

Wzmacnianie płaskich, zginanych elementów stalowych materiałami kompozytowymi FRP

Marek Łagoda¹, Maciej Kowal²

¹ *Instytut Badawczy Dróg i Mostów, e-mail: mlagoda@ibdim.edu.pl,*

² *Katedra Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: m.kowal@pollub.pl*

Streszczenie: Artykuł opisuje badania wpływu wzmocnienia płaskich, zginanych elementów stalowych materiałami kompozytowymi CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer). Badano wpływ zmian geometrii końca złącza na wytrzymałość trzypunktowo zginanych płaskowników stalowych, wzmocnionych jednostronnymi nakładkami z taśm węglowych. Zniszczenie skleiny na granicy stal-klej było dominujące wśród postaci zniszczenia dla przyklejonych do stali taśm CFRP. Przedstawiono wyniki badań, które pokazały, że zastosowanie wzmocnienia CFRP płaskiego elementu stalowego może mieć wpływ na zmniejszenie ugięć. Zastosowanie odwrotnie ściętej taśmy z wypływem kleju może wyraźnie podnieść nośność złącza przy zginaniu płaskiego elementu stalowego wzmocnionego taśmą CFRP. Opisano wnioski i przedstawiono plan dalszych prac nad wzmacnianiem elementów stalowych taśmami CFRP.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, wzmacnianie, stal, kompozyty FRP, kształtowanie złącza, nośność złącza, ugięcie

1. Wprowadzenie

Głównym motywem przywracania starym, metalowym konstrukcjom gwarancji dalszej funkcjonalności są przesłanki kulturowe, oparte na potrzebie zachowania nie tylko ich historycznych walorów, ale też zachowania wartości krajobrazu miejsc, w których te obiekty się znajdują. Bardzo ważne jest wówczas, aby wzmacnianie zachowywało wygląd zgodny z pierwotnym projektem. Rodzaj i sposób wzmocnienia musi odpowiadać cechom materiału wzmacnianego mostu. Łane żelazo często jest zawodnym materiałem z powodu jego łamliwości i pęknięcia również przy zmianie temperatury w warunkach wysokich naprężeń rozciągających. Wrażliwość na kruche pęknięcie również zachodzi w stalach zgrzewnych i zlewnych, zwłaszcza w sytuacjach, gdy przekroje poprzeczne są zaatakowane korozją.

Alternatywą dla konwencjonalnych metod wzmacniania konstrukcji metalowych jest użycie przyklejanych materiałów kompozytowych FRP. Celem wzmacniania konstrukcji metalowych materiałami FRP jest w szczególności zwiększenie albo przywrócenie nośności na rozciąganie lub nośności na zginanie, podniesienie wytrzymałości zmęczeniowej oraz zwiększenie lub przywrócenie stateczności płaskich elementów ściskanych.

Użycie takich materiałów we wzmacnianiu konstrukcji metalowych nie jest rozwijane tak obszernie jak w przypadku wzmacniania konstrukcji betonowych lub murowanych. Studia skupiały się na możliwości wzmacniania konstrukcji nitowanych lub uszkodzonych w celu ograniczenia propagowania pęknięć zmęczeniowych [1,2], podniesienia żywotności zmęczeniowej na rozciąganie [3] i zginanie [4,5], wzmacniania stalowych elementów

rozciąganych [6], rozciąganych stref elementów zginanych [7,8], podnoszenia nośności na wyboczenie elementów stalowych [9,10], podnoszenia nośności na ściskanie elementów rurowych [11,12], spełnienia nowych warunków eksploatacji dzięki wzrostowi wartości obciążeń lub usunięcia skutków korozji.

Nieznaczną, w odniesieniu do ilości aplikacji materiałów kompozytowych do wzmacniania konstrukcji żelbetowych, jest również ilość zastosowania tychże materiałów przy wzmacnianiu konstrukcji stalowych czy zespolonych stal-beton. Należy jednak mieć świadomość o istnieniu takich zastosowań w Polsce [13] i na świecie [14,15].

W niniejszej pracy sprawdzono, jaki wpływ miało zróżnicowanie geometrii zakończenia skleiny na podniesienie nośności złącza na zginanie płaskich elementów stalowych. Zbadano również, czy zastosowanie wzmocnienia elementu stalowego taśmą CFRP ma wpływ na zwiększenie sztywności elementu i w konsekwencji ograniczenie ugięć. Istniejące prace opisujące wpływ kształtowania geometrii zakończenia złącza na nośność złącza klejowego dotyczyły głównie elementów rozciąganych osiowo [16,17,18].

2. Badania laboratoryjne

2.1. Materiały

Do badań wykorzystano płaskowniki stalowe 1000 x 100 x 12 mm ze stali klasy S235JR+AR, o module Younga 210 GPa, granicy plastyczności 308 MPa, wytrzymałości na rozciąganie 432 MPa i odkształceniu przy uplastycznieniu wynoszącym 0,2%.

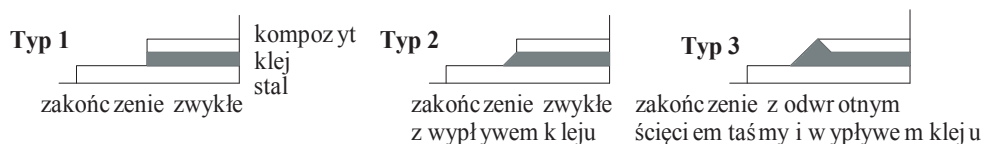
Do badań wykorzystano kompozytowe taśmy na bazie żywicy epoksydowych z włóknami węglowymi S&P CFK-Lamellen 200/2000. Szerokość taśm wynosiła 60 mm, a ich grubość 1,4 mm. Zgodnie z danymi producenta taśm, moduł Younga wynosi >210 GPa, wytrzymałość na rozciąganie 2500 MPa, a odkształcenie przy zerwaniu 1,25%.

Do klejenia próbek użyto systemowego kleju S&P Resin 220, dwuskładnikowego, bezrozpuszczalnikowego na bazie żywicy epoksydowej. Pomierzone grubości kleju wynosiły $0,65 \div 0,89$ mm (średnio 0,74 mm), $0,67 \div 0,82$ mm (średnio 0,77 mm) oraz $0,63 \div 0,76$ mm (średnio 0,72 mm) odpowiednio w przypadku próbek Typu 1, 2 oraz 3.

2.2. Przygotowanie próbek

Przygotowano 19 próbek i poddano trzypunktowemu zginaniu, w tym wykonano jedną próbkę porównawczą płaskownika stalowego (1000 x 100 x 12 mm) oraz 18 próbek z trzema typami wzmocnienia, na które wpływ miała geometria zakończenia taśmy wzmacniającej i kleju. Każda wzmacniania próbka składała się z płaskownika stalowego (1000 x 100 x 12 mm) wzmocnionego za pomocą przyklejonej do dolnej płaszczyzny na żywicy epoksydową taśmy węglowej (600 x 60 x 1,4 mm) z dwoma typami ukształtowania geometrii końca taśmy i dwoma typami kształtowania kleju na jej końcu. Rozpiętość teoretyczna zginanych wzmocnionych płaskowników wynosiła 900 mm. Wykonano 3 typy próbek, po sześć każdego typu. Rys. 1 pokazuje schematy ukształtowania zakończeń kleju i taśmy.

Przygotowanie nośnego podłoża stanowi jeden z warunków właściwego wykonania wzmocnienia przy użyciu przyklejanych taśm. Złe przygotowanie powierzchni może znacząco wpłynąć na obniżenie nośności skleiny, co może wypaczyć pozytywny wpływ materiałami kompozytowymi FRP [18]. Niedopuszczalne jest przy aplikacji taśm zawilgocenie powierzchni, a materiały obce w rodzaju kurzu, olejów i tłuszczów muszą zostać usunięte.



Rys. 1. Schematy kształtów zakończenia spoiny

Przed aplikacją taśm, powierzchnie stalowe były oczyszczane z zastosowaniem acetonu, następnie przecierane papierem ściernym i ponownie przeczyszczane acetonem. Powierzchnie sklepane taśm kompozytowych oczyszczone zostały acetonem. Na oczyszczone i osuszone powierzchnie taśm CFRP nanoszono klej i następnie doklejano na podłoże stalowe.

Wprowadza się następujące nazewnictwo typów próbek: z zakończeniem zwykłym (Typ 1 - zwykły), z zakończeniem zwykłym z wpływem kleju (Typ 2 – zwykły z wpływem) oraz z zakończeniem z odwrotnym fazowaniem taśmy i wpływem kleju (Typ 3 – odwrotnie fazowany z wpływem), zgodnie z Rys. 1.

Do dwóch próbek z każdego typu przyklejone zostały tensometry elektrooporowe, w celu zbadania odkształceń taśm i płaskowników w konkretnych lokalizacjach. Jedną z próbek każdego typu była oklejona symetrycznie względem środka rozpiętości siedemnastoma tensometrami a druga tylko dziesięcioma umiejscowionymi z jednej strony. Te próbki były przygotowywane dodatkowo pod badania rozkładu odkształceń w skleinie przy pomocy skanera odkształceń.

Temperatura przygotowania i przechowywania próbek wynosiła 22°C. Czas od wykonania próbek do poddania badaniom wyniósł 100-170 dni.

3. Sprzęt badawczy i cel badań

Użyto uniwersalnej maszyny badawczej (Zwick&Roel). Badania przeprowadzono kontrolując przyrost siły przy stałym wzroście 100N/s, aż do zniszczenia złącza. Siłę i przemieszczenie tłoka rejestrowano co 0,01s. Wzrost obciążenia następował w cyklach, których wartości zwiększały się co 500 N, wracając do siły 500 N, po osiągnięciu maksimum cyklu (0 N – 500 N – 1000 N – 500 N – 1500 N – 500 N – 2000 N – 500 N – ... – 500 N – 5000 N).

Głównym celem badań było zweryfikowanie wyników badań opisanych przez autorów w poprzedniej pracy [18] i określenie wpływu ukształtowania geometrii kleju i wzmacniającej taśmy kompozytowej CFRP na jej koniec na nośność złącza podczas trój punktowego zginania płaskowników. Drugim celem badań było sprawdzenie wpływu wzmocnienia taśmą CFRP płaskiego, zginanego elementu stalowego. Trzecim celem było określenie rozkładu naprężeń na długości taśmy kompozytowej i płaskownika stalowego na podstawie pomierzonych odkształceń. Czwartym celem było określenie rozkładu odkształceń w kleju w obszarze końca skleiny w zależności o typu zakończenia wzmocnienia poprzez pomiary skanerem odkształceń Aramis®. Trzeci i czwarty cel nie były przedmiotem niniejszej pracy i nie zostały w niej opisane.

4. Wyniki badań i ich omówienie

4.1. Wyniki

W czasie opracowania wyników wszystkich 18 wzmocnionych próbek zauważono, że w zależności od typu próbki zmieniały się średnie poziomy zniszczenia wzmocnienia. Najbardziej wypadły wyniki wzmocnienia Typ 1, a najlepiej Typ 3, zgodnie z przewidywaniami, opartymi na wynikach badań uzyskanych w poprzedniej pracy badawczej opisanej przez autorów w [18].

Przy opracowaniu wyników zauważono w przypadku czterech próbek, że rozbieżności wyników w populacjach danego typu, zarówno na minus i plus, osłabiają pozytywny efekt wzmocnienia. W przypadku Typu 1, wynik jednej z próbek wyniósł 13% poniżej średniej a drugi 105 % powyżej. W przypadku Typu 2 jeden z wyników był 15 % poniżej, a w przypadku drugiej z próbek, nie oderwała się taśma wzmacniająca, nawet po przekroczeniu granicy plastyczności w stali. W przypadku Typu 3 jedna próbka uzyskała wynik o 15 % niższy od średniej. Podczas opracowywania wyników badań, rozważono dwa warianty. W pierwszym wariantie rozpatrzono średnie wyniki z wytrzymałości wszystkich próbek w danej populacji $F_{\text{sr.m}}$ oraz odchylenia procentowe od średniej wyników w każdej populacji, w tym przypadku próbki, które osiągnęły wyniki znacznie wyższe od średniej (w przypadku Typu 1 i 2) sprowadzono do wartości siły niszczącej drugiej w populacji. W drugim wariantie zredukowano zakres rozpoznania do wyników różniących się od średniej o nie więcej niż 10%.

W sumie do rozważań nie wzięto pod uwagę wyników 2 z 18 próbek (Typ 2 – 1 wynik 18,4 % poniżej średniej, Typ 3 – jeden wynik 14,8 % poniżej średniej) a dwa wyniki sprowadzono do wartości niższej odpowiadającej drugiej najwyższej w danej populacji (Typ 1 – 1 wynik sprowadzono z wartości 3,87 kN do 1,73 kN, Typ 2 – brak zerwania taśmy, wynik sprowadzono do siły 2,97 kN).

Ze wszystkich 18 wyników oraz przyjętych ostatecznie do opracowania 16 wyników zginania próbek uzyskano wartości średnie miarodajne ($F_{\text{sr.m}}$) i wartości średnie miarodajne z prawdopodobieństwem wystąpienia 95% ($F_{95\%.m}$) przy odchyleniu standardowym (δ_F) w przypadku każdej rozważanej populacji ($n = 5-6$). Wyniki średnich sił niszczących oraz ugięć przy sile niszczącej próbkę, pomierzonych w przypadku wszystkich próbek (1, 2, 3) oraz po odrzuceniu i sprowadzeniu tych niemieszczących się w zakładanych 10% odchyłkach (1', 2', 3') zestawiono w Tabeli 1. Metodologia obliczania wartości miarodajnych zgodnie z przedstawionymi poniżej wzorami (1, 2, 3).

$$F_{\text{sr.m}} = \Sigma F_i / n \quad (1)$$

$$F_{95\%.m} = F_{\text{sr.m}} (1 - 1,65v) \quad (2)$$

$$v = \delta_F / F_{\text{sr.m}} \quad (3)$$

$$\Delta u = u_{\text{.CFRP.pom}} - u_{\text{.referencyjne}} \quad (4)$$

$$\Delta_{\text{szt}} = \Delta u / u_{\text{.CFRP.pom}} \quad (5)$$

Tabela 1. Zestawienie wyników ugięć dla sił niszczących $F_{95\%}$ i sił niszczących

Typ próbek	$F_{\text{śr.m}}$ [N]	$F_{95\%.m}$ [N]	$u_{\text{referencyjne}}$ [*] [mm]	$u_{\text{CFRP.pom}}$ ^{**} [mm]	Δu ^{***} [mm]	Δ_{szt} ^{****} [%]
1'	1554	1228	6,561	5,718	-0,843	12,85%
1	1911	310	1,745	1,601	-0,144	8,25%
2'	2563	1752	9,273	8,154	-1,119	12,07%
2	2343	1199	6,386	5,552	-0,834	13,06%
3'	3416	2195	11,561	9,715	-1,845	15,96%
3	3153	1634	8,635	7,280	-1,355	15,69%

*ugięcie próbki referencyjnej przy danym poziomie obciążenia

**pomierzone ugięcie próbki po wzmocnieniu przy danym poziomie obciążenia

***ograniczenie ugięcia próbki wzmocnionej w stosunku do referencyjnej

****wzrost sztywności przekroju po wzmocnieniu

4.2. Sposób zniszczenia próbek

W badaniach zaobserwowano występowanie jednej głównej postaci zniszczenia próbek, oderwania nakładki na granicy stal – klej. Zniszczenie wzmocnienia przez oderwanie taśmy dotyczyło 17 próbek, w przypadku jednych z nich, taśma nie oderwała się podczas badania. Badania w przypadku tej próbki zakończone zostały po uplastycznieniu się stali płaskownika. Zniszczenie przez oderwanie taśmy było gwałtowne. Nie udało się zaobserwować, czy zniszczenie rozpoczęło się w środku rozpiętości czy na końcu taśmy wzmacniającej.

4.3. Wnioski z uzyskanych wyników

Rozpatrując wyniki badania nad wpływem wzmocnienia materiałami kompozytowymi CFRP płaskiego elementu stalowego w zakresie obniżenia ugięcia oraz wpływu kształtowania geometrii zakończenia taśmy i kleju na wytrzymałość wzmocnienia, można wyciągnąć poniższe wnioski:

- Przy zastosowaniu zwykłego zakończenia taśmy, wpływ kleju miał widoczny wpływ na podniesienie nośności złącza (wytrzymałość kleju). W przypadku konfiguracji Typu 2 wytrzymałość złącza w stosunku do konfiguracji Typu 1 wzrosła o 22,6 % w przypadku rozpatrywania wszystkich wyników (wariant 1) oraz o 64,9% w przypadku wariantu 2, przy założeniu wyników średnich miarodajnych. W przypadku wartości średnich miarodajnych z prawdopodobieństwem wystąpienia 95%, wartości te osiągnęły poziom zwiększenia wytrzymałości złącza odpowiednio o 286,7 % oraz 42,5 %. Zatem jednoznacznie widać wpływ typu geometrii zakończenia złącza na przenoszenie obciążeń.

Metodologia obliczania wzrostu wytrzymałości złącza jest następująca:

$$\Delta F_{\text{śr.m}} = (F_{\text{śr.m.2}} - F_{\text{śr.m.1}}) / F_{\text{śr.m.1}} \quad (6)$$

$$\Delta F_{95\%.m} = (F_{95\%.m.2} - F_{95\%.m.1}) / F_{95\%.m.1} \quad (7)$$

$$\Delta F_{\text{śr.m}'} = (F_{\text{śr.m.2}'} - F_{\text{śr.m.1}'}) / F_{\text{śr.m.1}'} \quad (6)$$

$$\Delta F_{95\%.m'} = (F_{95\%.m.2}' - F_{95\%.m.1}') / F_{95\%.m.1}' \quad (7)$$

- Przy zastosowaniu zakończenia odwrotnie fazowanego z wpływem (Typ 3) wytrzymałość na siłę niszczącą wzmocnienie (zrywającą taśmę CFRP) wzrosła w stosunku do konfiguracji Typu 1 o 65,0 % (wariant 1) oraz o 119,8% (wariant 2), przy założeniu wyników średnich miarodajnych. W przypadku wartości średnich

miarodajnych z prawdopodobieństwem wystąpienia 95%, wartości te osiągnęły poziom zwiększenia wytrzymałości złącza odpowiednio o 427,0 % oraz 78,7 %. Sposób obliczania wzrostu nośności złącza zgony z wzorami (6,7).

- Stosowanie zakończenia odwrotnie fazowanego z wpływem (Typ 3) lub stosowania zakończenia zwykłego z wpływem (Typ 2) wpłynęło w stopniu nieznacznym na zmniejszenie ugięcia zginanej próbki w stosunku do zastosowanego wzmocnienia ze zwykłym zakończeniem Typ 1. W stosunku do Typu 1 ograniczenie ugięcia próbek Typu 2 wyniosło 0,14 %, a w przypadku Typu 3 wyniosło 2,95 %.
- Wpływ zastosowania wzmocnienia taśmą kompozytową CFRP płaskiego elementu stalowego w celu poprawy stanu granicznego użytkowania był widoczny, a jego wartość w stosunku do próbki porównawczej wyniosła około 13 % oraz 16 % odpowiednio w przypadku próbek Typ 1, Typ 2 oraz Typ 3. Podobną wartość wzmocnienia można by uzyskać przez zwiększenie przekroju stalowego, n.p. za pomocą przyspawania taśmy stalowej, lub mocowanej na śruby.
- W badaniu zakładano, że przy zastosowaniu wzmocnienia przyspawanym lub przykręconym elementem stalowym (zwiększając przekrój elementu do wartości zgodnej z powierzchnią przekroju uwzględniającą przyklejoną taśmę kompozytową CFRP), na podstawie własnych obliczeń teoretycznych, obniżenie ugięcia osiągnęłoby poziom 11,5 %, a wzmocnienie CFRP powinno dać poprawę o 16% (moduł sprężystości taśmy był wyższy od modułu stali). Zakładano, że taśma kompozytowa wraz z płaskownikiem stworzy przekrój zespolony CFRP-stal, ze sprowadzeniem powierzchni taśmy do powierzchni stali. Należy zauważyć, że obniżenie ugięcia po wzmocnieniu taśmą z zakończeniem Typu 3, osiągnęło zakładany poziom (16%) i było wartością o 3 % wyższą niż w przypadku pozostałych próbek z zakończeniem Typu 1 i 2, które nieznacznie nie spełniły wstępnych założeń.
- Należy zauważyć, że przy założeniu osiągnięcia stanu granicznego użytkowności (SGU) na poziomie ugięcia dopuszczalnego, które w zależności od znaczenia elementu konstrukcyjnego mogło by wynosić $u_{dop} = Lt/200 \div 800$ (w tym przypadku $1,12 \div 4,50$ mm), wzmocnienie zostało osiągnięte na zadowalającym poziomie. Siły niszczące $F_{95\%}$ osiągnęły poziomy 1228 N, 1752 N i 2195 N, odpowiednio w przypadku próbek Typu 1, 2 i 3. Zakładając osiągnięcie maksymalnego dopuszczalnego ugięcia wynoszącego 4,5 mm przy sile na poziomie 980 N, do zniszczenia wzmocnienia płaskowników stalowych taśmami kompozytowymi CFRP pozostał zapas na poziomie 25,1 %, 78,3 % oraz 123,2 %, odpowiednio w przypadku próbek z zakończeniem Typu 1, 2 i 3.

5. Podsumowanie

5.1. Wnioski

Kształtowanie zakończenia taśmy CFRP, ma widoczny wpływ na wytrzymałość złącza klejowego, co potwierdziło poprzednie badania autorów przedstawione w pracy [18].

Wzmocnienie płaskich elementów stalowych doklejonymi taśmami kompozytowymi CFRP miało wpływ na obniżenie wartości ugięcia. Wzmocnienie płaskowników stalowych taśmami CFRP pozwoliło na osiągnięcie zbliżonych do zakładanych poziomów ograniczenia ugięcia, które można uzyskać poprzez zwiększenie przekroju stalowego. Wartości te

osiągnęły 13÷16%, z zachowaniem bezpiecznego zapasu przed osiągnięciem siły niszczącej (25,1÷123,2 %).

Analizując przeprowadzone badania laboratoryjne, które potwierdziły wstępne założenia przyjęte na podstawie analiz teoretycznych, można zaproponować w celu wzmocnienia wytrzymałości złącza klejowego, jak również zmniejszenia ugięcia płaskiego elementu stalowego, wzmocnienia z użyciem kompozytowej taśmy CFRP z zakończeniem odwrotnie fazowanym z wypływem kleju w miejsce metod konwencjonalnych opierających się na dospawaniu lub przykręceniu stalowego elementu.

5.2. Przyszłe prace

Niezbędne będzie wykonanie obliczeń elementów płaskich z różnymi typami złączy poddanych zginaniu. Należy wyznaczyć naprężenia w skleinie i taśmie kompozytowej i porównać wyniki analizy numerycznej z uzyskanymi badaniami laboratoryjnymi.

Należy określić rozkłady naprężeń w skleinie w zależności od geometrii skleiny, przydatne do celów projektowych, porównując analityczne i numeryczne rozwiązania tego problemu. Obliczenia przy założeniu pełnego zakresu zachowania wszystkich materiałów zostaną przeprowadzone przy użyciu analizy MES.

Należy zbadać, jaki wpływ będzie miało wzmocnienie poprzez doklejenie taśmy kompozytowej, również z uwzględnieniem różnych typów zakończenia elementu wzmacniającego i kleju, zginanych stalowych elementów konstrukcyjnych o znacznie większym przekroju w stosunku do wzmocnienia. Należy pamiętać, że w opisanych badaniach, przekrój taśmy kompozytowej stanowił 7 % powierzchni przekroju bez uwzględnienia kleju, a 6,7 % z jego uwzględnieniem. Wpływ tego wzmocnienia zostanie zbadany na belkach dwuteowych (INP 140).

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować firmom S&P Polska Sp. z o.o. oraz Mota-Engil Central Europe S.A. za nieodpłatne udostępnienie materiałów do badań (taśm S&P CFK-Lamellen i żywicy Resin 220 oraz płaskowników stalowych). Badania laboratoryjne przeprowadzono w ramach środków statutowych Katedry Dróg i Mostów Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej (S-50/B/2012).

Autor jest uczestnikiem projektu „Kwalifikacje dla rynku pracy – Politechnika Lubelska przyjazna dla pracodawcy” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- 1 Jiao H., Mashiri F., Zhao X.-L.: “A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets”. *Thin-Walled Structures* 59 (2012) 144–152
- 2 Ghafoori E., Schumacher A., Motavalli M.: “Fatigue behavior of notched steel beams reinforced with bonded CFRP plates: Determination of prestressing level for crack arrest”. *Engineering Structures* 45 (2012) 270–283
- 3 Bocciarelli M., Colombi P., Fava G., Poggi C.: Fatigue performance of tensile steel members strengthened with CFRP plates. *Composite Structures* 87 (2009) 334–343
- 4 Täljsten B., Skodborg Hansen Ch., Witttrup Schmidt J.: Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1665–1677
- 5 Deng J., Lee M.M.K.: “Fatigue performance of metallic beam strengthened with a bonded CFRP plate”. *Composite Structures* 78 (2007) 222–231

- 6 Fawzia S., Al-Mahaidi R., Zhao X.L., Rizkalla S.: Strengthening of circular hollow steel tubular sections using. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 839–845
- 7 Colombi P., Poggi C.: An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips. *Composites: Part B* 37 (2006) 64–73
- 8 Selem M.H., Sharaky I.A., Sallam H.E.M.: Flexural behavior of steel beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer plates – Three dimensional finite element simulation. *Materials and Design* 31 (2010) 1317–1324
- 9 Harries K.A., Peck A.J., Abraham E.J.: Enhancing stability of structural steel sections using FRP. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1092–1101
- 10 Zhao X.L., Al-Mahaidi R.: Web buckling of light steel beams strengthened with CFRP subjected to end-bearing forces. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1029–1036
- 11 Teng J.G., Hu Y.M.: Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 827–838
- 12 Bambach M.R., Jama H.H., Elchalakani M.: Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1112–1121
- 13 Łagoda G., Łagoda M.: Strengthening steel bridge across Vistula River in Poland. 33rd IABSE Symposium, Bangkok, Thailand, September 9-11, 2009, Sustainable Infrastructure Environment Friendly, Safe and Resource Efficient Vol. 96
- 14 Phares B. M., Wipf T. J., Klaiber F.W., Abu-Hawash A.: Strengthening of Steel Girder Bridges Using FRP. *Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, August 2003. © 2003 by Iowa State University.
- 15 Charles D.: A Case Study on Actual Bridge Performance. *Application of Advanced Materials*. NSF-REU 2006
- 16 Colombi P., Poggi C.: Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates. *Construction and Building Materials* 20 (2006) 22–33
- 17 Lin H., Zhao X-L., Al-Mahaidi R.: Boundary element analysis of CFRP reinforced steel plates. *Composite Structures* 91 (2009) 74–83
- 18 Łagoda M., Kowal M.: Wpływ kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość złącza stal-kompozyt FRP. *Budownictwo i Architektura* 2013 vol.12(2) 39–46

FRP composite materials strengthening of flat steel elements

Marek Łagoda¹, Maciej Kowal²

¹ *Road and Bridge Research Institute, e-mail: mlagoda@ibdim.edu.pl,*

² *Department of Road and Bridge, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: m.kowal@pollub.pl*

Abstract: The article describes the study on the impact of FRP composite materials strengthening of flat steel slab. The influence of changing of bond end geometry on three point bending behavior of flat steel elements reinforced by CFRP patch has been investigated. A bond failure at steel-adhesive interface was a dominant failure mode. The test results showed clearly that geometry change of the bond end of strengthening CFRP plate and adhesive can significantly increase bond capacity. The use of reverse taper of CFRP patch with adhesive fillet tapes can improve the load capacity of the adhesive joint on the bending of the flat steel element reinforced by FRP patch. Conclusions and plan of further works on steel elements CFRP strengthening were described.

Keywords: metallic structures, strengthening, steel, FRP composites, bond end shaping, joint capacity, deflection