

Wpływ kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość złącza stal – kompozyt 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 kształtowania końca skleiny stal-kompozyt FRP na nośność złącza. Badano wpływ zmian geometrii końca złącza na zachowanie się osiowo obciążanych, płaskowników stalowych wzmocnionych obustronnymi nakładkami z taśm węglowych, o różnej długości wiązania. Zniszczenie skleiny na granicy stal-klej było dominujące wśród postaci zniszczenia dla przyklejonych do stali taśm CFRP. Przedstawiono wyniki badań, które pokazały, że zmiana geometrii końca spoiny może znacząco podnieść nośność złącza. Opisano wnioski i przedstawiono plan dalszych prac nad wzmocnianiem elementów stalowych taśmami CFRP.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, wzmocnianie, stal, kompozyty FRP, kształtowanie złącza

1. Wprowadzenie

Obecnie administrujący mostami i innymi konstrukcjami stalowymi stoją przed problemami związanymi z utrzymaniem i eksploatacją tych konstrukcji. Związane to jest nie tylko z postępującymi uszkodzeniami, korozją, ale również ze zmianą warunków eksploatacyjnych. W wielu przypadkach obniżenie właściwości nośnych odnosi się jedynie do konkretnych elementów konstrukcji i bardziej ekonomicznym byłoby rozważenie naprawy i odnowy tych elementów, w miejsce wymiany całej konstrukcji, n.p. obiektu mostowego.

Typowymi, konwencjonalnymi metodami wzmocnienia konstrukcji stalowych są: usunięcie istniejącego i wstawienie nowego elementu, zwiększanie przekrojów stalowych z zastosowaniem połączeń spawanych, śrubowych lub tarciovych, zewnętrzne sprężenie lub zmiana schematu statycznego. Jednakże stosowanie tych metod może okazać się mało efektywne w aspekcie ekonomicznym, czy nawet technicznym.

Szybki rozwój materiałów kompozytowych FRP (Fibre Reinforced Polymer) i ich zastosowań w przemyśle lotniczym pokazał, że kompozyty dobrze sprawdzają się w ciężkich warunkach atmosferycznych i przy wysokich obciążeniach. Użycie materiałów kompozytowych z polimerów wzmocnionych włóknami węglowymi (Carbon Fiber Reinforced Polymers – CFRP), jest bardzo obiecującą alternatywą dla wykonywanych obecnie metod. Włókna CFRP, są odporne na korozję, charakteryzują się niską wagą i posiadają wysoką wytrzymałość na rozciąganie. Dodatkowo, technika doklejania elementów kompozytowych oferuje wiele zalet, jak łatwość aplikacji i zwiększoną odporność zmęczeniową.

W ostatnich dwóch dekadach, użycie materiałów kompozytowych poskutkowało obiecującą technologią w inżynierii konstrukcyjnej, szczególnie przy wzmocnianiu konstrukcji betonowych, murowych i drewnianych. [1] Wzrasta również liczba aplikacji kompozytów przy podnoszeniu nośności mostów stalowych. W Polsce wzmocniony został most przez Wisłę w Chełmnie [2], a na świecie aplikacje taśm FRP do wzmocnienia mostów stalowych można znaleźć m.in. w Stanach Zjednoczonych [1].

Jedną z nieodłącznych cech taśm kompozytowych jest ich anizotropia. W kierunku podłużnym, sztywność i wytrzymałość są bardzo wysokie, podczas gdy poprzecznie, właściwości te są dużo słabsze [3,4]. Porównując do konstrukcji betonowych, w których zniszczenie zachodzi głównie w warstwie betonu, formy zniszczenia we wzmocnionych

FRP elementach konstrukcji stalowych są bardziej złożone. Wytrzymałość stali jest wyższa od wytrzymałości konwencjonalnych klejów używanych do wzmocnienia konstrukcji, co powoduje różnorodność postaci zniszczenia.

Możliwymi postaciami zniszczenia elementów wzmocnionych oraz wyznaczaniem procedur projektowania złącza zajmowali się m.in. X.- L. Zhao i L. Hang [5]. Przedstawili przegląd literatury w zakresie wzmocnienia konstrukcji stalowych materiałami kompozytowymi. Zajęli się między innymi podstawami projektowania złącza pomiędzy FRP i stalą. Przedstawili różne metody badania złącza dostępne w literaturze, w tym najczęściej stosowane złącze z podwójną nakładką [6], do zbadania złącza między belką a CFRP. Stwierdzono, że forma zniszczenia zależy od modułu sprężystości CFRP [7,8], typu oraz grubości kleju [9]. Badania postaci zniszczenia i ich lokalizacji można znaleźć również w [6], a badania zmęczenia złącza w [10] [11] [12] [13].

Wpływem kształtowania skleiny oraz końca zakotwienia kompozytu na naprężenia w skleinie zajmowali się m.in. T.J. Stratford i J.F. Chen. W pracy [14] zajęli się m.in. analizą naprężeń międzywarstwowych, a bliżej określeniem dystrybucji naprężeń ścinających (τ) i niszczących (normalnych), wzdłuż grubości warstwy (σ) wewnątrz złącza klejowego. Obecnie najczęściej używa się mniej zaawansowanych analiz naprężeń liniowo-sprężystych, które różnią się w detalach, ale zasadniczo są podobne.

Obecnie znane są już sposoby ograniczania naprężeń w skleinie i podnoszenia nośności złącza. Pierwszą metodą jest zmiana typu kleju na bardziej wytrzymały, jednakże trudno jest tego dokonać z powodu wymagań przygotowania powierzchni stalowej powyżej pewnego poziomu adekwatnego do wytrzymałości na odrywanie. [14]

Drugim sposobem ograniczenia naprężeń na końcach kompozytu i podniesienia nośności złącza jest modyfikacja geometrii taśmy/lub kleju. Stwierdzono, że odpowiednio ukształtowany nadmiar kleju przy końcu kompozytu FRP („fillet”), ogranicza koncentrację naprężeń [14]. Problemem używania nadmiaru kleju są wpływy środowiskowe, które mogą negatywnie wpłynąć na właściwości kleju. Wydaje się zatem, że pewniejszą metodą redukcji koncentracji naprężeń jest zmiana geometrii końca taśmy [14]. Badania i propozycje kształtowania końca skleiny przeprowadzili również [3,15]

Trzecim, dostępnym sposobem ograniczania naprężeń w skleinie, a przez to podnoszenia nośności złącza, jest użycie w skleinie klejów o zróżnicowanych modułach ścinania, t.z.w. „mixed-adhesive joints” – złączach o mieszanych klejach [16-19]. Do ich zalet należą, według autorów, łatwość wykonania, wyższa wytrzymałość złącza w stosunku do tego z użyciem jednego typu kruchego kleju [17]. Prowadzone badania pokazały, że zróżnicowanie modułu kleju w skleinie może: zredukować koncentrację naprężeń, podnieść wytrzymałość złącza, zredukować rozrzut badawczy, zmienić postać zniszczenia. W celu uzyskania większej wytrzymałości, w tym przypadku wytrzymałości na ścinanie kleju, należy stosować klej o wyższym module w środku złącza [16].

W połączeniu klejowym, koncentracja naprężeń międzywarstwowych na końcu skleiny stała się najbardziej szkodliwym zjawiskiem dla złącza. Badania analityczne nad naprężeniami w złączu z podwójną nakładką prowadził m.in. Hart [20]. Analizę złącz klejowych możemy znaleźć również w [21,22,23]. Metodę obliczania naprężeń międzywarstwowych dla taśm ścinanych na końcu i zwykłych zaprezentowali Deng i inni [24,25]. Tsai i Morton [26] dowiedli przez badania numeryczne i laboratoryjne, że koncentracja naprężeń ścinających i zrywających w kleju można znacznie zredukować poprzez zastosowanie nadmiaru kleju na końcu nakładki. Badania Lang'a i Mallick'a [27] pokazały możliwość obniżenia maksymalnych naprężeń dzięki kształtowaniu nadmiaru kleju na końcu skleiny. Belingardi i inni [28] pokazali, że wartość naprężeń maksymalnych ścinających i zrywających w złączu z pojedynczą nakładką maleje wraz ze wzrostem kąta nadmiaru kleju, a najlepsze wyniki można osiągnąć przy kącie 45° .

Przeeglądana literatura sugeruje, że ścinanie taśmy na końcu, zarówno to zwykłe i odwrotne oraz stosowanie nadmiarów kleju, jest korzystne w obniżaniu koncentracji naprężeń na końcach skleiny. Co więcej, odwrotne ścięcie wydaje się być bardziej efektywne niż zwykłe, a nadmiar kleju pod kątem 45° jest sugerowany do wykonywania w praktyce. W pracy [29] pokazano, że przy zastosowaniu nadmiaru kleju na końcu skleiny wzmocnionej belki stalowej, nośność wzrosła o 5% w stosunku do zwykłego zakończenia skleiny.

2. Badania laboratoryjne

2.1. Materiały

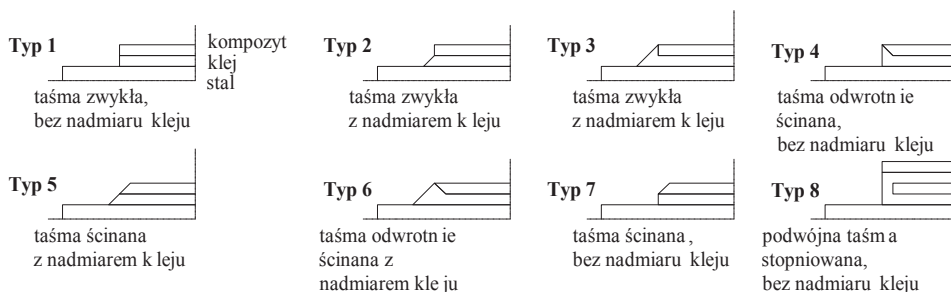
Do badań wykorzystano płaskowniki stalowe o przekroju 200 x 50 x 10 mm ze stali klasy S235JR+AR. Moduł Younga, granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i odkształcenie przy uplastycznieniu płaskowników wynoszą odpowiednio: 210 GPa, 308 MPa, 432 MPa oraz 0,2%.

W badaniach użyto taśm S&P CFK-Lamellen 200/2000, kompozytowych taśm na bazie żywicy epoksydowych z włóknami węglowymi. Szerokość taśm wynosiła 50 mm a grubość 1,4 mm. Moduł Younga, wytrzymałość na rozciąganie i odkształcenie przy zerwaniu dla taśm wynoszą odpowiednio >210 GPa, 2500 MPa oraz 1,25%.

Do klejenia próbek użyto systemowego kleju S&P Resin 220, dwuskładnikowego, bezrozpuszczalnikowego kleju na bazie żywicy epoksydowej. Proporcje mieszania 4:1 (żywica do utwardzacza), gęstość 1.70–1.80 g/cm³, wytrzymałość na ścinanie $\geq 26,0$ MPa, moduł sprężystości $\geq 7,1$ GPa, wytrzymałość na odrywanie na taśmie S&P Lamellen $\geq 3,0$ MPa, stal na stali $\geq 14,0$ MPa.

2.2. Przygotowanie próbek

Przygotowano 77 próbek i poddano osiowemu rozciąganiu. Do opracowania wyników, ostatecznie wzięto pod uwagę 49 próbek. Każda próbka składała się z dwóch płaskowników stalowych (200 x 50 x 10 mm) połączonych ze sobą za pomocą przyklejonych obustronnie na żywicę epoksydową nakładek z taśm węglowych (60 x 50 x 1,4) z różną długością zakotwienia taśmy na płaskownikach (20mm i 40mm). Wykonano 8 typów próbek, o różnej liczbie dla danego typu (6-12). Rys. 1 pokazuje schematy ukształtowania zakończeń kleju i taśmy.



Rys. 1. Schematy kształtów zakończeń spoiny

Wiązanie klejowe polega na działaniu sił pomiędzy klejem a podłożem, dlatego konieczne jest odpowiednie przygotowanie podłoża. Złe przygotowanie powierzchni i różnice w grubości kleju są głównymi czynnikami wpływającymi na obniżenie nośności skleiny. Nośne podłoże stanowi warunek właściwego wykonania wzmocnienia przy użyciu taśm. Należy unikać zawilgocenia powierzchni. Materiały obce w rodzaju kurzu, olejów i tłuszczu muszą być również usunięte.

Bezpośrednio przed doklejeniem taśm, powierzchnie stalowe oczyszczono z zastosowaniem zmywania acetonem, następnie przetarto papierem ściernym o uziarnieniu 220 i ponownie przeczyszczono acetonem. Powierzchnie sklepane taśm kompozytowych przetarto jasną szmatką nawilżoną acetonem. Na oczyszczone i całkowicie suche taśmy CFRP nanoszono klej nadając mu kształt dachu dwuspadowego. Następnie taśmy doklejano na oczyszczone stalowe podłoże tak, aby nadmiar kleju wypłynął spod taśmy. Nadmiar kleju usuwano lub kształtowano zgodnie z wymaganiami dla danego typu próbek.

Temperatura przygotowania i przechowywania próbek wynosiła 22 °C. Czas od wykonania próbek do poddania badaniom wyniósł 80-100 dni

3. Program badawczy

Użyto uniwersalnej maszyny badawczej (MTS793). Badania przeprowadzono kontrolując przyrost siły przy stałym wzroście 100 N/s, aż do zniszczenia złącza. Siłę i przemieszczenie tłoka rejestrowano co 0,01s.

Celem badań było określenie wpływu ukształtowania kleju i taśmy na jej końcu w skleinie na nośność złącza na wytrzymałość i postać zniszczenia rozciąganego złącza klejowego.

4. Wyniki badań i ich omówienie

4.1. Wyniki

Opracowując wyniki dla wszystkich 77 próbek zauważono duże rozbieżności wyników w populacjach danego typu. Dodatkowo, niepokojące okazały się wyniki dla konkretnych typów próbek, niezgodne z wcześniejszymi oczekiwaniami w stosunku do próbek porównawczych Typu 1. Ponieważ przy opracowaniu wyników i kwalifikowaniu wyników próbek kierowano się zakładanymi poziomami nośności należało skorygować wyniki próbek oraz określić przyczynę tak dużych rozbieżności.

Ostatecznie stwierdzono, że przyczyną wszelkich odstępstw od wyników średnich w dół, można określić wadliwe wykonanie próbek, co potwierdza, jak ważnym etapem badań są przygotowania. Dla każdego typu próbki dążono, aby odchylenie wyniku od średniej z populacji nie przekraczało 5 %. Odrzucono wszystkie wyniki znacząco odbiegające od średniej. Ostatecznie z 77 próbek brano pod uwagę przy opracowaniu wyników 49.

Z przyjętych ostatecznie do opracowania 49 wyników rozciągania próbek uzyskano wartości średnie miarodajne ($F_{\text{sr.m}}$) i wartości średnie miarodajne z prawdopodobieństwem wystąpienia 95% ($F_{95\%,\text{m}}$) dla każdej rozważanej populacji wszystkich typów próbek. Wyniki zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników miarodajnych $F_{\text{sr.m}}$ i $F_{95\%,\text{m}}$ dla próbek po odrzuceniu tych nie mieszczących się w zakładanych 5% odchyłkach (odniesienie do $F_{\text{sr.m}}$)

Lp	Typ próbki	$F_{\text{sr.m}}$ [kN]	$F_{95\%,\text{m}}$ [kN]	$F_{\text{sr.m.i}}/F_{\text{sr.m.1}}$	$F_{\text{sr.m.i}}-F_{\text{sr.m.1}}$	$F_{95\%,\text{m.i}}/F_{95\%,\text{m.1}}$	$F_{95\%,\text{m.i}}-F_{95\%,\text{m.1}}$
1	8	20,575	16,371	84,71%	-15,29%	75,17%	-24,83%
2	3	23,953	17,152	98,62%	-1,38%	78,75%	-21,25%
3	1	24,288	21,780	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
4	7	27,962	19,083	115,13%	15,13%	87,62%	-12,38%
5	4	32,849	26,015	135,25%	35,25%	119,44%	19,44%
6	5	34,821	27,228	143,37%	43,37%	125,01%	25,01%
7	2	35,361	27,487	145,59%	45,59%	126,20%	26,20%
8	6	38,297	28,524	157,68%	57,68%	130,96%	30,96%

4.2. Postacie zniszczenia próbek

W wyniku badania zaobserwowano cztery postacie zniszczenia próbek: oderwanie nakładki na granicy stal – klej (a), oderwanie nakładki poprzez zniszczenie w kleju (b) oraz oderwanie nakładki na granicy styku kleju i taśmy kompozytowej (c), delaminacja taśmy (d). Głównymi postaciami zniszczenia zauważonymi podczas badań było (a) oraz (a) w połączeniu z (b). Próbek z zaobserwowanym zniszczeniem typu (c) i (d) było niewiele w stosunku do całkowitej liczby próbek. Zniszczenie typu (d) mogło w przypadku tych badań wynikać z wstępnego zniszczenia taśmy w trakcie przygotowania próbek (nieprawidłowe przycięcie powodujące strzępienie krawędzi taśmy).

4.3. Wnioski z uzyskanych wyników

Rozważając wyniki badania wpływu kształtowania geometrii zakończenia taśmy i kleju w spoinie na nośność stalowych próbek łączonych czołowo z podwójną nakładką z taśm CFRP można wyciągnąć następujące wnioski:

- Przy zastosowaniu zwykłego kształtu kompozytu, nadmiar kleju ma widoczny wpływ na podniesienie nośności złącza. Dla konfiguracji Typu 2 nośność w stosunku do konfiguracji Typu 1 wzrosła o 45,59 % natomiast dla konfiguracji Typu 3 zmalała o 1,38 %. Może to jednak świadczyć o błędnie przygotowanych próbkach, ponieważ nie potwierdza to chociażby badań [31]. Wykonanie w warunkach budowlanych zakończenia Typu 3 jest zdecydowanie prostsze w wykonaniu w stosunku do Typu 2, więc należałoby zastanowić się nad dalszymi pracami laboratoryjnymi, jak i analitycznymi nad zakończeniem Typu 3, w celu potwierdzenia lub obalenia wyników badań o osłabieniu nośności po zastosowaniu tego typu geometrii zakończenia spoiny.
- Ścinanie zwykle lub ścinanie odwrotne końca kompozytu podnosi nośność złącza czołowego z podwójną nakładką. Nie ma znaczenia czy zastosowany zostanie nadmiar kleju na końcu skleiny. W zależności czy został zastosowany lub nie nadmiar kleju, nośność złącza z użyciem taśm ścinanych podniosła nośność o 15÷35 % bez nadmiaru kleju i 57,68 % z nadmiarem kleju.
- Brak zastosowania nadmiaru kleju przy zwykłym ścinaniu końca kompozytu (Typ 7) spowodował podniesienie nośności o 15 % w stosunku do próbki porównawczej, natomiast, zastosowanie nadmiaru kleju spowodowało wzrost nośności o 43% (Typ 5).
- Użycie odwrotnego ścięcia kompozytu ma dobry wpływ na nośność. Bez stosowania nadmiaru kleju (Typ 4), nośność wzrosła o 35 % w stosunku do próbki porównawczej. Przy zastosowaniu nadmiaru kleju na końcu, nośność wzrosła o 57% (Typ 6).
- Przy użyciu nadmiaru kleju dla zwykłego końca, Typ 2, nośność wzrosła o 45 %.
- Najefektywniejszymi w podnoszeniu nośności są konfiguracje: Typ 6 (+ 57 %), Typ 2(+ 45 %), Typ 5 (+43 %), Typ 4 (+ 35 %), Typ 7 (+15 %) i Typ 1 (0%) – porównawcza.
- Próbkami, które nie spełniły oczekiwań i w badaniach nie dały zakładanych profitów w nośności były Typ 8 (obniżenie nośności o 15 %) i Typ 3 (obniżenie nośności o 1 %).
- Kolejną obserwacją, która powinna zostać poddana weryfikacji jest obniżenie nośności w stosunku do próbki porównawczej o 15 % dla próbek Typu 8, gdzie zastosowano dwie warstwy taśmy, których zakończenia były przesunięte względem siebie. Może to jednak świadczyć o błędnie przygotowanych próbkach. Poza tym, wykonanie w warunkach budowlanych wzmocnienia Typu 8 jest trudne do wykonania, więc należałoby zastanowić się nad potrzebą dalszych prac laboratoryjnych, jak i analitycznych nad zakończeniem Typu 8.

5. Podsumowanie

5.1. Wnioski

Analizując przeprowadzone badania można wysnuć następujące wnioski:

- Odpowiednie ukształtowanie zakończenia taśmy FRP, ma wpływ na wytrzymałość złącza.
- Badania pokazują, że zachowanie wzmocnienia zależne jest od przygotowania powierzchni. Dzięki temu można uniknąć zniszczenia przez odspojenie lub delaminację, ewentualnie słabszych wyników podniesienia nośności.
- Ścinanie końca kompozytu z nadmiarem kleju lub bez, można zaproponować dla podniesienia nośności w złączu klejowym. Zbadano ten wpływ podczas badań laboratoryjnych, gdzie rozważono osiem konfiguracji. Ścinanie taśm i nadmiar kleju ograniczono do 45 stopni.
- Najefektywniejsza konfiguracja miała odwrotne ścięcie laminatu i nadmiar kleju.
- Z powodu znaczącego wpływu zastosowania nadmiaru kleju, należy rozważyć sposób ochrony tego nadmiaru kleju przed oddziaływaniami zewnętrznymi.
- Z powodu niewielkiego wpływu zwykłego ścięcia laminatu bez nadmiaru kleju na poprawę nośności złącza, nie proponuje się tego typu rozwiązania.

5.2. Przyszłe prace

- Aby rozwinąć odpowiednie kryteria projektowe niezbędnym jest posiadanie modelu do obliczenia naprężeń w krytycznych lokalizacjach, miejscach koncentracji, nieciągłościach, a następnie przewidywać postaci zniszczenia.
- Niezbędnym będzie wykonanie obliczeń analitycznych różnych typów złączy poddanych rozciąganiu. Należy wyznaczyć naprężenia w skleinie i taśmie kompozytowej i porównanie wyników analizy z badaniami laboratoryjnymi.
- Należy określić rozkłady naprężeń w skleinie w zależności od geometrii skleiny, przydatne do celów projektowych, porównując analityczne i numeryczne rozwiązania tego problemu.
- Należy wyprowadzić poprawione kryteria zniszczenia bazujące na konfiguracjach wzmocnienia i właściwościach materiałowych, w celu poprawy przewidywalności wytrzymałości złącza w konstrukcjach stalowych wzmocnionych FRP, w analizach numerycznych i analitycznych.
- Obliczenia teoretyczne przeprowadzone zostaną analitycznie przy założeniu liniowo-sprężystego zachowania materiałów oraz przy użyciu analizy MES, w celu sprawdzenia poprawności obliczeń analitycznych i ich porównanie z wynikami badań laboratoryjnych.

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/2011).

Literatura

- 1 Phares B. M., Wipf T. J., Abu-Hawash F. W. A., Lee Y.-S.: Strengthening of Steel Girder Bridges Using FRP. Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2003.
- 2 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.
- 3 Linghoff D., Haghani R., Al-Emrani M.: Carbon-fibre composites for strengthening steel structures. *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1048–1058.
- 4 da Silva LFM, Adams RD: Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 27 (2007) 227–235.
- 5 Zhao X.-L., Zhang L.: State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. *Engineering Structures* 29 (2007) 1808–1823.
- 6 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.
- 7 Fawzia S, Al-Mahaidi R, Zhao XL, Rizkalla S.: Strengthening of circular hollow steel tubular section using CFRP sheets. *Construction and Building Materials* 2005.
- 8 Jiao H, Zhao XL.: CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-Walled Structures* 42 (2004) 963–978.
- 9 Xia SH, Teng JG.: Behaviour of FRP-to-steel bonded joints. In: Chen JF, Teng JG, editors. Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures. Hong Kong: Int. Institute for FRP in Construction; 2005. p. 419–26.
- 10 Albat AM, Romilly DP.: A direct linear-elastic analysis of double symmetric bonded joints and reinforcements. *Compos Science Technology* 59 (1999) 1127–1137.

- 11 Shaat A, Schnerch D, Fam A, Rizkalla S.: Retrofit of steel structures using Fiber-Reinforced Polymers (FRP): State-of-the-art. In: Transportation research board (TRB) annual meeting. 2004. CD-ROM (04-4063).
- 12 Liu HB, Zhao XL, Al-Mahaidi R.: The effect of fatigue loading on bond strength of CFRP bonded steel plate joints. In: Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures. 2005. p. 459–64.
- 13 Taljsten B., Hansen Ch.S. i Schmidt J.W.: Strengthening of old metallic structures in fatigue with prestressed and non-prestressed CFRP laminates. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1665–1677.
- 14 Stratford T.J. i Chen J.F.: Designing for tapers and defects in frp-strengthened metallic structures. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005) Chen and Teng (eds) © 2005 International Institute for FRP in Construction.
- 15 Cadei JMC, Stratford TJ, Holloway LC, Duckett WG. Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers – C595. London: CIRIA; 2004.
- 16 M.D. Fitton, J.G. Broughton Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 25 (2005) 329–336.
- 17 daSilva L.F.M., Lopes M.J.C.Q. Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 29 (2009) 509–514.
- 18 da Silva L.F.M, Adams R.D. Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 27 (2007) 362–379.
- 19 da Silva L.F.M, Adams R.D. Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 27 (2007) 227–235.
- 20 Hart-Smith L.J.: Adhesive-bonded double-lap joints. National Aeronautics and Space Administration, CD-112235, Langley Research Center; 1973.
- 21 Łagoda M.: “Wzmocnianie mostów przez doklejanie elementów”. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. ISSN 0860-097X. Kraków 2005.
- 22 Rybak M. Wybrane zagadnienia połączeń klejowych. Prace centralnego ośrodka badań i rozwoju techniki drogowej. Warszawa 1973
- 23 Łagoda M.: “Wzmocnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi”. Wydawnictwo Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. ISSN 0137-5393. Warszawa 2012.
- 24 Deng J., Lee M.M.K. and Moy S.S.J. “Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate”. *Composite Structures*, 65 (2004) 205-215.
- 25 Deng J., Lee M.M.K. Effect of plate end and adhesive spew geometries on stresses in retrofitted beams bonded with a CFRP plate. *Composites: Part B* 39 (2008) 731–739.
- 26 Tsai MY, Morton J. The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. *Composite Structures* 32 (1995) 123–131.
- 27 Lang TP, Mallick PK. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 18 (1998) 167–177.
- 28 Belingardi G, Goglio L, Tarditi A. Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 22 (2002) 273–282.
- 29 Deng J, Lee MMK. Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate. *Composite Structures* 78 (2007) 232–242
- 30 L.C. Holloway: Advances in adhesive joining of dissimilar materials with special reference to steels and FRP composites. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005) Chen and Teng (eds) © 2005 International Institute for FRP in Construction.
- 31 Haghani R., Al-Emrani M., Kliger R.: Interfacial stress analysis of geometrically modified adhesive joints in steel beams strengthened with FRP laminates. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 1413–1422

The effect of bond end geometry on steel – FRP joint strength

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: Article describes experiments on the effect of steel – FRP bond end shaping on bond strength. The influence of changing the bond end geometry on behavior of axially loaded steel elements reinforced by CFRP double patch joints with varying overlap length was analyzed. Bond failure at steel-adhesive interface was dominant failure mode. The test results showed clearly that geometry change of the bond end of strengthening CFRP plate and adhesive in composite plate region can significantly increase bond capacity. Conclusions and plan of further works on CFRP strengthening of steel elements were described.

Keywords: metallic structures, strengthening, steel, FRP composites, bond end shaping.