

MAREK ŁAGODA¹
Road and Bridge Research Institute

MACIEJ KOWAL²
Lublin University of Technology

¹e-mail: mlagoda@ibdim.edu.pl

²e-mail: m.kowal@pollub.pl

CFRP composite materials strengthening of flat steel elements to reduce the stresses in the steel

Abstract

The article describes experiments on the effect of FRP strengthening of flat steel elements. The influence of changing of bond end geometry on behavior of steel bars reinforced by CFRP patch under three point bending. The test results showed that the use of traditional computational analysis is inadequate and may have a negative impact on strengthening. Conclusions and plan of further works on steel elements CFRP strengthening were described.

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

1. Introduction

The bonding of FRP composites to metallic structures is now accepted practice in Europe (especially in the UK). CFRP is an expensive material when compared weight-for-weight with conventional materials. It is important not to carry out comparative cost analysis between FRP and conventional materials on such a basis. The high strength and light weight of FRP means that much less material is required and, thus the amount of false work, lifting gear and labour required is reduced. Additionally, the excellent durability of FRP means that maintenance costs are lower. Consequently, comparisons need to be made on the basis of expected life cycle. Fiber reinforced polymer composites (FRP) are used for stiffening and strengthening metallic structures. It is also well-known that the current state-of-the-art on this topic is not as advanced as that of concrete or masonry constructions. In fact, adequate solutions are currently available only for a few specific applications. The present Polish studies represents the first step towards the definition of specific design guidelines [2, 3, 4]. The results of these studies will be useful in identifying any problems that still remain unresolved, to concentrate upon them over the next few years.

2. Laboratory tests

2.1. Materials

Steel (S235JR+AR) bars with dimensions 1000 x 100 x 12 mm were used in laboratory tests. Young's

module, yield stress, tensile strength and yield stress strain of steel were equal correspondingly 210 GPa, 308 MPa, 432 MPa and 0.2%.

In this study, normal modulus CFRP plate (S&P CFRP-Lamellen 200/2000), an unidirectional carbon fiber plates, were placed in the longitudinal direction of the steel plates. Manufacturer guaranteed static properties of the CFRP such as the modulus of elasticity, tensile strength, and ultimate strain were >210 GPa, 2500 MPa and 1.25%, respectively.

S&P Resin 220 was used as adhesive in experiments. This is a two-part epoxy resin whose shear strength of adhesive ≥ 26.0 MPa, and Young's module ≥ 7.1 GPa. Pull-off strength of adhesive is about ≥ 3.0 MPa on S&P Lamellen strip, and about ≥ 14.0 MPa on steel.

2.2. Specimens preparation

One reference and 18 strengthened specimens were prepared and put to the test three point bending. All 18 specimens were used in developing results. Each strengthened specimen consisted of steel (S235JR+AR) plate with 1000 x 100 x 12 mm dimensions, cover plated by one bonded CFRP plate with 600 x 60 x 1.4 mm dimensions, with different geometry of bond end. Span length of flat steel bars was equal 900 mm. Three types of strengthened specimens were prepared, six specimens in each type and one unstrengthened reference specimen.

The following nomenclature for specimens is introduced, in agreement with Figure 1: specimen

with simple bond end (Type 1 – simple), specimen with simple tape end and adhesive fillet (Type 2 – adhesive fillet), and specimen with reverse tapered tape end with adhesive fillet (Type 3 – reverse tapered with adhesive fillet).

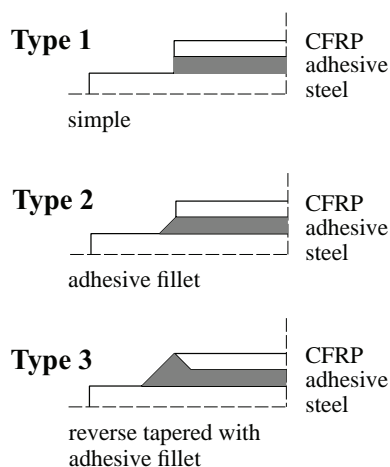


Fig. 1. Bond end geometry schemes

2.3. Instrumentation

Two from six specimens from each type was instrumentated by strain gauges. One specimen from each type, was instrumentated symmetrically towards to midpoint by 17 strain gauges. The second specimen was instrumentated by 10 strain gauges only at one side. Electric resistance wire strain gauges TFs 10/120 (measurement points 1-4) i TFs 15/120 (measurement point 5) with ohmic resistance $120 \pm 0.2\% \Omega$, produced by Tenmex was used in strain measurements. Gauges distribution is in agreement with Figure 2. Temperature of specimens preparation and store was 22°C . The period between specimens preparation and its examinations lasted 160-170 days. Figure 3 and 4 show the sample during testing.

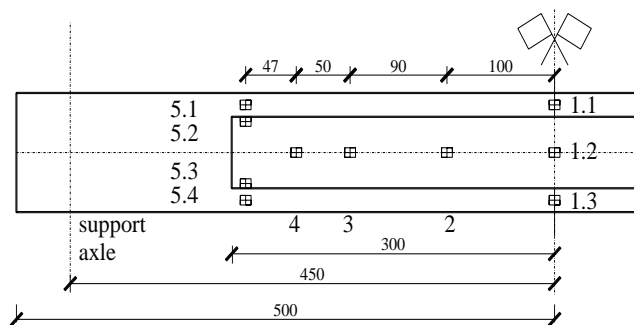


Fig. 2. Strain gauges scheme

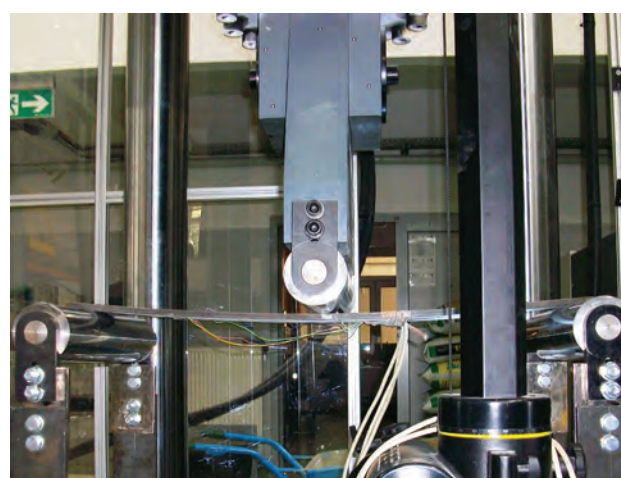


Fig. 3 and 4. Strengthened specimens under three point bending

3. Experimental program

Universal testing machine Zwick&Roel was used in this study. Force and displacement was recorded with frequency 100 Hz up to failure. Load increased in cycles. Load values increased steadily with 500 N steps, and returned to 500 N value, after reaching cycle peak value (0 N – 500 N – 1000 N – 500 N – 1500 N – 500 N – 2000 N – 500 N – ... – 500 N – 5000 N).

The main aim of these study was determination, how available design methods can be reflected in calculation of flat steel bar CFRP strengthening under bending.

4. Experimental results and discussion

4.1. Assumptions

The study was aimed to determine whether the known available design methods can be used to design constraints of normal stresses of flat steel element during bending.

The flat steel bar with cross-section dimensions 100 x 12 mm was treated as a reference specimen. Reducing of the stresses in the flat steel bar were compared in the middle of the specimen span (point 1) and near the end of the CFRP reinforcement (287 mm from the center of the specimen – point 5). The theoretical and measured stresses were checked on the steel bar lower surface and on CFRP strip lower surface.

The theoretical analyzes assumed that the CFRP reinforced flat steel bar will behave as a steel-CFRP composite cross-section with the perfect junction. Between the steel bar with 12 mm height and the CFRP strip with 1.4 mm height adhesive layer with measured thickness $0.72 \div 0.77$ mm appeared. Adhesive layer was treated as an offset and did not take into account in the specimen load transfer. For comparison purposes, it was assumed that flat steel bar with 60 x 2.15 mm dimensions could be used in the strengthening. Such solution would create a flat bar steel with T-shaped cross-section. Analysis of the CFRP strengthened and steel strengthened steel cross-sections showed that stresses on the lower edge of the reinforced flat steel bar will be reduced by 26.7 and 37.1%, respectively in the case of composite steel-CFRP and T-shaped steel cross section.

4.2. Results

Developing the results of six specimens with strain gauges noted that the gain levels varied depending on the type of the specimen. Least results fared reinforcing Type 1 and Type 6 was the best, anyway according to assumptions.

Deviations have been observed from the average

of the individual sample results given type. They amounted to $-12.7 \div 12.7\%$, $-31.3 \div 31.37\%$ and $-3.1 \div 3.1\%$ respectively, Type 1, 2 and 3. Because of the small amount of instrumented specimens, all sample results were qualified to elaboration of the laboratory results. The main reason for discrepancies assumed impact of complexity of the material composition of the sample (steel, adhesive and CFRP). The results showed that the number of tested specimens with instrumentation was insufficient. It was impossible to unambiguously determine the effect of strengthening on the reduction of stress in the specimen under three point bending.

The strains results measured by the strain gauges, differ from the assumptions. In relation to the assumed level of CFRP strengthening turned out that the measured strain differed from assumptions by about $-51.0 \div 54.6\%$. On average experimental results were higher by 13.4% compared to the reference specimen, although with such a large differences of results, average values should not be taken into account. It can be only concluded that there were large discrepancies in those results. Thus, the restrain of the stresses after strengthening was lower than expected in most measured cases at points 1 and 5.

Comparing the results of strains, obtained in the experimental studies on the observed reinforced specimen tension surface to those obtained theoretically, the effect of CFRP steel strengthening stress reducing was lower than expected. The lowest strengthening effects were obtained with reinforcement Type 1, where the strengthening was

Table 1. Results of normal stresses reduction summary, depending on the type of strengthening

A	Reduction obtained *,**					
	Geometry Type 1		Geometry Type 2		Geometry Type 3	
	B	C	D	E	F	G
Measurement point	Ref.-Type1 Ref.	CFRP-Type 1 Type 1	Ref.-Type 2 Ref.	CFRP-Type 2 CFRP	Ref.-Type 3 Ref.	CFRP-Type 3 CFRP
1	-24.30%	-69.70%	0.30%	-36.10%	13.60%	-18.00%
5	-2.80%	-40.30%	6.70%	-27.30%	7.30%	-26.50%

* The stress reduction obtained with strengthening Type 1 (column B), Type 2 (column D) and Type 3 (column F) compared to the reference specimen.

** Difference in the stress reduction obtained with strengthening Type 1 (column C), Type 2 (column E) and Type 3 (column G) compared to the theoretically obtained reduction in the general case the use of CFRP strengthening patch (theoretically obtained level of strengthening with use of CFRP was 26.7%).

not obtained but the weakening. It may be caused by poor preparation of the strain gauges. For the Type 2 strengthening, stress limit at $0.3 \div 6.7\%$ was obtained, but the result was still not satisfactory with respect to the assumptions, which is lower by about $27.3 \div 36.1\%$. The best, though not quite satisfactory results have been obtained with reinforcement Type 3. The stress limitation reached in this case was at the level of $7.3 \div 13.6\%$. However, this was about $18.0 \div 26.5\%$ less than expected. The results are summarized in Table 1. Force-stress diagrams are shown in Figure 5 and 6.

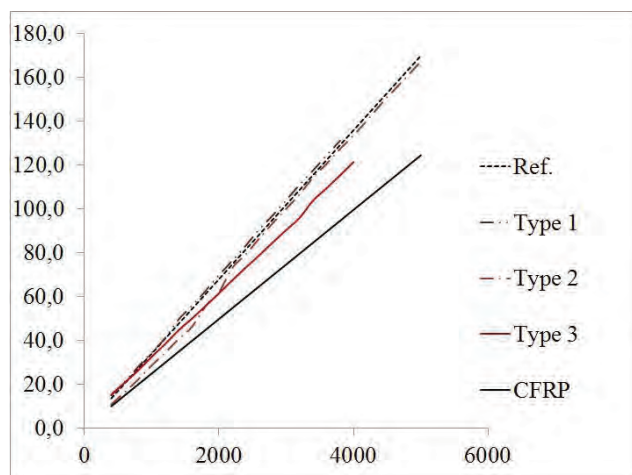


Fig. 5. Force-stress relation at measurement point no 1

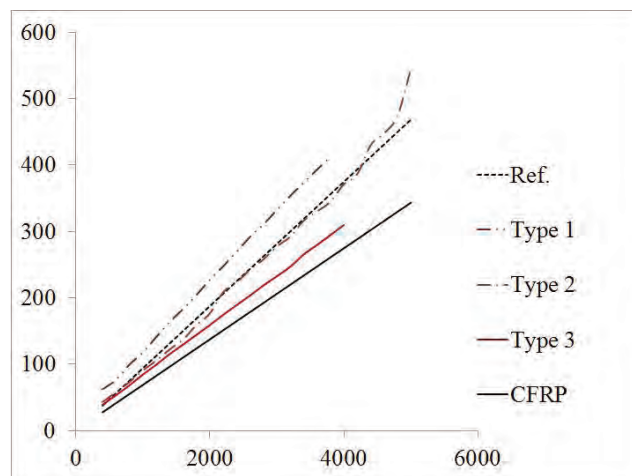


Fig. 6. Force-stress relation at measurement point no 5

4.3. Conclusions from laboratory tests results

Considering the results of the application of CFRP strip to flat steel element on the strengthening effect to reduce the normal stresses in that steel element and the applicability of analytical calculation methods in order to properly determine strengthening level the following conclusions can be drawn:

- limited number of results affects the inability to determine the actual impact of the strengthening on the reduction of stress;
- obtained strengthening results differed from the assumed pre-theoretical levels;
- studies have shown that the strengthening with reverse tapered tape end with adhesive fillet (Type 3) increases the load capacity of steel-CFRP;
- CFRP plate end reverse tapering with adhesive fillet gave the best results in reducing the stress in the steel;
- in relation to the specimens results which proved to be opposite than expected (Type 1) should be approached with the awareness of a small amount of analyzed specimens and the impact of the possibility of poor performance instrumentation on the results;
- attempt to implement the existing calculation methods used to calculate the ideal composite sections did not give satisfactory results, though reaching capacity enhancement (Type 2 and Type 3) did not achieve their theoretical levels.

5. Conclusions

Existing analytical methods used to calculate the composite sections [1] do not provide satisfactory confidence levels of steel-CFRP strengthening design in calculating the limiting stress of flat steel elements reinforced by CFRP plate. Reverse tapering of CFRP plate end with adhesive fillet could be suggested for load capacity enhancing of bonded joints. use. Plate taper and adhesive fillet angle were limited

It is necessary to carry out the numerical calculation of the described flat steel elements strengthening types under flexural load. It is necessary to specify whether the finite element method allows to obtain similar results to those obtained in the experimental study. It is also necessary to specify the stress distribution in adhesive joint depending on the geometry of the adhesive layer, useful for design purposes, comparing the analytical and numerical solutions of the problem.

References

- [1] Karlikowski J., Madaj A., Wołowicki W.: *Mostowe konstrukcje zespolone stalowo-betonowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003, 2007.
- [2] Łagoda M., Kowal M.: *Wpływ kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość złącza stal-kompozyt FRP*, Budownictwo i Architektura 2013 vol. 12(2), s. 39-46.

- [3] Łagoda M.: *Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- [4] Łagoda M.: *Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi*, Wydawnictwo Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 2012.

Acknowledgments

Authors wishes to thank firms S&P Poland Sp. z o.o. and Mota-Engil Central Europe S.A. for free access to

materials to research (S&P CFK-Lamellen plates, Resin 220 adhesive and steel bars). Laboratory tests were carried out within the framework of the measures statutory of Roads and Bridges Department of the Faculty of Civil Engineering and Architecture of Lublin University of Technology (S-50/B/2012).

Maciej Kowal is participant of the Project: „Qualifications for the labour market – employer friendly university”, cofinanced by European Union from European Social Fund.

Marek Łagoda
Maciej Kowal

Wzmacnianie płaskich elementów stalowych materiałami kompozytowymi CFRP na obniżenie naprężeń w stali

1. Wprowadzenie

Doklejanie kompozytów FRP do konstrukcji metalowych jest obecnie przyjętą praktyką w Europie (szczególnie w Wielkiej Brytanii). Biorąc pod uwagę cenę jednostkową w porównaniu z materiałami konwencjonalnymi, CFRP jest materiałem droгим. Jednak przy porównaniu i analizie kosztów stosowania różnych materiałów, bardzo ważne jest aby cena jednostkowa nie była jedyną podstawą. Wysoka wytrzymałość i mała masa jednostkowa FRP powoduje, że do ich aplikacji wymagany jest mniejszy nakład materialny na sprzęt i roboty towarzyszące. Dodatkowo, doskonała trwałość FRP powoduje, że koszty utrzymania są niższe. Konsekwentnie, podstawą służącą analizom porównawczym powinien być oczekiwany cykl życia konstrukcji. Kompozyty polimerowe (FRP) są używane w konstrukcjach metalowych w celu podnoszenia sztywności i nośności konstrukcji. Ogólnie wiadomo, że aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie nie jest tak rozległy jak w przypadku konstrukcji z betonu lub konstrukcji murowanych. Aktualnie dobrze opisane są zastosowania jednostkowe. Obecne, polskie badania reprezentują wstępne kroki do określenia projektowych wskazówek [2, 3, 4]. Skutki tych badań są przydatne w identyfikowaniu nie wszystkich problemów, część z nich nadal pozostaje nierozwiązana, co wymaga koncentracji się na nich w ciągu następnych kilku lat.

2. Badania laboratoryjne

2.1. Materiały

Do badań wykorzystano płaskowniki stalowe 1000 x 100 x 12 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 taśmy S&P CFK-Lamellen 200/2000, kompozytowe taśmy na bazie żywicy epoksydowych z włóknami węglowymi. Szerokość taśm wynosiła 60 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 19 próbek i poddano trzypunktowemu zginaniu. W opracowaniu wyników wzięto pod uwagę wszystkie próbki. Każda próbka składała

się z płaskownika stalowego (1000 x 100 x 12 mm) wzmocnionego za pomocą przyklejonej do spodniej płaszczyzny na żywicę epoksydową nakładki z taśmy węglowej (600 x 60 x 1,4) z różnymi typami ukształtowania geometrii końca taśmy. Rozpiętość teoretyczna zginanych wzmocnionych płaskowników wynosiła 900 mm. Wykonano 3 typy próbek, po sześć danego typu i jedną próbkę porównawczą.

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

2.3. Oprzyrządowanie próbek

Po dwie próbki z każdego typu poddano badaniom z użyciem tensometrów. Jedna z próbek każdego typu, oklejona została symetrycznie względem środka rozpiętości tensometrami w liczbie 17 sztuk, a druga z próbek 10 sztukami tensometrów z jednej strony. Do badań odkształceń użyto foliowych tensometrów elektrooporowych firmy Tenmex typu TFs 10/120 (punkty 1-4) i TFs 15/120 (punkty 5) o rezystancji $120 \pm 0,2\% \Omega$. Rozkład tensometrów i ich opis zgodnie z rysunkiem 2.

Temperatura przygotowania i przechowywania próbek wynosiła 22°C . Czas od wykonania próbek do poddania badaniom wyniósł 160-170 dni przy próbkach oprzyrządzonych.

Na rysunkach 3 i 4 pokazano próbki podczas badań.

3. Program badawczy

Użyto uniwersalnej maszyny badawczej (Zwick&Roel). Badania przeprowadzono kontrolując przyrost siły przy stałym wzroście 100 N/s, aż do zniszczenia złącza. Siłę i przemieszczenie tłoka rejestrowano co 0,01 s. 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 – 500 N – 500 N – 2000 N – 500 N – ... – 500 N – 5000 N).

Głównym celem badania było określenie jak dostępne metody projektowe mają odzwierciedlenie w rzeczywistości na obliczanie wzmocnienia taśmą CFRP płaskiego elementu stalowego przy zginaniu.

4. Wyniki badań i ich omówienie

4.1. Założenia

Badanie miało na celu określenie, czy znane dostępne metody projektowe mogą być użyte do projek-

owania ograniczenia naprężeń normalnych płaskiego elementu stalowego podczas zginania.

Jako próbkę odniesienia traktowano płaskownik stalowy o wymiarach 100 x 12 mm. Ograniczenie naprężeń w płaskowniku porównywano w środku rozpiętości próbki (punkt 1) oraz w pobliżu końca wzmocnienia (287 mm od środka próbki – punkt 5). Naprężenie teoretyczne i pomierzone sprawdzano na dolnej powierzchni płaskownika oraz taśmy wzmacniającej.

W analizach teoretycznych założono, że wzmocniony przyklejoną taśmą CFRP płaskownik stalowy będzie zachowywał się jak przekrój zespolony stal-kompozyt o idealnym zespoleniu. Pomiędzy stałą wysokości 12 mm, a taśmą wysokości 1,4 mm występowała warstwa kleju pomierzonej grubości $0,72 \div 0,77$ mm, którą potraktowano jako odsadzkę i nie uwzględniono właściwości kleju do współpracy przekroju w przenoszeniu obciążeń. W celach porównawczych założono, że do wzmocnienia można by użyć płaskownika stalowego o wymiarach 60 x 2,15 mm, który z płaskownikiem stalowym stworzyłby przekrój teowy. Analizy przekrojów zespolonego i stalowego po uwzględnieniu wzmocnienia wykazały, że ograniczenia naprężeń na dolnej krawędzi wzmacnianego płaskownika zostaną ograniczone o 26,7 i 37,1% odpowiednio w przypadku przekroju zespolonego stal-CFRP oraz stalowego.

4.2. Wyniki

Opracowując wyniki sześciu oprzyrządzonych wzmocnionych próbek zauważono, że w zależności od typu próbki zmieniały się poziomy wzmocnienia. Najbardziej wypadły wyniki wzmocnienia Typ 1, a najlepiej Typ 3, zresztą zgodnie z założeniami.

Zauważono odchylenia poszczególnych wyników od średnich wyników próbek danego typu. Wynosiły one $-12,7 \div 12,7\%$, $-31,3 \div 31,37\%$ oraz $-3,1 \div 3,1\%$ odpowiednio Typ 1, Typ 2 i Typ 3. Z powodu niewielkiej ilości oprzyrządzonych próbek (która pozwala tylko na delikatne szacowanie wyników) do opracowania wyników próbek zakwalifikowano wszystkie wyniki badań laboratoryjnych. Jako główną przyczynę rozbieżności przyjęto wpływ złożoności składu materiałowego wzmocnionej próbki (stal, klej i kompozyt CFRP). Wyniki pokazały, że ilość przebadanych próbek z oprzyrządowaniem jest za mała, aby możliwe było jednoznaczne stwierdzenie wpływu wzmocnienia na ograniczenie naprężeń w zginanej próbce.

Wyniki pomierzone na podstawie odkształceń postaciowych mierzonych za pomocą tensometrów

elektrooporowych, a następnie przeliczone przy założeniu sprężysto-liniowej pracy stali i CFRP, różniły się od założeń. W stosunku do zakładanego poziomu wzmocnienia taśmą CFRP okazało się, że pomierzone naprężenia różniły się od zakładanych o $-51,0 \div +54,6\%$, a średnio były większe o $13,4\%$ w stosunku do próbki porównawczej, chociaż przy tak dużych rozrzutach wyników nie powinno się brać pod uwagę średniej, a jedynie stwierdzić duże rozbieżności tychże wyników. Zatem ograniczenie naprężeń po zastosowaniu wzmocnienia było w większości przypadków pomiarów w punktach 1 i 5 było mniejsze od zakładanego.

Analizując uzyskane w badaniach naprężenia na obserwowanych powierzchniach wzmocnianych próbek w stosunku do uzyskanych teoretycznie naprężeń próbki porównawczej, dało się zaobserwować wpływ wzmocnienia taśmą CFRP na ograniczenie naprężeń. Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku wzmocnienia Typ 1, gdzie na podstawie uzyskanych wyników nie uzyskano wzmocnienia a osłabienie, co może być spowodowane słabym przygotowaniem oprzyrządowania. W przypadku wzmocnienia Typ 2, uzyskano ograniczenia naprężeń na poziomie $0,3 \div 6,7\%$, jednakże wynik nadal nie jest zadowalający w odniesieniu do zakładanego, który jest niższy o $27,3 \div 36,1\%$. Najlepsze, chociaż nie dość satysfakcjonujące wyniki uzyskano w przypadku wzmocnienia Typ 3. Ograniczenie naprężeń osiągnęło w tym przypadku poziom $7,3 \div 13,6\%$. Jest to jednak o $18,0 \div 26,5\%$ mniej od wyznaczonego teoretycznie. Wyniki zestawiono w tabeli 1. Wykresy siła-naprężenie pokazano na rysunkach 5 i 6.

4.3. Wnioski z uzyskanych wyników

Rozważając wyniki badania wpływu zastosowania wzmocnienia taśmą CFRP płaskiego elementu stalowego na ograniczenie naprężeń normalnych w tymże elemencie stalowym oraz możliwości zastosowania dostępnych analitycznych metod obliczeniowych w celu prawidłowego określenia poziomu wzmocnienia można wyciągnąć następujące wnioski:

- niewielka ilość wyników wpływa na brak możliwości stwierdzenia rzeczywistego wpływu wzmocnienia na ograniczenie naprężeń;
- uzyskane wyniki wzmocnienia różniły się od zakładanych wstępnie teoretycznie poziomów;
- wykonane badania pokazały, że wzmocnienie próbki z wykonanym ścięciem odwrotnym końca kompozytu z wpływem kleju (Typ 3) podnosi nośność złącza stal-CFRP;

- wykonanie ścięcia odwrotnego końca kompozytu z wpływem kleju dało najlepsze z uzyskanych wyników ograniczenia naprężeń w stali;
- w stosunku do wyników próbek, których wyniki okazały się odwrotne od zakładanych (Typ 1) należy podchodzić ze świadomością małej ilości zbadanych próbek oraz wpływu na wyniki możliwości złego wykonania oprzyrządowania próbek;
- próba wdrożenia istniejących metod obliczeniowych stosowanych do obliczania przekrojów idealnie zespolonych nie dała satysfakcjonujących wyników, które mimo osiągnięcia wzmocnienia (Typ 2 i Typ 3) nie osiągnęły wyznaczonych teoretycznie poziomów.

5. Podsumowanie

Istniejące metody analityczne stosowane do obliczania przekrojów zespolonych [1] nie dają satysfakcjonujących poziomów pewności projektowania złącza stal-CFRP przy obliczaniu ograniczania naprężeń płaskich elementów stalowych wzmocnionych przyklejoną taśmą CFRP. Ścinanie końca kompozytu z nadmiarem kleju, można zaproponować w celu podniesienia nośności w złączu klejowym, co potwierdza badania autorów opisane w pracy [2].

Niezbędnym będzie wykonanie obliczeń numerycznych opisanych typów wzmocnienia płaskich elementów na zginanie. Należy określić czy metoda elementów skończonych pozwoli na uzyskanie zbliżonych do otrzymanych w badaniach wyników wzmocnienia. Należy określić rozkłady naprężeń w skleinie w zależności od geometrii skleiny, przydatne do celów projektowych, porównując analityczne i numeryczne rozwiązania tego problemu.

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).

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