

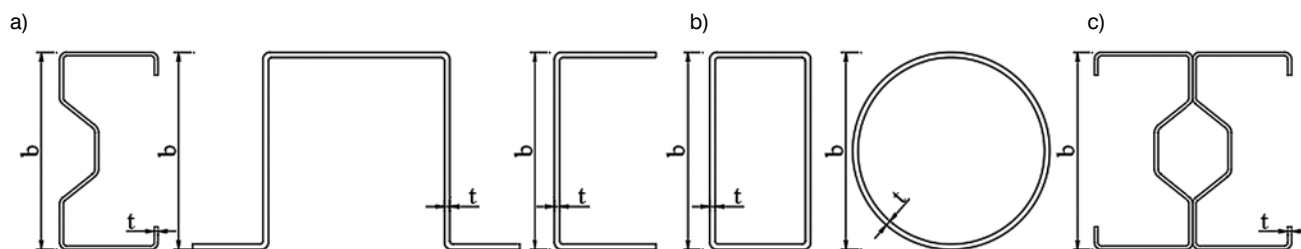
Zastosowanie taśm CFRP do wzmacniania stalowych elementów profilowanych na zimno

Dr inż. Ilona Szewczak, Politechnika Lubelska, dr hab. inż. Katarzyna Rzeszut, Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

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. 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. Należy jednak pamiętać, że szerokie ich zastosowanie konstrukcyjne może także generować ewentualną potrzebę ich wzmacniania, wynikającą na przykład z błędów projektowych lub wzrostu obciążeń zewnętrznych w stosunku do projektu. Niestety konstrukcje wykonane ze stalowych elementów cienkościennych charakteryzuje ograniczona możliwość ich wzmacniania. Ze względu na bardzo cienkie ścianki przekroju poprzecznego, których grubość zawiera się w przedziale od 1 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 konieczne staje się poszukiwanie skutecznej i łatwej metody wzmacniania tego typu belek. Jedną z nich może być 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, zapewniając szybkie oraz efektywne jej wzmacnienie, praktycznie bez ograniczenia ciągłości eksploatacji. W literaturze dotyczącej wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych przy użyciu materiałów CFRP można znaleźć bardzo ograniczoną liczbę publikacji, wśród których zdecydowana większość dotyczy badań elementów ściskanych. Na przykład w pracy [1] opisano badanie cienkościennych stalowych elementów o przekroju kwadratowym, wzmacnionych na zewnątrz CFRP. Eksperyment przeprowadzono przy quasi-statycznym ściskaniu osiowym,

w celu określenia wpływu zastosowanego wzmacnienia na wzrost nośności na ściskanie, oraz pod wpływem uderzenia osiowego. Prace koncentrowano na badaniu wpływu wzmacnienia w odniesieniu do dynamicznego osiowego zgniatania i powiązanych wskaźników odporności na zderzenie (przed dynamicznym osiowym zgniataniem). Autorzy pracy [2] badali zachowanie stalowych słupków cienkościennych o przekroju kwadratowym ściskanych osiowo, wzmacnionych za pomocą CFRP. Łącznie badaniu poddali osiem próbek i na podstawie uzyskanych wyników stwierdzili, że zastosowanie wzmacnienia 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 wzmacnionych słupów. Nad badaniami ściskanych osiowo stalowych cienkościennych słupów o przekroju kwadratowym pracowali także autorzy pozycji [3]. Zastosowali oni wzmacnienie z przyklejonych mat CFRP wokół całego przekroju i wykazali, że wzmacnione próbki były w stanie przenieść 2,6 razy większą wartość siły ściskającej do momentu pojawienia się pierwszych lokalnych postaci wyboczenia względem próbek nie wzmacnionych. W celu wykonania szerszych analiz opracowali także model numeryczny w programie Abaqus. W pracy [4] opisano zachowanie ściskanych osiowo zimnogiętych kształtowników o przekroju kwadratowym wzmacnionych 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. Informacje zawarte w pracy stanowią rozszerzenie analogicznych badań opisanych przez autorów [5]. Autorzy opracowali metodę projektową do określenia nośności na ściskanie osiowe elementów wzmacnionych CFRP obwodowo, której wyniki wykazały zgodność z 45 próbkami poddanymi badaniom laboratoryjnym. Jak podkreśla autor pozycji [6], w przypadku ściskania osiowego motywacją do wzmacniania cienkościennych konstrukcji stalowych za pomocą CFRP jest umożliwienie kontroli deformacji wyboczeniowych oraz zapewnienie zwiększonej nośności na ściskanie. W pracy [7] autorzy przedstawili badanie dziewiętnastu



Rys. 1. Przykłady prętów cienkościennych o przekrojach: a) otwartych, b) zamkniętych, c) otwarto-zamkniętych

próbek wykonanych z cienkościennego ceownika poddanych ścisłaniu. 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. Ci sami autorzy rok później [8] zaproponowali rozszerzenie wytycznych projektowych zawartych w Eurokod 3 i AISI-DSM o wskazówki dotyczące projektowania ściskanych elementów cienkościennych o przekroju ceowym wzmocnionych CFRP. Jak już wcześniej stwierdzono, zdecydowana większość z przytoczonych prac dotyczy badań elementów poddanych ścisłaniu. Natomiast w przypadku zginanych belek cienkościennych ich liczba jest bardzo niewielka. Fakt ten stał się główną motywacją do podjęcia badań przedstawionych w niniejszej pracy.

2. Charakterystyka stosowanych materiałów

2.1. Informacje dotyczące stalowych konstrukcji cienkościennych

Pręty cienkościennie 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, zarówno walcowane na gorąco, spawane, nitowane, jak i profilowane na zimno. Nieco precyzyjniej opisuje pręt cienkościenny 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, wskazano w pracach [9, 10, 11]. Zgodnie z nimi do prętów cienkościennych można zaliczyć te pręty, które spełniają zależność:

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

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 cienkościennie dzieli się ze względu na geometrię przekroju na: otwarte, zamknięte i otwarto-zamknięte (rys. 1).

Bogactwo dostępnych kształtów przekrojów cienkościennych stwarza projektantom konstrukcji stalowych nie tylko szerokie możliwości doboru elementów, ale równocześnie, jak zauważa autor [13], 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.

2.2. Podstawowe informacje dotyczące materiałów kompozytowych

Materiały kompozytowe FRP to materiały, których bazą są wysokowytrzymałe włókna niemetaliczne, zatopione w macierzy epoksydowej [14]. 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 AFPR (*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

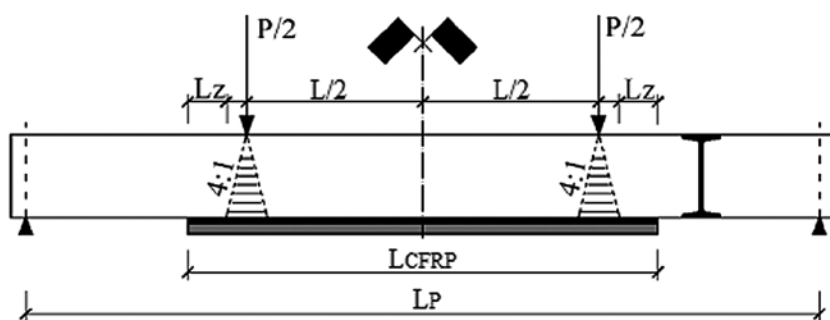
budowlanych, co wynika z bardzo dobrych parametrów wytrzymałościowych włókien węglowych w porównaniu z pozostałymi materiałami. Producenci materiałów kompozytowych deklarują bardzo szeroki zakres możliwości zastosowania taśm CFRP [15]. Można je stosować wszędzie tam, gdzie wymagane jest wzmocnienie istniejącej konstrukcji ze względu 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 rozwarłośc 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 [16]. Na podstawie badań prowadzonych przez producentów taśm CFRP [15] 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, dużą 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 niemal 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 wzmocnienia 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 [17]. Cechują się one małą wytrzymałością na ściskanie, stanowiącą około 10% wytrzymałości na rozciąganie i jeszcze mniejszą na ścinanie międzywarstwowe (ang. *debonding*) [18]. 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 [14]. 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.

3. Technologia wzmocnienia stalowych konstrukcji profilowanych na zimno

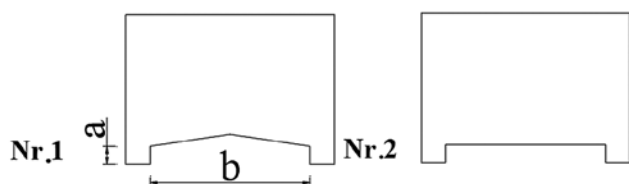
Przystępując do wzmocnienia konstrukcji stalowych przy użyciu taśm CFRP, trzeba wiedzieć, że jednym z bardzo ważnych zagadnień jest prawidłowe dobranie długości taśmy. W dostępnych raportach naukowych pojawiają się prace mówiące o prawidłowym doborze długości zakotwienia taśm CFRP (Lz) w przypadku wzmocnienia elementów stalowych walcowanych na gorąco [19] lub dźwigarów mostowych [20], 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 autorzy [21] określili efektywną długość zakotwienia taśm CFRP (Lz) równą 75 mm. Autorzy [20] 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 tą określili jako około 203 mm. W pracy [22] stwierdzono, że 98% wartości przenoszonych



Rys. 2. Schemat definiujący określenie długości zakotwienia taśm CFRP [23]

sił odbywa się w odległości 100 mm od końca taśmy CFRP. Natomiast w [23] autor analizował trzy długości zakotwienia taśmy CFRP – 65, 165 i 265 mm. Potwierdził on, że prawie wszystkie siły przenoszone z belki stalowej na taśmę CFRP występują w odległości około 70 mm od jej końca, a tylko w przypadku długości zakotwienia równej 265 mm zaobserwował uplastycznienie stali przed odspojeniem taśmy CFRP. Ta długość zakotwienia dała najlepszą wytrzymałość układu wzmocnienia. W przypadku określenia długości zakotwienia taśmy CFRP służącej do wzmocnienia elementu cienkościennego, w pracy [24] przy wzmocnieniu belek o przekroju teowym zastosowano długość zakotwienia równą 31 cm, jednak nie była ona poparta żadnymi analizami. Autorzy pracy [25] 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. 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 pracy przyjęto efektywną długość zgodnie ze schematem [23] przedstawionym na rysunku 2, gdzie L_p oznacza rozstaw podpór, L_{CFRP} długość taśmy CFRP, a L_z efektywną długość zakotwienia taśmy CFRP.

Kolejnym, bardzo ważnym elementem jest uzyskanie pożądanej grubości warstwy kleju na całej powierzchni taśmy CFRP. W celu osiągnięcia stałej grubości kleju, autorzy niniejszej pracy zalecają zastosowanie szablonów z blachy stalowej, w których wykonano wycięcie o szerokości równej szerokości taśmy stalowej lub CFRP (szerokość b) i wysokości



Rys. 3. Szablony z blachy stalowej służące do osiągnięcia stałej grubości kleju

równej grubości taśmy powiększonej o wartość pożądanej grubości kleju (grubość a).

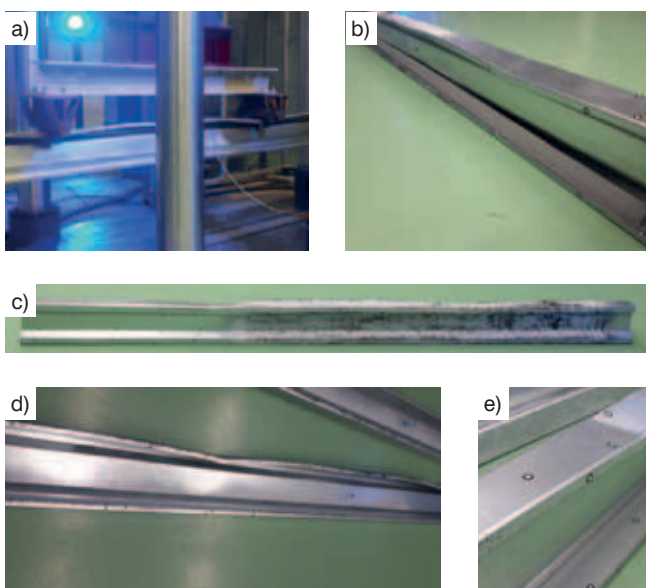
W pierwszym etapie należy nałożyć na taśmę klej o nieco grubszej warstwie. Następnie przy użyciu szablonu nr 1 należy usunąć nadmiar kleju, ale pozostawić naddatek kleju niezbędny do prawidłowego docisnięcia taśmy do powierzchni belki. Następnie należy ułożyć taśmę na odpowiedniej ściance belki i docisnąć ją poprzez przesunięcie po niej szablonu nr 2. W następ-

stwie tego procesu nadmiar kleju zostaje usunięty i zebrany z brzegów taśmy. Po oczyszczeniu powierzchni belki w obrębie taśmy z pozostałości kleju jeszcze raz należy skontrolować grubość kleju na całej długości taśmy. Wysokość taśmy wraz z warstwą kleju odpowiada wysokości wycięcia (grubość a) na szablonie nr 2.

Innym niezwykle ważnym zagadnieniem jest umiejscowienie taśmy CFRP na wysokości przekroju belki. W dotychczasowej praktyce inżynierskiej najczęściej zaleca się wykonanie wzmocnienia poprzez przyklejenie taśm CFRP do spodu dolnej półki profilu, tj. półki rozciąganej. Najprawdopodobniej zalecenie to formułowane jest na podstawie doświadczeń zdobytych przy wzmocnianiu konstrukcji betonowych. Wiąże się to z faktem, że jak to już wcześniej wspomniano, zasady stosowania taśm CFRP do wzmocniania 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. W odpowiedzi na to pytanie autorzy niniejszej pracy zaproponowali wzmocnienie taśmami CFRP umieszczonymi także na środku i półce górnej, ściskanej [26].

4. Formy zniszczenia

Analiza form zniszczenia została dokonana na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych dla jedenastu stalowych belek cienkościennych o przekroju typu sigma wysokości 200 mm, szerokości półki 70 mm i grubości ścianki 2 mm. Jako wzmocnienie zastosowano taśmy z włókna węglowego Sika CarboDur S o grubości 1,2 mm i szerokości 50 mm, 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 klejonego. Zastosowana grubość kleju wynosiła 1,3 mm i została dobrana



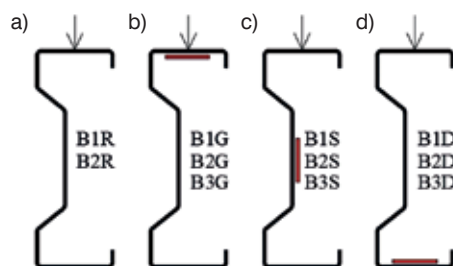
Rys. 4. Fotografije zdeformowanych próbek: a) podczas obciążenia na stanowisku badawczym, b, c, d, e) wygląd belek po wyjęciu z prasy [26]

na podstawie badań przedstawionych w pracy [23]. Długość taśmy CFRP wynosiła 175 cm. Wszystkie belki poddano badaniu w schemacie czteropunktowego zginania. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego przedstawia rysunek 4a, a dokładny opis stanowiska zawarto w pracy [26]. Podczas badania wszystkie belki deformowały się w sposób przedstawiony na zamieszczonych zdjęciach (rys. 4) [26]. 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. W trakcie badania po osiągnięciu obciążenia około 26 kN w większości belek zaobserwowano odspojenie taśm na granicy stal – klej. Ze względu na fakt, że pierwsze odspojenie taśmy CFRP nastąpiło przy obciążeniu 25,4 kN, a prawidłowy odczyt z wszystkich tensometrów elektrooporowych występował do obciążenia 25 kN, uznano za siłę niszczącą siłę o wartości 25 kN i przy takim poziomie obciążenia analizowano w dalszej części pracy wpływ umiejscowienia taśmy CFRP na ograniczenie przemieszczeń i odkształceń badanych belek.

5. Wpływ umiejscowienia taśm CFRP

Wpływ umiejscowienia taśm CFRP analizowano na podstawie badań laboratoryjnych belek wykonanych z przekroju profilowanego na zimno typu sigma dla konfiguracji jak na rysunku 5.

W trakcie badań mierzono odkształcenia belek, przy użyciu tensometrów elektrooporowych, umieszczonych w środku rozpiętości belki, oraz przemieszczenia w kilku punktach



Rys. 5. Rozmieszczenie taśm CFRP: a) belki bez wzmocnienia – referencyjne (R), b) belki wzmocnione górną (G), c) belki wzmocnione na środku (S), d) belki wzmocnione dołem (D)

w środku rozpiętości belki. Przemieszczenia mierzono w kierunku pionowym i poziomym z wykorzystaniem systemu Aramis. Szczegółowy opis przebiegu badań opisano w pracy [26], a sposób przygotowania próbek do badań i prowadzenia pomiarów w pracy [27]. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych dotyczące ograniczenia lub przyrostu przemieszczeń przy obciążeniu 25 kN przedstawiono w tabeli 1 obliczonego wg zależności:

$$\rho_{ui} = \left(\frac{u_i}{u_{ref}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

gdzie:

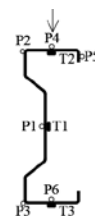
ρ_{ui} – ograniczenie lub przyrost przemieszczeń danej próbki wyrażony w procentach,

u_i – przemieszczenie danej belki,

u_{ref} – przemieszczenie belki referencyjnej.

Tabela 1. Ograniczenie przemieszczeń badanych belek przy obciążeniu 25 kN

Nazwa belki	Ograniczenie przemieszczenia w kierunku pionowym względem belki B1R [%]			Ograniczenie przemieszczenia w kierunku poziomym względem belki B1R [%]	
	P1	P1	P1	P1	P2
B1R	x	x	x	x	x
B1G	-4	-4	-4	-30	-50
B3G	-6	-6	-6	-12	-40
B1S	-3	-3	-3	9	-18
B3S	-2	-2	-2	7	-21
B1D	x	x	x	x	-8
B2D	-15	-15	-15	62	x
B3D	-11	-11	-11	4	1



Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że umieszczenie taśmy CFRP w półce górnej przekroju pozwala ograniczyć przemieszczenia poziome górnej części belki w punkcie P2 średnio o 45%, a w skrajnym przypadku (belka B1G) uzyskano ograniczenie przemieszczenia poziomego

o połowę. Chcąc ograniczyć przemieszczenia pionowe, należy wzmacniać rozciąganą półkę dolną. W przeprowadzonych badaniach pozwoliło to na ograniczenie przemieszczenia pionowego środka (punkt P1) 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%. Zastosowanie wzmocnienia w środku belki powoduje najmniejsze ograniczenie przemieszczeń pionowych.

6. Podsumowanie

Podsumowując, w niniejszej pracy wykazano korzystny wpływ zastosowania taśm CFRP na ograniczenie przemieszczeń zginanych cienkościennych belek stalowych o przekroju typu sigma. Przeprowadzone badania potwierdziły, że umiejscowienie wzmocnienia z taśm CFRP na wysokości przekroju cienkościennego znacznie wpływa na pole 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 wzmocnienia 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. Jeśli celem wzmocnienia jest ograniczenie przemieszczeń pionowych, taśmy CFRP należy umieszczać na półce rozciąganej.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bambach M. R., 6-Strengthening of thin-walled (hollow) steel sections using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites, 2014, str. 140–168
- [2] Park J.-W., Yeom H.-L., Yoo J.-H., 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)2013, str. 731–743
- [3] Imran M., Mahendran M., Keerthan P., Experimental and numerical investigations of CFRP strengthened short SHS steel columns, Engineering Structures 175/2018, str. 879–894
- [4] Bambach M. R., Jama H. H., Elchalakani M., Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. Thin Walled Structures 47(10)2007, str. 1112–1121
- [5] Bambach M. R., Elchalakani M., Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation, Thin-Walled Structures 45(2)2007, str. 159–170
- [6] Bambach M. R., 6-Strengthening of thin-walled (hollow) steel sections using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites, 2014, str. 140–168
- [7] Silvestre N., Young B., Camotim D., Non-linear behavior and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns, 2008
- [8] Silvestre N., Camotim D., Young B., 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)2009, str. 1102–1111
- [9] Gosowski B., Skręcanie i zginanie otwartych elementów konstrukcji metalowych, 2004
- [10] Piechnik S., Pręty cienkościenne – otwarte, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2000
- [11] Gosowski B., Zginanie i skręcanie cienkościennych elementów konstrukcji metalowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015
- [12] Kurzawa Z., Rzeszut K., Szumigała M., Stalowe konstrukcje prętowe. Część III, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2015
- [13] Oswald M., Magnucki K., Optymalne projektowanie belek cienkościennych walcowanych na zimno o przekrojach otwartych, Agencja Reklamowa Comprint, Poznań, 2008
- [14] Kałuża M., Bartosik T., Wzmacnianie konstrukcji budowlanych materiałami kompozytowymi FRP, Inżynier budownictwa 127, 04/2015
- [15] Aleksandrowicz M., Podstawowe informacje o systemach wzmacniania konstrukcji budowlanych i inżynierskich za pomocą materiałów kompozytowych Sika CarboDur System, BzG 3. <http://www.bzg.pl/node/282>. 2005.
- [16] Tawfik Q. H., Karunasena W. K., Use of CFRP for Rehabilitation of Steel Structures: a Review, Southern Region Engineering Conference, Toowoomba, Australia, 11–12 listopad 2010
- [17] Linghoff D., Haghani R., Al-Emrani M., Carbon-fibre composites for strengthening steel structures, Thin-Walled Structures 47/2009, str. 1048–1058
- [18] Mażulis J., Wrzesiński M., Bierońska K., Efekt wzmocnienia konstrukcji stalowych przy użyciu włókien węglowych, Przetwórstwo Tworzyw 6/2011, str. 475–478
- [19] Deng J., Lee M. M. K., Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate, Composite Structures 78/2007, str. 232–242
- [20] Nozaka K., Shield C. K., Hajjar J. F., Effective bond length of carbon-fiber-reinforced polymer strips bonded to fatigued steel bridge I-girders, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 10(2)2005, str. 195–205
- [21] Jiao H., Zhao X.-L., CFRP strengthened butt-welded very high strength (vhs) circular steel tubes, Thin-Walled Structures 42/2004, str. 963–978
- [22] Miller T. C., Chajes M. J., Mertz D. R., Hastings J. N., Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates, ASCE Journal of Bridge Engineering 6(6)2001, str. 514–522
- [23] Kowal M., Wzmacnianie elementów stalowych kompozytami FRP, Politechnika Lubelska, Lublin, 2015, <http://bc.pollub.pl/dlibra/docmetadata?id=12764>
- [24] Bastani A., Das S., Kenno S., Rehabilitation of thin walled steel beams using CFRP fabric, Thin-Walled Structures 143/2019, str. 106–215
- [25] Rzeszut K., Szewczak I., Różyło P., Effective bond length of the CFRP tapes in strengthened sigma steel beams, AIP Conference Proceedings 2060(1)2019, str. 1–10
- [26] Szewczak I., Rzeszut K., Różyło P., Samborski S., Laboratory and Numerical Analysis of Steel Cold-Formed Sigma Beams Retrofitted by Bonded CFRP Tapes, Materials. 13. 4339. 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13194339>
- [27] Szewczak I., Rzeszut K., Modern measurement methods in strength tests of sigma thin-walled steel beams, E3S Web of Conferences 49/2018, str. 1–10

wyKOMBinuj mOst 2020



www.wilis.pg.edu.pl/kombo

