of image based methods for monitoring and measurements of structures in power stations. *Key Engineering Materials*. 518, pp. 24–36.
65. Kurzawa Z., Rzeszut K., Szumigała M. (2015): Stalowe konstrukcje prętowe Część III. Poznań.
66. Kwon Y.B., Kim B.S., Hancock G.J. (2009): Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction. *Journal of Constructional Steel Research*. 65(2), pp. 278–289.

67. Laím L., Rodrigues J.P.C., Craveiro H.D. (2015): Flexural behaviour of beams made of cold-formed steel sigma-shaped sections at ambient and fire conditions. *Thin-Walled Structures*. 87, pp. 53–65.
68. Laine M., Makelainen P. (1994): Study on the load-bearing capacity of cold-formed sigma purlins. 12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, Missouri, USA.
69. Linghoff D., Al-Emrani M., Kliger R. (2010): Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate – Part 1: laboratory tests. *Composites Part B: Engineering*. 41(7), pp. 509–515.
70. Linghoff D., Haghani R., Al-Emrani M. (2009): Carbon-fibre composites for strengthening steel structures. *Thin-Walled Structures*. 47, pp. 1048–1058.
71. Liu H., Xiao Z., Zhao H.-L., Al-Mahaidi R. (2009): Prediction of fatigue life for CFRP-strengthened steel plates. *Thin-Walled Structures*. 47, pp. 1069–1077.
72. Liu Q., Yang J., Li L.-Y. (2011): Pseudo-plastic moment resistance of continuous beams with cold-formed sigma sections at internal supports: An experimental study. *Engineering Structures*. 33, pp. 947–957.
73. Lyssakow P., Friedrich L., Krause M., Dafnis A., Schröder K.U. (2019): Contactless geometric and thickness imperfection measurement system for thin-walled structures. *Measurement*. 150. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107038>
74. Łagoda M., Kowal M. (2013): Wpływ kształtu zakończenia sklejiny na wytrzymałość złącza stal-kompozyt FRP. *Budownictwo i Architektura*. 12(2), s. 39–46.
75. Łagoda M., Kowal M. (2014): Wzmacnianie płaskich elementów stalowych materiałami kompozytowymi FRP. *Konstrukcje metalowe. Materiały konferencyjne*, Kielce–Suchedniów.
76. Łubiński M., Filipowicz A., Żółtowski W. (2006): *Konstrukcje metalowe. Część I. Podstawy projektowania*. Warszawa.
77. Machelski C., Wrzesiński M. (2015): Wzmacnianie elementów konstrukcji stalowych z wykorzystaniem taśm CFRP. *Materiały Budowlane*. 518, s. 51–54.
78. Magnucki K., Szyk W., Stasiewicz P. (2004): Stress state and elastic buckling of a thin-walled beam with monosymmetrical open cross-section. *Thin-Walled Structures*. 42(1), pp. 25–38.
79. Malesa M., Szczepanek D., Kujawińska M., Świercz A., Kołakowski P. (2010): Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique. *EPJ Web of Conferences*. 6 (2010). <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014>.
80. Malowany K., Magda K., Rutkiewicz J. i in. (2015): Measurements of geometry of a boiler drum by time-of-flight laser scanning. *Measurement*. 72, pp. 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.040>.

81. Malowany K., Piekarczyk A., Malesa M., Kujawińska M., Więch P. (2019): Application of 3D digital image correlation for development and validation of FEM model of self-supporting arch structures. *Applied Sciences*. 9. <https://doi.org/10.3390/app9071305>.
82. Mażulis J., Wrzesiński M., Bierońska K. (2011): Efekt wzmocnienia konstrukcji stalowych przy użyciu włókien węglowych. *Przetwórstwo Tworzyw*. 6, s. 475–478.
83. McDonald M., Heiyantuduwa M.A., Rhodes J. (2008): Recent developments in design of cold-formed steel members and structures. *Thin-Walled Structures*. 46, pp. 1047–1053.
84. Mendera Z.K. (1997): Współdziałanie imperfekcji w stalowych prętach ściskanych. *Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. Poznań–Krynica*, s. 65–72.
85. Mihaljević M., Markučić D., Runje B., Keran Z. (2019): Measurement uncertainty evaluation of ultrasonic wall thickness measurement. *Measurement*. 137, pp. 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.027>.
86. Miller T.C., Chajes M.J., Mertz D.R., Hastings J.N. (2001): Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. *Journal of Bridge Engineering (ASCE)*. 6(6), pp. 514–522.
87. Murzewski J. (1989): *Niezawodność konstrukcji inżynierskich*. Warszawa.
88. Nozaka K., Shield C.K., Hajjar J.F. (2005): Effective bond length of carbon-fiber-reinforced polymer strips bonded to fatigued steel bridge I-girders. *Journal of Bridge Engineering (ASCE)*. 10(2), pp. 195–205.
89. Obst M., Rodak M., Paczos P. (2016): Limit load of cold formed thin-walled nonstandard channel beams. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 54(4), pp. 1369–1377.
90. Oliwa R. (2015): Aramis application for measuring of three-dimensional local strain of composites. *Mechanik*. 12/2015, pp. 147–151.
91. Oswald M., Magnucki K. (2008): *Optymalne projektowanie belek cienkościennych walcowanych na zimno o przekrojach otwartych*. Poznań.
92. Paczos P. (2014): Experimental investigation of C-beams with non-standard flanges. *Journal of Constructional Steel Research*. 93, pp. 77–87.
93. Park J.-W., Yeom H.-L., Yoo J.-H. (2013): Axial loading tests and FEM analysis of slender square hollow section (SHS) stub columns strengthened with carbon fiber reinforced polymers. *International Journal of Steel Structures*. 13(4), pp. 731–743.
94. Pastor M.M., Roure F. (2008): Open cross-section beams under pure bending. I. Experimental investigations. *Thin-Walled Structures*. 46, pp. 476–483.
95. Paśko P. (2015): *Badania belek stalowych wzmocnionych taśmami CFRP. Konstrukcje betonowe i metalowe*. Bydgoszcz.

96. Pavlovčič L., Froschmeier B., Kuhlmann U., Beg D. (2012): Finite element simulation of slender thin-walled box columns by implementing real initial conditions. *Advances in Engineering Software*. 44(1), pp. 63–74.
97. Pellegrino C., Maiorana E., Modena C. (2009): FRP strengthening of steel and steel-concrete composite structures: an analytical approach. *Materials and Structures*. 42(3), pp. 353–363.
98. Pi Y.L., Put B.M., Trahair N.S. (1999): Lateral buckling strengths of cold-formed Z-section beam. *Thin-Walled Structures*. 34, pp. 65–93.
99. Piechnik, S. (2000): *Pręty cienkościenne – otwarte*. Kraków.
100. Pieńko M., Robak A. (2015): Stand for examination of deformation of horizontal elements loaded uniformly [in Polish: Stanowisko do badania odkształceń elementów poziomych obciążonych równomiernie]. *Zgłoszenie nr (21) 410025. Biuletyn Urzędu Patentowego*. 43(16), p. 34.
101. Popovic D., Hancock G.J., Rasmussen K.J.R. (1999): Axial compression tests of cold-formed angles. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 125(5), pp. 515–523.
102. Popovic D., Hancock G.J., Rasmussen K.J.R. (2001): Compression tests on cold-formed angles loaded parallel with a leg. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*. 127(6), pp. 600–607.
103. Radkowski S., Gontarz S., Mączak J. i in. (2011): Experimental comparative testing of steel structures by strain gauges, Digital Image Correlation and magnetic field methods. *Proceedings of the 8th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 2011*. Cardiff, UK, 20–22 June 2011. ASME.
104. Różyło P., Wrzesińska K. (2016): Analiza numeryczna i doświadczalna pracy ściskanych elementów cienkościennych z wydrążonymi otworami. *Przegląd Mechaniczny*. 1(7), s. 31–36. <https://doi.org/10.15199/148.2016.7.3>
105. Rutecki J. (1966): *Cienkościenne konstrukcje nośne. Obliczenia wytrzymałościowe*. Warszawa.
106. Rzeszut K. (2002): *Analiza oraz optymalne projektowanie cienkościennych konstrukcji metalowych z uwzględnieniem imperfekcji*. Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska.
107. Rzeszut K. (2015): *Stateczność cienkościennych konstrukcji metalowych z luzami i początkowymi imperfekcjami*. Poznań.
108. Rzeszut K., Garstecki A. (2005): Modelowanie początkowych imperfekcji geometrycznych w zagadnieniach stateczności konstrukcji cienkościennych. *LI Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB. Gdańsk–Krynica*. s. 97–104.
109. Rzeszut K., Garstecki A. (2009): Modelling of initial geometrical imperfections in stability analysis of thin-walled structures. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 47 (3), pp. 667–684.
110. Rzeszut K., Garstecki A., Kąkol W. (2004): Local-sectional imperfections in coupled instabilities problems of steel thin-walled cold formed Σ

- members. Proceedings of 4th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, pp. 21–30.
111. Rzeszut K., Szewczak I. (2016): Zastosowanie taśm z włókien węglowych do wzmacniania konstrukcji stalowych [w:] A. Mirela, J. Gęsikowska (red.), *Cywilizacja techniczna: społeczeństwo technologiczne XXI wieku*. Bydgoszcz. s. 120–140.
 112. Rzeszut K., Szewczak I. (2017): Experimental studies of sigma thin-walled beams strengthen by CFRP Tapes. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. 11(7), pp. 32–39.
 113. Rzeszut K., Szewczak I., Różyło P. (2017): Badania eksperymentalne i numeryczne belek cienkościennych typu sigma wzmacnianych taśmami CFRP. *Materiały Budowlane*. 11, s. 5–6.
 114. Rzeszut K., Szewczak I., Różyło P. (2019): Effective bond length of the CFRP tapes in strengthened sigma steel beams. *AIP Conference Proceedings*. 2060(1), pp. 1–10.
 115. Salem A.H., El Aghoury M., El Dib F.F., Hanna M.T. (2005): Post local buckling strength of bi-axially loaded slender I-section columns. *Thin-Walled Structures*. 43(7), pp. 1003–1019.
 116. Silvestre N., Camotim D., Young B. (2009): On the use of the EC3 and AISI specifications to estimate the ultimate load of CFRP-strengthened cold-formed steel lipped channel columns. *Thin-Walled Structures*. 47(10), pp. 1102–1111.
 117. Silvestre N., Young B., Camotim D. (2008): Non-linear behaviour and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns. 30(10), pp. 2613–2630.
 118. Singer J., Abramovich H. (1995): The development of shell imperfection measurement techniques. *Thin-Walled Structures*. 23(1–4), pp. 379–398. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(95\)94361-V](https://doi.org/10.1016/0263-8231(95)94361-V).
 119. Szafran J., Juszczak K., Kamiński M. (2018): Reinforcements of tower structures: effective and economic design engineering. *Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary Problems. Proceedings of XXIV LSCE Conference*. 2018, pp. 126–133.
 120. Szewczak I., Rzeszut K. (2016): Pilotażowe badania eksperymentalne cienkościennych belek stalowych typu sigma wzmocnionych taśmami CFRP. *Materiały Budowlane*. 11, s. 84–85.
 121. Szymczak C.K., Kujawa M. (2019): Buckling and initial post-local buckling behaviour of cold-formed channel member flange. *Thin-Walled Structures*. 137, pp. 177–184.
 122. Ślęczka L., Kozłowski A. (2007): Experimental and theoretical investigations of pallet racks connections. *Advanced Steel Constructions*. 3(2), pp. 607–627.

123. Täljsten B., Hansen C.S., Schmidt J.W. (2009): Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates. *Construction and Building Materials*. 23, pp. 1665–1677.
124. Tang H., Wang C., Wang R. (2016): Enhancing stability of thin-walled short steel channel using CFRP under eccentric compression. *International Journal of Polymer Science*. vol. 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2790385>.
125. Tawfik Q.H., Karunasena W.(K.) (2010): Use of CFRP for rehabilitation of steel structures: a review. Southern Region Engineering Conference. Toowoomba, Australia, 11–12 November 2010.
126. Timoshenko S.P., Gere J.M. (1963): *Teoria stateczności sprężystej*. Warszawa.
127. Tong L., Yu Q., Zhao X.-L. (2020): Experimental study on fatigue behavior of butt-welded thin-walled steel plates strengthened using CFRP sheets. *Thin-Walled Structures*. 147. <http://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106471>.
128. Tromblin J., Barbero E. (1994): Local buckling experiments on FRP columns. *Thin-Walled Structures*. 18(2), pp. 97–116.
129. Tsuji M., Meshii T. (2011): Extending image processing strain measurement system to evaluate fracture behavior of wall-thinned pipes. *Nuclear Engineering and Design*. 241(9), pp. 3605–3612.
130. Urbańska-Galewska E. (1994): Some remarks on the extension of civil engineering structures lifetime. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 59(1–3), pp. 211–216
131. Urbańska-Galewska E. (2002): Jakość wytwarzania i montażu konstrukcji stalowych w świetle norm europejskich. *Inżynieria i Budownictwo*. 2002(12), s. 21–23.
132. Urbańska-Galewska E. (2005): Tolerancje w budowlanych konstrukcjach stalowych łączonych na śruby. Gdańsk.
133. Urbańska-Galewska E. (2006): Wpływ odchyłek wykonania na nośność i sztywność połączenia doczołowego. Konferencja naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB 52. Gdańsk–Krynica. s. 175–182.
134. Urbańska-Galewska E. (2008): The influence of dimensional accuracy on steel structures cost calculation. *Design, Fabrication and Economy of Welded Structures*. 2008, pp. 151–156.
135. Urbańska-Galewska E., Deniziak P., Gordziej-Zagórowska M., Łukowicz A. (2016): Thin-walled cross section shape influence on steel member resistance. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 10(29), pp. 41–45.

136. Urbańska K. (2017): Zastosowanie systemu ARAMIS do pomiarów odkształceń konstrukcji murowych. *Zeszyty Naukowe. Inżynieria Środowiska*. Uniwersytet Zielonogórski. 166, s. 48–59.
137. Vishnuvardhan S., Samuel Knight G.M. (2008): Behaviour of cold-formed steel single and compound plain angles in compression. *Advanced Steel Construction*. 4(1), pp. 46–58.
138. Wagner H. (1929): Verdrehung und Knickung von offenen Profilen. *Festschrift 25 Jahre T.H. Danzing*.
139. Winter G. (1944): Strength of slender beams. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 109(1). <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005779>.
140. Własow W. (1940): Tonkostiennoje uprugije stierzni. Moskwa.
141. Yang J., Liu Q. (2012): Sleeve connections of cold-formed steel sigma purlins. *Engineering Structures*. 43, pp. 245–258.
142. Ye J., Meza F.J., Hajirasouliha I. i in. (2019): Experimental investigation of cross-sectional bending capacity of cold-formed steel channels subject to local-distortional buckling interaction. *Journal of Structural Engineering*. 145(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002344](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002344).
143. Young B. (2006): Design of fixed-ended cold-formed steel plain angle compression members. 17th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Orlando, Florida, USA, November 4–5, 2004.
144. Zhao C., Matsuda H., Lou S., Morita C., Koga A. (2013): Visualization of buckling on thin-walled cylindrical shell by digital image correlation method. *Applied Mathematics And Information Sciences*. 7(3), pp. 999–1004.
145. Zhao X.L., Al-Mahaidi R. (2009): Web buckling of lightsteel beams strengthened with CFRP subjected to end-bearing forces. *Thin-Walled Structures*. 47, pp. 1029–1036.
146. Zielecki W., Kubit A., Święch Ł. (2013): Analiza doświadczalna odkształcenia elementów klejonych w próbie statycznego oddzierania. *Pomiary Automatyka Robotyka*. Nr 2(2013), s. 71–78.

NORMY:

Eurocode 3 (2004): Design of steel structures. Part 1–3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Standard EN 1993-1-3.

PN-90/B-03200 (1993): Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.

PN-EN 10162:2005 (2005): Kształtowniki stalowe wykonane na zimno. Warunki techniczne dostawy. Tolerancje wymiarów i przekroju poprzecznego.

PN-EN 1090-2 (2011): Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.

PN-EN 1993-1-1 (2006): Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

PN-EN 1993-1-3 (2008): Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.

PN-EN ISO 6892-1 (2009): Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.