



MACIEJ KOWAL¹⁾
MAREK ŁAGODA²⁾

STRENGTHENING OF STEEL STRUCTURES WITH CFRP STRIPS

WZMACNIANIE KONSTRUKCJI STALOWYCH TAŚMAMI KOMPOZYTOWYMI CFRP

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością stosowania przyklejonych kompozytów CFRP jako materiałów odpowiednich do wzmacniania konstrukcji stalowych. Na podstawie przeprowadzonych badań osiowego rozciągania złącz z obustronną nakładką, próbek o ośmiu typach zakończenia złącza, autorzy wytypowali połączenia o najlepszej wytrzymałości. Przebadano wpływ przyklejenia taśmy kompozytowej do 16 dwuteowników stalowych na ich nośność, określono efektywną długość zakotwienia oraz wpływ grubości warstwy kleju i modułu sprężystości taśmy kompozytowej na nośność systemu stal-klej-kompozyt. Badania pokazały, że przyklejone taśmy kompozytowe CFRP mogą podnieść wytrzymałość na zginanie konstrukcji stalowych (uzyskany wzrost 8%), a kształtowanie zakończenia skleiny znacząco wpływa na wytrzymałość systemu kompozyt-klej-stal (różnica nawet 57%).

SŁOWA KLUCZOWE: kompozyty FRP, konstrukcje stalowe, kształtowanie złącza, wzmacnianie.

ABSTRACT. The paper presents the results of research on the suitability of externally bonded composite strips of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) for post-strengthening of steel structures. Specimens with the strips applied on both sides (double cover joints) were prepared and subjected to axial tension tests to find which of the eight different configurations of end detailing provides the strongest bond. The strengthening effect of externally bonded composite strips was tested on sixteen steel I-beams, including determination of the effective bond length and the effects of the thickness of adhesive layer and modulus of the CFRP strip on the load capacity of the steel-adhesive-CFRP strip assembly. The research showed that externally adhered CFRP strips can increase the bending strength of steel structures (an 8% increase was obtained in the experiments) and the shape of spew fillet can have a significant influence on the strength of the strengthened system (the difference reaching up to 57%).

KEYWORDS: end detailing, FRP composites, steel structures, strengthening.

DOI: 10.7409/rabd.017.006

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin; m.kowal@pollub.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mlagoda@ibdim.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Obiekty budownictwa mostowego i przemysłowego, których część stanowią konstrukcje stalowe, z biegiem czasu podlegają stopniowej degradacji i niszczeniu. Wiele obiektów użytkowanych dzisiaj to konstrukcje stare. Do stalowych obiektów mostowych zaliczają się kolejowe i drogowe mosty kratownicowe, blachownicowe lub łukowe, ale również kładki dla pieszych, mosty o konstrukcji pomostu ortotropowego czy konstrukcje z ustrojem nośnym zespolonym stalowo-betonowym. Do konstrukcji przemysłowych należą słupy, dźwigary blachownicowe i kratowe (służące, jako oparcie stropów lub dachów hal) oraz wieże, maszty i kominy. Część spośród wyżej wymienionych obiektów wymaga wzmocnienia, co wynika zarówno ze wzrostu wielkości obciążeń użytkowych, jak również obniżenia nośności obiektów. Na pogorszenie się stanu konstrukcji wpływa negatywnie działanie warunków atmosferycznych w czasie, a także zaniedbania konserwacyjne, nieprawidłowe utrzymanie czy wandalizm. W wielu przypadkach obniżenie zdolności eksploatacyjnych odnosi się jedynie do konkretnych elementów konstrukcji i bardziej efektywnym ekonomicznie może okazać się rozważenie odnowy lub wzmocnienia tych elementów, niż rozbiórki i odbudowy całego obiektu. W przypadku mostu, z reguły, odnowa zajmuje mniej czasu, może być przeprowadzona tylko przy ograniczeniu eksploatacji i dzięki temu znacznie redukuje zakłócenie użytkownika i koszty społeczne.

Projektowanie wzmocnienia konstrukcji mostowych jest trudną i bardzo ważną dziedziną działalności inżynierskiej. Zazwyczaj możliwe jest zastosowanie różnych sposobów i technologii naprawy. Jedną z metod jest użycie materiałów kompozytowych z polimerów wzmocnionych włóknami węglowymi (ang. *Carbon Fibre Reinforced Polymers*, CFRP), która jest obiecującą alternatywą do wykonywanych obecnie klasycznych metod wzmocniania konstrukcji stalowych. Kompozyty CFRP są niewrażliwe na korozję, charakteryzują się niską gęstością i bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie. Dodatkowo, technika doklejania zewnętrznych elementów kompozytowych jest stosunkowo prosta w aplikacji. W ostatnich kilku dekadach, użycie tych materiałów przysłużyło powstaniem obiecującej technologii napraw w inżynierii konstrukcyjnej, szczególnie przy wzmocnianiu konstrukcji betonowych, murowych i drewnianych. Zauważono również wzrost liczby aplikacji taśm kompozytowych w celu podniesienia nośności mostów stalowych [1-7]. W Polsce w ten właśnie sposób został wzmocniony most przez Wisłę w Chełmnie [8]. Kompozyty znalazły również szerokie zastosowanie w inżynierii lotniczej.

1. INTRODUCTION

Crossing structures and industrial buildings and structures which include steelwork parts are subject to gradual deterioration and destruction. Quite a number of them are old, yet still in use. Steel crossing structures include truss, steel plate and arch bridges carrying road and railway lines, as well as passenger traffic, orthotropic deck and steel-concrete composite deck structures. Industrial structures include steel columns, plate and truss girders (supporting floors or roofs of industrial buildings), towers, masts and stacks. Some of them require strengthening because of higher imposed loads and/or decreased load capacity. Deterioration of structures is caused by environmental factors, lack of or incorrect maintenance and acts of vandalism. In many cases decreased performance is limited to specific parts of the structures making renewal or strengthening of these parts a more cost-effective option as compared to dismantling and reconstruction of the entire structure. In the case of bridges renewal as a rule takes less time and can be done with the bridge remaining partly operational, thus reducing disturbance and social cost.

Designing of such strengthening is a challenging task and a very important part of engineering. In most situations there are quite a number of methods and technologies to choose from. One of them is based on carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strips – a promising alternative to currently used conventional steelwork strengthening methods. CFRP laminates demonstrate corrosion resistance, low density and excellent tensile strength. Besides it is quite easy to fasten the strips to the surface. A few decades of practical application allowed to develop a most promising structural repair technology, particularly suitable for repairing concrete, masonry and timber structures. Moreover, composite strips are increasingly used as a measure to increase the load capacity of steel bridges [1-7]. An example of such application in Poland is the bridge over the Wisła (Vistula River) in Chełmno [8]. Another field of application of composite laminates is aviation engineering.

While the use of FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures has been investigated in a number of research projects, there is a relatively small number of papers on strengthening of steel structures with externally bonded FRP composites. There are many issues yet to be investigated, including in particular the behaviour of steel/CFRP interface.

Zagadnienie wzmocnienia konstrukcji betonowych i murew z użyciem kompozytów FRP stanowiło temat licznych badań, natomiast potencjał zewnętrznie przyklejanych kompozytów FRP do wzmocnienia konstrukcji stalowych został zbadany w stosunkowo niewielkim zakresie. Wiele aspektów musi być jeszcze rozpoznanych, szczególnie zachowanie klejowego złącza pomiędzy stalą i CFRP.

2. CELE I PROGRAM BADAWCZY

2.1. UWAGI OGÓLNE

W celu potwierdzenia możliwości stosowania przyklejanych materiałów kompozytowych, jako metody na podniesienie nośności konstrukcji stalowych, w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej uruchomiono specjalny program badawczy. Analizie poddano kompozytowe taśmy węglowe. Wzmocnienie konstrukcji stalowych przez doklejenie kompozytów CFRP wymaga doboru odpowiedniego kleju, właściwego przygotowania klejonych powierzchni, określenia optymalnej długości wiązania oraz wyboru sposobu i typu zakotwienia taśm w celu uzyskania optymalnego złącza pomiędzy sklejanymi materiałami. Badania laboratoryjne zostały podzielone na trzy etapy. W pierwszym etapie dokonano porównania różnych typów geometrii zakończenia taśmy i kleju w złączu. Na podstawie [9-14], odrzucono te, które były trudne do wykonania w rzeczywistych warunkach budowlanych. Na podstawie badań osiowego rozciągania złącz z obustronną nakładką określono, które spośród analizowanych złącz o różnej geometrii zakończeń posiadają najwyższą wytrzymałość. Badanie przeprowadzono na ośmiu typach zakończenia złącza wykonanych na 78 próbkach. Celem badań było określenie wpływu ukształtowania kleju i taśmy na jej końcu w skleinie na wytrzymałość złącza i postać zniszczenia rozciąganego złącza klejowego. W drugim etapie dokonano weryfikacji dotychczasowych wyników badań, polegającej na sprawdzeniu trzech zakończeń wybranych z ośmiu użytych w pierwszej fazie badań. Sprawdzenie przeprowadzono na 18 wzmocnionych płaskownikach stalowych poddanych trójpunktowemu zginaniu. W rzeczywistej konstrukcji trudno znaleźć zginany element płaski, jednakże zginanie ze stosunkowo dużą siłą przyłożoną w środku rozpiętości, pozwoliło na potwierdzenie prawidłowości wcześniejszych założeń wpływu kształtowania zakończenia złącza na nośność systemu stal-klej-kompozyt.

W trzecim etapie zbadano wpływ przyklejenia taśmy kompozytowej na podniesienie nośności wzmocnianych dwuteowników. W tej fazie poszukiwano również wartości efektywnej długości zakotwienia oraz rozpatrywano wpływ

2. OBJECTIVES AND PROGRAM OF RESEARCH

2.1. GENERAL NOTES

In order to verify the suitability of externally bonded composite materials for strengthening steel structures a special research project was launched at the Laboratory of Civil Engineering at the Technical University of Lublin. The analysed material were carbon reinforced polymer strips. The factors relevant to obtaining optimal bond performance of externally bonded CFRP strips include selection of appropriate adhesive, preparation of mating surfaces, optimal bond length and the method and type of bonding. The laboratory experiments were carried out in three stages. Stage 1 verified the influence of end detailing of the CFRP strip and the spew fillet. Geometries difficult to obtain in field as reported in [9-14] were excluded from consideration. Specimens with the strips applied on both sides were subjected to axial tension tests to find the end detailing which provides the highest bond strength. The total number of 78 specimens were prepared with eight types of end detailing. The objective was to determine the effect of end geometry of both the bond layer and of the strip on the joint strength and failure mode under tension. In Stage 2 the results obtained in Stage 1 were validated on three out of the eight initially used end detailing configurations. The validation tests were carried out on eighteen CFRP strengthened steel flat bars subjected to three point bend test. While it would be difficult to find a flat element subjected to bending in real-life structures the tests in which quite a large force is applied at the mid-length allow verification of the previously assumed influence of the end detailing on the overall strength of the steel-adhesive-CFRP strip assembly.

The objective of Stage 3 was to check the strengthening effect of the externally bonded composite strip on the load capacity of the tested I-beam. This included determination of the effective bond length and the effect of the bond layer thickness and the strip modulus of elasticity on the system performance. The tests were carried out for three bond layer thicknesses, three bond lengths and CFRP strips with E -modulus of 168 GPa and 210 GPa respectively. The total number of sixteen strengthened steel I-beams were subjected to four-point bending test. In all 3 Stages the strips were bonded at the test temperature of 22°C and 22-35% RH of air. The effect of temperature and humidity of ambient air during bonding on the bond

grubości warstwy kleju i modułu sprężystości taśmy kompozytowej na nośność układu wzmocnienia. Rozpatrzono trzy grubości kleju, trzy długości zakotwienia oraz zastosowano taśmy kompozytowe o dwóch różnych modułach sprężystości (168 GPa i 210 GPa). Badanie przeprowadzono na 16 wzmocnionych dwuteownikach stalowych poddanych czteropunktowemu zginaniu. Klejenie próbek i badania przeprowadzono przy temperaturze otoczenia 22°C i wilgotności powietrza 22-35% dla wszystkich trzech etapów. W przeprowadzonych badaniach nie rozpatrywano wpływu temperatury klejenia próbek i wilgotności powietrza na wytrzymałość złącza klejowego. Wpływ tych warunków będzie rozpatrywany w kolejnych badaniach.

2.2. MATERIAŁY UŻYTE W BADANIACH

Kompozyty węglowe (CFRP) zastosowane w badaniach laboratoryjnych to laminowane taśmy średnio modułowe (168 GPa) i wysokomodułowe (210 GPa). Do badań użyto taśm S&P Lamelle CFK 150/2000 oraz S&P Lamelle CFK 200/2000 o szerokości 50 mm i 60 mm oraz grubości 1,4 mm. W pierwszym etapie prac do badań wykorzystano płaskowniki stalowe o przekroju 50 x 10 mm ze stali klasy S235/S275JR+AR o granicy plastyczności 318 MPa i wytrzymałości na rozciąganie 465 MPa. W drugim etapie użyto płaskowników stalowych o przekroju 100 x 12 mm ze stali S235JR+AR o granicy plastyczności 308 MPa i wytrzymałości na rozciąganie 432 MPa. W trzecim etapie badań wykorzystano dwuteowniki INP 140 ze stali klasy S235JR+M o granicy plastyczności 297÷321 MPa i wytrzymałości na rozciąganie 442÷466 MPa. Właściwości wytrzymałościowe elementów stalowych do badań uzyskano z atestów podanych przez producentów materiałów. Moduł Young'a oraz odkształcenie przy uplastycznieniu elementów stalowych przyjęto na poziomie odpowiednio 206 GPa oraz 0,2%.

We wszystkich fazach badań użyto jednego kleju systemu, S&P Resin 220. Jest to dwuskładnikowy, bezrozpuszczalnikowy klej na bazie żywicy epoksydowej. Klej ten jest stosowany do przyklejania taśm z włókien węglowych, płaskowników stalowych, mat z włókien węglowych i szklanych oraz sklejanie elementów betonowych, stalowych i drewnianych. Wytrzymałość na odrywanie kleju $\geq 14,0$ MPa (na stali), wytrzymałość na ścinanie $\geq 26,0$ MPa, moduł sprężystości $\geq 7,1$ GPa.

2.3. PIERWSZY ETAP BADAŃ

W pierwszym etapie poszukiwano optymalnej geometrii zakończenia spoiny. W tym celu przygotowano 8 typów próbek (Rys. 1), różniących się kształtem zakończenia kleju

strength was not checked under this research. Their effect will be investigated in further research projects.

2.2. MATERIALS USED IN THE TESTS

The strengthening material used in the laboratory experiments were normal and high modulus (168 and 210 GPa respectively) laminate strips of carbon fibre reinforced polymer (CFRP): S&P Lamelle CFK 150/2000 and S&P Lamelle CFK 200/2000, 50 mm and 60 mm wide and 1.4 mm thick. The strengthened material used in Stage 1 were 50 x 10 mm steel flat bars made of S235/S275JR+AR steel with yield point of 318 MPa and tensile strength of 465 MPa. In Stage 2 the strengthened material was changed to 100 x 12 mm steel flat bars made of S235JR+AR steel with yield point of 308 MPa and tensile strength of 432 MPa. The material used in Stage 3 were INP 140 I-beams made of S235JR+M steel with yield point of 297-321 MPa and tensile strength of 442-466 MPa. The strength properties of the steel materials were as declared by their manufacturers. Young's modulus and yield strain of steel elements were taken at 206 GPa and 0.2% respectively.

S&P Resin 220 – a two-component, solvent-free epoxy resin adhesive was used in all the testing Stages. It is an adhesive specifically designed for bonding carbon fibre strips, steel flat bars, carbon fibre cloth and glass fibre matting and for bonding concrete, steel and timber elements. It has a tensile strength of at least 14.0 MPa (on steel), shear strength of at least 26.0 MPa and modulus of elasticity of at least 7.1 GPa.

2.3. STAGE 1 OF THE EXPERIMENTAL PART OF RESEARCH

The objective of the Stage 1 was to find optimum spew fillet detailing. Eight types of specimens were prepared (Fig. 1) with different spew fillet and/or strip end shapes and were subjected to axial tension test. The numbers of specimens of a given type (type 8 – 6 No., types 1, 3, 5 and 7 – 9 No. each, types 2, 4 and 6 – 12 No. each, giving the total number of 78 prepared and tested specimens) were such that consistency with the results reported in the literature could be established. Each specimen was composed of two 200 x 50 x 10 mm steel flat bars connected with 60 x 50 x 1.4 mm cover plates of CFRP laminate strips applied on both sides. The CFRP laminate strips were offset between the sides to obtain the asymmetric joint. Bond length was 20 mm on the first and 40 mm on the other flat piece. The purpose of varying the bond length between the

i/lub taśmy kompozytowej i poddano osiowemu rozciąganiu. Liczba próbek w danym typie wynikała z poszukiwania zbieżności wyników z poznanymi w literaturze. Do badań przyjęto następującą liczbę próbek: 6 sztuk – typ 8, po 9 sztuk – typ 1, 3, 5 i 7 oraz po 12 sztuk – typ 2, 4 i 6, łącznie wykonano i przebadano 78 próbek. Każda próbka składała się z dwóch płaskowników stalowych ($200 \times 50 \times 10$ mm) połączonych ze sobą za pomocą przyklejonych obustronnie nakładek z taśm węglowych o wymiarach $60 \times 50 \times 1,4$ mm. Nakładki kompozytowe przyklejone były do płaskowników niesymetrycznie względem szczeliny pomiędzy nimi. Zakotwienia taśmy na płaskownikach wynosiły 20 mm i 40 mm. Zróznicowanie długości zakotwienia miało na celu wymuszenie zniszczenia próbki w miejscu krótszego wiązania nakładek do płaskowników.

2.4. DRUGI ETAP BADAŃ

W drugim etapie sprawdzono wyniki doboru optymalnej geometrii zakończenia przyklejonej taśmy i samego kleju. W tym celu przygotowano 19 próbek i poddano trójpunktowemu zginaniu, w tym wykonano jedną próbkę porównawczą z płaskownika stalowego ($1000 \times 100 \times 12$ mm) oraz 18 próbek z trzema typami wzmocnienia (po 6 próbek w przypadku każdej geometrii zakończenia wzmocnienia). Do badań w drugim etapie wybrano zakończenia, które w pierwszym etapie eksperymentu oznaczono 1, 2 i 6 (w tym etapie odpowiednio 1, 2 i 3), a ich geometria zakończenia taśmy wzmacniającej i kleju, zdaniem autorów, miała wpływ na wytrzymałość złącza klejowego. Rys. 2 pokazuje schematy ukształtowania zakończeń kleju i taśmy. Każda wzmocniania próbka składała się z płaskownika stalowego ($1000 \times 100 \times 12$ mm) z przyklejoną za pomocą żywicy epoksydowej do dolnej płaszczyzny taśmą węglową ($600 \times 60 \times 1,4$ mm). Rozpiętość teoretyczna zginanych wzmocnionych płaskowników wynosiła 900 mm.

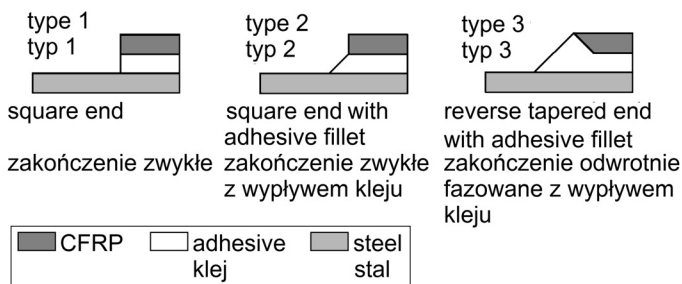


Fig. 2. Spew fillet shapes

Rys. 2. Schematy kształtów zakończenia skleiny

two pieces was to induce failure on the side with the shorter bond length.

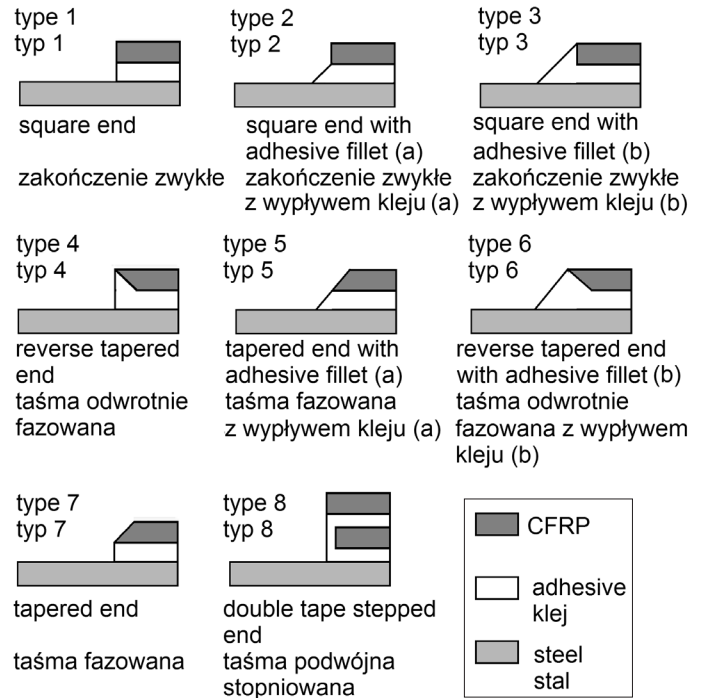


Fig. 1. Types of end detailing

Rys. 1. Schematy kształtów zakończenia spoiny

2.4. STAGE 2 OF THE EXPERIMENTAL PART OF RESEARCH

The purpose of Stage 2 was to validate the chosen optimal shapes of the strip end and spew fillet. Nineteen specimens were prepared and subjected to three-point bending test, including one control made of $1000 \times 100 \times 12$ mm flat bar and eighteen test specimens with three types of strengthening (6 No. for each type of end detailing). For Stage 2 end detailing types designated 1, 2 and 6 were chosen (now designated 1, 2 and 3) as the shapes of the strip end and spew fillet which in the authors' opinion influenced the bond strength. The types of end detailing of the spew fillet and the CFRP strip are illustrated in Fig. 2. Each strengthened specimen was composed of $1000 \times 100 \times 12$ mm flat bar with $600 \times 60 \times 1,4$ mm CFRP laminate strip bonded to the bottom surface of the bar. The effective span of strengthened flats subjected to the bending test was 900 mm.

2.5. TRZECI ETAP BADAŃ

W trzecim etapie badań określono wpływ parametrów złącza klejowego i taśmy wzmacniającej na nośność układu wzmocnienia. W tym celu zbadano kilka rozwiązań, które wpływają ogólnie na wzmocnienie. Sprawdzone jaki wpływ na nośność mają:

- geometria zakończenia przyklejonej taśmy i kleju,
- długość taśmy kompozytowej (przez to długość zakotwienia),
- moduł sprężystości taśmy kompozytowej,
- grubość kleju.

W tym celu przygotowano 19 próbek i poddano czteropunktowemu zginaniu. Wykonano 3 próbki porównawcze i 16 próbek wzmocnionych. Każda wzmocniona próbka składała się z dwuteownika INP 140 o rozpiętości teoretycznej 1,90 m z przyklejoną do dolnej półki taśmą kompozytową. Przygotowano 8 typów próbek różniących się kształtem zakończenia kleju i taśmy kompozytowej (Z – zwykle – odpowiednik oznaczenia „typ 1” w pierwszym etapie lub F – odwrotnie fazowane z wypływem kleju – odpowiednik oznaczenia „typ 6” w pierwszym etapie), długością taśmy kompozytowej (800 mm, 1000 mm i 1200 mm), modułem sprężystości taśmy kompozytowej (168 GPa lub 210 GPa) oraz grubością kleju. Liczba próbek wynosiła 2 lub 3 sztuki w danym typie. Rys. 3 przedstawia schemat próbki wraz z obciążeniem.

3. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

3.1. WYNIKI BADAŃ PIERWSZEGO ETAPU

Osiągnięto oczekiwany cel badań, którym było określenie geometrii zakończenia taśmy i skleiny w złączu, które wpływają na uzyskanie wysokich nośności złącza. Wyciągnięto następujące wnioski [15]:

- Nośność układu zależy od odpowiedniego przygotowania powierzchni klejonych oraz przygotowania zakończenia taśm kompozytowych. Oczyszczenie powierzchni stalowej i taśmy kompozytowej jest tak samo ważne jak i odpowiednie przycinanie taśm kompozytowych (niepowodujące strzępienia powierzchni ciętych) oraz odpowiednie mieszanie składników kleju (czas, proporcje).
- Przy zastosowaniu zakończenia typu 1, tj. zwykłego, nadmiar kleju ma widoczny wpływ na podniesienie nośności złącza. Przy konfiguracji typu 2 (taśma zwykła z wypływem trójkątnym kleju) nośność w stosunku do konfiguracji typu 1 (zakończenie zwykle) wzrosła o 45,6%. W przypadku konfiguracji typu 3 nośność zmalała o 1,4%, może to jednak świadczyć o błędnie przygotowanych próbkach.

2.5. STAGE 3 OF THE EXPERIMENTAL PART OF RESEARCH

The aim of Stage 3 was to check the influence of the bond layer and strip parameters on the strengthening effect of CFRP strip/adhesive system. A few different configurations of parameters relevant to the overall strength were identified. These are:

- end detailing of the strip and the spew fillet,
- strip length (defining the bond length),
- modulus of elasticity of the CFRP strip,
- bond layer thickness.

Nineteen specimens were subjected to four point bending, including three controls and sixteen test specimens. Each test specimen was made of INP 140 I-beam of 1.90 m effective span (between support centres) with the laminate strip bonded to the bottom flange. The specimens were of eight types with different spew fillet and strip end detailing (Z – square and F – with reverse taper and spew fillet corresponding to types No. 1 and No. 6 of Stage 1), different laminate strip lengths (800 mm, 1000 mm and 1200 mm), different values of the modulus of elasticity (168 GPa and 210 GPa) and different bond layer thickness. There were two or three specimens per each type of detailing. The specimen and load application set-up is schematically presented in Fig. 3.

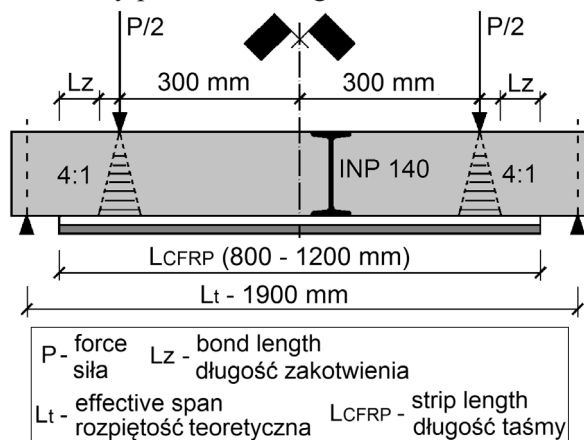


Fig. 3. Schematic of the Stage 3 test set-up
Rys. 3. Schemat próbki w trzecim etapie badań

3. RESULTS OF LABORATORY EXPERIMENTS

3.1. STAGE 1 RESULTS

This goal of Stage 1 was to determine the types of strip and spew fillet detailing which provide the highest joint capacity

- Użycie odwrotnego fazowania taśmy miało korzystny wpływ na nośność złącza. Bez stosowania nadmiaru kleju (typ 4), nośność wzrosła o 35% w stosunku do typu 1. Przy zastosowaniu nadmiaru kleju na końcu, nośność złącza wzrosła o 57% (typ 6). Ze względu na osiągnięte wyniki była to najkorzystniejsza geometria zakończenia złącza.

W Tabl. 1 zestawiono wyniki średnich sił niszczących próbki pierwszego etapu.

Zniszczenie złącza klejowego pomiędzy stalą a kompozytem może przyjąć różną postać. Najczęściej podczas badań zauważono oderwanie nakładki na granicy stal-klej. Liczba zaobserwowanych próbek zniszczonych poprzez oderwanie nakładki na granicy styku kleju i taśmy kompozytowej była niewielka w stosunku do całkowitej liczby próbek.

Table 1. Statistically robust values $F_{av,r}$ and $F_{95\%,r}$ after discarding the results falling outside the adopted 5% deviation interval (referenced to $F_{av,r}$)

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

No. Lp.	Specimen type Typ próbki	$F_{av,r}$ $F_{sr,m}$ [kN]	$F_{95\%,r}$ $F_{95\%,m}$ [kN]	$F_{av,r,i}/F_{av,r,1}$ $F_{sr,m,i}/F_{sr,m,1}$ [%]	$F_{av,r,i}-F_{av,r,1}$ $F_{sr,m,i}-F_{sr,m,1}$ [%]	$F_{95\%,r,i}/F_{95\%,r,1}$ $F_{95\%,m,i}/F_{95\%,m,1}$ [%]	$F_{95\%,r,i}-F_{95\%,r,1}$ $F_{95\%,m,i}-F_{95\%,m,1}$ [%]
1	8	20.6	16.4	84.7	-15.3	75.2	-24.8
2	3	24.0	17.2	98.6	-1.4	78.7	-21.2
3	7	28.0	19.1	115.1	15.1	87.6	-12.4
4	1	24.3	21.8	100.0	0.0	100.0	0.0
5	4	32.8	26.0	135.2	35.2	119.4	19.4
6	5	34.8	27.2	143.4	43.4	125.0	25.0
7	2	35.4	27.5	145.6	45.6	126.2	26.2
8	6	38.3	28.5	157.7	57.7	131.0	31.0

values. The following conclusions were drawn from the test results [15]:

- The overall strength of the system depends on the preparation of the mating surfaces and the CFRP strip ends. Cleaning of the steel and laminate strip surfaces is as important as clean cut edges (to prevent unravelling of fabric) and appropriate mixing of the adhesive components (time, proportion).
- The effect of spew fillet on the joint strength is clearly evident in type 1 detailing ("square"). Type 2 end detailing (square end of strip and triangular spew fillet) exhibited a 45.6% increase in the joint strength as compared to Type 1 (square end detailing). On the other hand, Type 3 exhibited a 1.4% decrease in the strength which, however, can be attributed to inadequately prepared specimens.
- Reverse taper had a favourable effect on the joint strength. Without the spew fillet (Type 4) the strength of joint with reverse taper at the strip end was by 35% higher in comparison to Type 1 detailing. With the spew fillet in place, the strength was higher by 57% (Type 6). According to the experimental results the last type of detailing had the most favourable effect on the joint strength.

The breaking forces obtained for Type 1 specimens are given in Table 1.

3.2. WYNIKI DRUGIEGO ETAPU BADAŃ

Podczas drugiego etapu prac w badanych 17 próbkach zaobserwowano występowanie jednej postaci zniszczenia próbek. Nastąpiło oderwanie nakładki na granicy stal-klej. W przypadku jednej próbki, taśma nie oderwała się podczas badania. Test w przypadku tej próbki został zakończony po uplastycznieniu się stali płaskownika. W pozostałych próbkach zniszczenie przez oderwanie taśmy było gwałtowne. Nie udało się zaobserwować, czy zniszczenie rozpoczynało się w środku

The steel/laminate bond can fail in different ways. The most frequent failure mode was debonding of the CFRP strips at the steel/adhesive interface. The number of specimens which failed in a different way, i.e. by debonding at the adhesive/CFRP strip interface was small in relation to the total number of specimens.

rozpiętości czy na końcu taśmy wzmacniającej. W drugim etapie, ponownie widoczny był wpływ typu geometrii zakończenia złącza na wytrzymałość wzmocnienia. W Tabl. 2 zestawiono wyniki średnich sił niszczących próbki. Drugi etap badań był jedynie technicznym etapem skontrolowania prawidłowości przyjęcia kształtów zakończeń skleiny i taśmy do dalszych badań. Ostatecznie zrezygnowano z rozpatrywania wykresów i przepływu naprężeń w taśmie i kleju, które rozpoznano szczegółowo w trzecim etapie.

Table 2. Adjusted deflection values at average breaking force $F_{av,r}$ with 95% confidence $F_{95\%,r}$ [16]
 Tablica 2. Zestawienie skorygowanych wyników ugięć przy średnich siłach niszczących $F_{sr,m}$ i sił niszczących z prawdopodobieństwem wystąpienia 95% $F_{95\%,m}$ [16]

Specimen type Typ próbek	$F_{av,r}$ $F_{sr,m}$ [N]	$F_{95\%,r}$ $F_{95\%,m}$ [N]	$\Delta F_{av,r}$ $\Delta F_{sr,m}$ [%]	$\Delta F_{95\%,r}$ $\Delta F_{95\%,m}$ [%]
1	1554	1228	–	–
2	2563	1752	64.9	42.7
3	3416	2195	119.8	78.7

3.3. WYNIKI TRZECIEGO ETAPU BADAŃ

W następnym etapie poddano badaniom 19 próbek, w tym 16 wzmocnionych przy różnych typach zakończenia taśmy i ukształtowania kleju w jej obrębie, trzech długościach taśmy, trzech grubościach kleju oraz dwóch modułach sprężystości taśmy kompozytowej CFRP. Badania czteropunktowego zginania przerywano po odspojeniu taśmy kompozytowej lub osiągnięciu na tłoku prasy siły 95 kN, która zapewniała uplastycznienie wzmocnionego taśmą CFRP dwuteownika stalowego w obszarze przyłożenia sił skupionych na górnej półce. Siły niszczące niewzmocnione dwuteowniki stalowe oscylowały około 76 kN. Wywołane tymi siłami momenty niszczące osiągnęły wartości 24,6÷24,8 kNm.

Analizując nośność struktury wzmocnienia konstrukcji stalowych z przyklejonymi taśmami kompozytowymi zaobserwowano występowanie dwóch głównych postaci zniszczenia próbek. Pierwszą było odspojenie taśmy kompozytowej na granicy kontaktu stal-klej. Ten sposób zniszczenia wzmocnienia dotyczył 12 próbek, jednakże w przypadku dwóch z nich (165.120.F.A.2 oraz 200.100.F.C.1), taśma dodatkowo uległa podłużnemu pęknięciu. Drugą zauważoną postacią zniszczenia było uplastycznienie stali dwuteownika, któremu nie towarzyszyło odspojenie taśmy. Sposób odspojenia taśm we wszystkich próbkach był zbliżony. W trzech z nich taśma odspoiła się całkowicie, w pozostałych tylko

3.2. STAGE 2 RESULTS

In Stage 2 tests the same mode of failure was observed for all the seventeen failed specimens, namely debonding at the steel/adhesive interface. One specimen did not fail, i.e. the strip has not detached during the test and load was increased up to the yield point of steel. In other cases failure by debonding occurred suddenly. We do not know, whether failure started at the mid-length or at the end of the strengthening material. Also in Stage 2 the influence of end detailing on strengthening effect of the system was evident. The average breaking forces are given in Table 2. The tests of Stage 2 were performed just to validate the choice of spew fillet and strip end detailing for further testing. Analysing of graphs and strip and bond stress propagation pattern was omitted and postponed to Stage 3.

3.3. STAGE 3 RESULTS

In Stage 3 nineteen specimens were used featuring sixteen types of end detailing of the strip and spew fillet shape, three strip lengths, three bond layer thicknesses and two E -moduli of CFRP strip. The four point bending test was carried out until either debonding of the strip occurred or 95 kN pressure was achieved on the press ram which was the yield point of CFRP strengthened steel I-beam at the load application point on the upper flange. The breaking force for steel I-beam specimens without CFRP strengthening was ca. 76 kN. The breaking moments generated by these forces were in the range of 24.6-24.8 kNm.

Two main failure modes were noted in the analysed CFRP strengthened steel structures. The first failure occurred by debonding of the CFRP strip at the steel-adhesive interface. This failure mode was noted on twelve specimens and in two of them (No. 165.120.F.A.2 and No. 200.100.F.C.1) the strip split lengthwise in addition. The second noted failure mode was yielding of the I-beam steel not accompanied by debonding of the CFRP strip. Debonding was similar in all specimens. In three of them the strip debonded completely and in the rest partly, yet sometimes on over 90% of the overall strip length. The debonding failure (peeling) occurred at the steel-adhesive interface. In the fillet area complete debonding was observed at the steel-adhesive

częściowo, chociaż zdarzało się, że odspojenie sięgało ponad 90% długości taśmy. Struktura wzmocnienia ulegała zniszczeniu adhezyjnemu (odspojeniu) na granicy stal-klej. Zaobserwowano zarówno całkowite odspojenie na granicy stal-klej w obszarze wypływu kleju przy odwrotnym fazowaniu taśmy oraz odspojenie z przejściem rysy przez wypływ kleju.

W badaniach laboratoryjnych określono siły niszczące dwuteowniki niewzmocnione oraz wzmocnione, jak również sposoby ich zniszczenia. Zestawienie wartości sił niszczących układ wzmocnienia przedstawiono w Tabl. 3.

interface on some specimens with reverse taper and in others debonding was accompanied by cracking of the spew fillet.

Breaking forces and failure modes were determined for both all I beam specimens: CFRP strengthened and controls. The values of breaking forces causing failure of the strengthening system are given in Table 3.

Table 3. Breaking forces and modes of failure
Tablica 3. Zestawienie sił niszczących i sposobów zniszczenia

No. Lp.	Sample designation Oznaczenie próbki	Maximum force Siła maksymalna [kN]	F_{sr}^{av} F_{sr} [kN]	Standard deviation Odchylenie standardowe [kN]	$F_{95\%,r}$ $F_{95\%,m}$ [kN]	Failure mode Rodzaj zniszczenia
1	Control 1 / Referencyjna 1	76.2	76.0	0.3	75.5	yielding of steel uplastycznienie stali
2	Control 2 / Referencyjna 2	76.0				yielding of steel uplastycznienie stali
3	Control 3 / Referencyjna 3	75.7				yielding of steel uplastycznienie stali
4	200.80.F.A.1	59.9	55.1	6.9	43.7	debonding odspojenie taśmy
5	200.80.F.A.2	50.2				debonding odspojenie taśmy
6	200.100.F.A.1	64.2	73.1	12.6	52.3	debonding odspojenie taśmy
7	200.100.F.A.2	81.9				debonding odspojenie taśmy
8	200.100.F.B.1	84.2	77.7	9.2	62.6	superplastic flow of steel płynięcie stali
9	200.100.F.B.2	71.2				debonding odspojenie taśmy
10	200.100.F.C.1	74.7	70.2	6.4	59.7	debonding odspojenie taśmy
11	200.100.F.C.2	65.7				debonding odspojenie taśmy
12	165.120.F.A.1	87.4	83.7	5.3	74.9	yielding of steel uplastycznienie stali
13	165.120.F.A.2	79.9				debonding odspojenie taśmy
14	200.120.Z.A.1	76.4	73.7	2.7	69.1	debonding odspojenie taśmy
15	200.120.Z.A.2	70.9				debonding odspojenie taśmy
16	200.120.Z.A.3	73.7				debonding odspojenie taśmy
17	200.120.F.A.1	91.8	91.8	1.3	89.7	yielding of steel uplastycznienie stali
18	200.120.F.A.2	93.0				yielding of steel uplastycznienie stali
19	200.120.F.A.3	90.5				yielding of steel uplastycznienie stali

W przypadku badanych wzmocnionych belek stalowych profile naprężeń ścinających w kleju były wyraźne. Równowaga sił wymaga, aby wszystkie podłużne naprężenia w taśmie CFRP były w pełni przekazywane do belki za pomocą spoiny klejowej, aby możliwe było pełne wykorzystanie wzmacniającego stal kompozytu CFRP. Większość profili średnich naprężeń ścinających wzdłuż taśmy CFRP, opracowanych na podstawie odczytanych odkształceń, wykazywało maksimum na końcu taśmy CFRP i minimum w środku rozpiętości belki. Po przekroczeniu naprężeń dopuszczalnych, maksymalne średnie naprężenia ścinające przemieszczały się w kierunku środka belki, malejąc w obszarze zakończenia taśmy z powodu uplastycznienia. Przykładowy wykres średnich naprężeń ścinających w skleinie na długości taśmy CFRP pokazano na Rys. 4.

3.4. EFEKTYWNA DŁUGOŚĆ ZAKOTWIENIA – TRZECI ETAP BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych laboratoryjnych badań, w których zginaniu poddano 16 belek wzmocnionych przyklejonymi taśmami kompozytowymi CFRP, rozpoznano gdzie w złączu między CFRP i stalą zachodzi transfer sił. Zastosowane długości zakotwienia wynosiły 65 mm, 165 mm oraz 265 mm. Wyniki wyznaczonych na podstawie pomiarów tensometrycznych średnie naprężenia ścinające w skleinie potwierdziły, że prawie wszystkie siły przekazywane z belki stalowej do taśmy kompozytowej przez skleinę, występują na długości do około 70 mm od końca taśmy CFRP. Otrzymane wartości pokrywają się z rezultatami badań opisanymi w cytowanej literaturze [17-19]. Najlepsze wyniki wytrzymałości układu wzmocnienia osiągnięto w przypadku próbek, w których długość zakotwienia taśmy wyniosła 265 mm. Tylko w przypadku tej długości zakotwienia udało się osiągnąć zniszczenie układu wzmocnienia spowodowanego uplastycznieniem stali przed odspojeniem taśmy (Tabl. 3).

3.5. EFEKTYWNOŚĆ SYSTEMU WZMOCNIENIA – TRZECI ETAP BADAŃ

Efektywność wzmocnienia została zdefiniowana jako zwiększenie nośności określone na podstawie odczytanych odkształceń z czujników tensometrycznych. Uzyskanie wyników pomiarów tensometrycznych z 18 próbek, w tym 16 wzmocnionych przy dwóch typach zakończenia taśmy i ukształtowania kleju w jej obrębie, trzech długościach taśmy, trzech grubościach kleju oraz dwóch modułach sprężystości taśmy kompozytowej, pozwala na obiecującą wstępną ocenę. Badania czteropunktowego zginania przerywano po odspojeniu taśmy kompozytowej lub zniszczeniu

CFRP strengthened steel beams exhibited evident shear stress profiles. The equilibrium of forces requires that in order to fully utilise the CFRP strengthening potential all longitudinal stresses generated in the CFRP strips must be fully transferred to the beam by the bond layer. Most of the profiles of average shear stresses in the lengthwise direction of CFRP strip, developed on the basis of recorded strains exhibited the maximum value at the strip and the minimum value at the beam mid-span. After exceeding the allowable stress, the maximum average shear stress moved towards the mid-span decreasing at the end of strip due to yielding. Fig. 4 shows an example of average shear stresses in the bond layer over the whole length of CFRP strip.

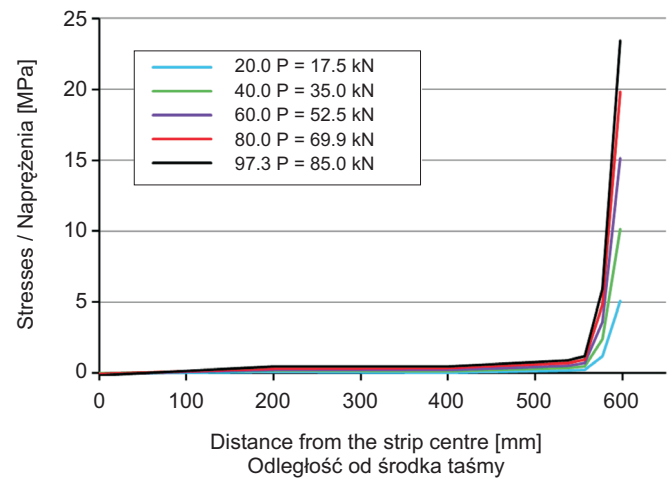


Fig. 4. Shear stresses over the CFRP strip bond length at different load levels for specimens type 165.120.F.A.1

Rys. 4. Wykresy średnich naprężeń ścinających w skleinie na długości taśmy CFRP (próbka 165.120.F.A.1) przy różnych poziomach obciążenia

3.4. EFFECTING BOND LENGTH – STAGE 3

The output of testing sixteen CFRP strengthened beams was used to find the location of force transfer location at the CFRP/steel interface. The bond lengths were 65 mm, 165 mm and 265 mm. The average shear stresses generated in the bond layer obtained from the tensometric measurement results confirmed that almost all forces transferred through the bond layer from the steel beam to the CFRP strip are located within the portion up to ca. 70 mm from the strip end. The values obtained in this research are consistent with the results given in the references [17-19]. The best strengthening effect was obtained for 265 mm bond length. Only for this length yielding failure preceded debonding of CFRP strip (Table 3).

dwuteownika stalowego. Zniszczenie dwuteowników stalowych rozpoczynało się poprzez lokalne zniszczenie górnej półki przez uplastycznienie w miejscach przyłożenia sił skupionych. Granicę plastyczności stali dwuteowników określono na $297\div 321$ MPa, zgodnie z kartami materiałowymi. Wyznaczone teoretycznie naprężenia na tym poziomie w przypadku dwuteownika INP 140 występują przy momentach zginających wartości $24,3\div 26,3$ kNm (odpowiednio siły 74,8 kN i 80,8 kN).

Na Rys. 5 pokazano krzywe obciążenie – przemieszczenie w środku rozpiętości próbek (oznaczonych 200.120.F.A), w odniesieniu do próbki referencyjnej. Zachowanie wzmocnionych belek jest pokazane liniami ciągłymi (czerwoną, niebieską i zieloną) znajdującymi się powyżej linii belki referencyjnej opisanej linią przerywaną. Różnice w nośności w zakresie sprężystym przedstawia pierwsza pionowa linia przerywana, a różnice w nośności po uplastycznieniu stali w próbkach pokazują pozostałe pionowe linie przerywane (w kolorach czerwonym, niebieskim i zielonym). Przemieszczenie w środku rozpiętości belki jest liniowe, aż do przekroczenia granicy plastyczności w stali, z wyjątkiem początkowej fazy obciążania belek dwuteowych do siły o wartości 6 kN. U szczytu krzywych, zachowanie staje się nieliniowe, aż do zniszczenia z powodu utraty sztywności przekroju, poprzez uplastycznienie półek belek pod miejscami przyłożenia sił i przekraczania granicy plastyczności w regionie czystego zginania. Wartość wzrostu nośności została odnotowana jako stała dla wszystkich próbek wzmocnionych taśmą wysokomodułową (210 GPa) i wynosiła około 8% w zakresie sprężystym. Zauważono jednakże, że wytrzymałości układów były zależne od długości zakotwienia i typu zakończenia złącza oraz grubości skleiny. Jedynie próbki z odwrotnym fazowaniem i wpływem kleju oraz długością wiązania równą 265 mm, przenosiły obciążenia aż do uplastycznienia stali. Pozostałe próbki uległy zniszczeniu poprzez odspojenie taśmy kompozytowej przed przekroczeniem granicy plastyczności.

Na wykresie znajdującym się na Rys. 6 przedstawiono przebieg linii opisujących odkształcenia na spodzie dolnej półki od przyłożonej do belki siły. Zlokalizowanie linii kolorowej powyżej czarnej przerywanej oznacza zwiększenie przenoszonej siły przy tych samych odkształceniach. Różnica w odkształceniach belki wzmocnionej i referencyjnej w stosunku do odczytanych odkształceń belki referencyjnej jest różnicą w poziomie nośności.

3.5. STRENGTHENING EFFECT – STAGE 3

The strengthening effect was defined as the increase in the load bearing capacity determined on the basis of strains measured with tensometric sensors. Tensometric measurements obtained on eighteen specimens including sixteen specimens with two different types of end detailing of both the strip and spew fillet, three strip lengths, three bond thicknesses and two different values of modulus of elasticity of CFRP strip allow for a quite well-supported preliminary evaluation. The four point bending test was carried out until debonding of the strip or I-beam failure. Failure of I-beams started by yielding of the top flange at the point of load application. The yield point of steel was taken from the I-beam product data sheets at 297-321 MPa. In INP 140 I-beam stresses at that level, according to calculations, are generated at bending moment of 24.3-26.3 kNm (caused by loads of 74.8 kN and 80.8 kN respectively).

Fig. 5 presents load vs. mid-span deflection curves of specimens designated 200.120.F.A in relation to control. The behaviour of strengthened beams is represented by solid lines (red, blue and green) located above the control curve plotted with a dashed line. The first vertical dashed line shows the bearing capacity differences in the elastic region and the other vertical dashed lines (red, blue and green) show the differences in bearing capacity after yielding of steel in the specimens. The mid-span deflection increases linearly up to the yield point of steel, except for the initial loading phase with the load increasing up to 6 kN. Non-linear behaviour starts at the apexes of curves continuing till failure due to loss of rigidity of the section caused by yielding failure of beam flanges at the load application points and exceeded yield point in the pure bending region. The increase of the load bearing capacity was constant for all the specimens strengthened with high-modulus strip (210 GPa) and it was ca. 8% in the elastic region. However, the overall capacity of the assembly was found to depend on the bond length, the type of end detailing and bond layer thickness. Yielding of steel occurred earlier than debonding only in the case of specimens with the strip end detailed with the reverse taper and spew fillet and 265 mm bond length. In the other specimens debonding occurred before reaching the yield point of steel.

The lines in the graph in Fig. 6 represent the bottom flange deflection caused by the load applied to the beam. An increase of the load transferred by the specimen at the same deflection is indicated by the colour line running above the black dashed line. The difference in the load bearing

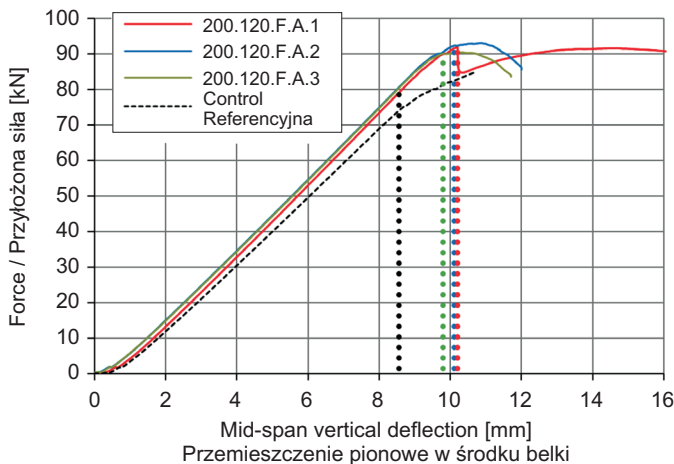


Fig. 5. Force vs. mid-span deflection for specimens type 200.120.F.A

Rys. 5. Wykres siła-przemieszczenie w środku rozpiętości próbek typu 200.120.F.A

4. ANALIZY TEORETYCZNE

W celu weryfikacji uzyskanych wyników laboratoryjnych, autorzy wykonali analizę nośności złącza klejowego pomiędzy wzmacnianą belką i taśmą wzmacniającą. Badanie skierowano na określenie naprężeń ścinających i normalnych (odrywających). Założenia oparto na przyjętych przez Smitha i Tenga [20] do przypadku żelbetowej belki wzmacnianej przyklejonym płaskownikiem stalowym lub taśmą kompozytową. Wyniki analiz wykraczają poza zakres niniejszego artykułu. Następnie, autorzy przeprowadzili wstępną analizę numeryczną w celu porównania zgodności wyników z badaniami laboratoryjnymi i metodą analityczną. Modele analizy MES zostały stworzone z zastosowaniem takich samych geometrii i parametrów wzmocnienia jak w badaniach laboratoryjnych. Rozkład naprężeń na długości skleiny oraz ich wartości maksymalne, zbadano szczegółowo w obszarze końca taśmy. Do weryfikacji wyników użyto programu ABAQUS®6.12-3. Szczegółowe wyniki analiz teoretycznych MES wykraczają poza zakres niniejszego artykułu.

W Tabl. 4 przedstawiono wyniki maksymalnych naprężeń ścinających uzyskanych na podstawie odkształceń pomierzonych w laboratorium (Zmierzone), obliczonych teoretycznie (Teoria) oraz metodą elementów skończonych (MES), dokonano również ich porównania. W Tabl. 5 zestawiono wyniki wartości maksymalnych naprężeń odrywających obliczonych w analizie teoretycznej (Teoria) i metodą elementów skończonych (MES) oraz dokonano ich porównania. Opis „Teoria Z” oznacza wyznaczanie naprężeń odrywających w próbkach metodą bez uwzględnienia

capacity is calculated as the difference in measured deflections between the strengthened beam and control divided by the control deflection.

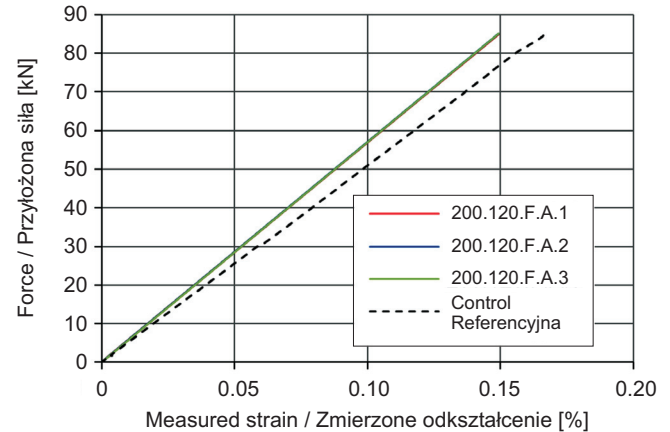


Fig. 6. Force vs. strain for specimens type 200.120.F.A (three lines A.1, A.2, A.3 overlap each other)

Rys. 6. Wykres siła-odkształcenie próbek typu 200.120.F.A (trzy linie A.1, A.2, A.3 pokrywają się)

4. THEORETICAL ANALYSES

In order to verify the laboratory results the authors analysed the strength of bond between the strengthened beam and the strengthening strip. The investigation focused on determining the shear and normal (peel) stresses. The input assumptions were based on the assumptions used by Smith and Tenga [20] for reinforced concrete beam strengthened with a steel flat or a strip of fibre-reinforced polymer. The results of these analyses are beyond the scope of this paper. Subsequently a numerical analysis was carried out to verify consistency between the laboratory results and the values obtained with the analytical method. Finite element models were built using the geometry and strengthening parameters of the test specimens. The distribution of stresses in the bond layer in the lengthwise direction and the maximum levels were investigated thoroughly in the end portion of the strip. ABAQUS®6.12-3 program was used for verification of results. The detailed results of the performed finite-element analyses are beyond the scope of this paper.

Table 4 gives the maximum shear stresses obtained on the basis of deflections measured at the laboratory, calculated and obtained in the finite element analysis. The verification included comparison of these values. Table 5 compiles the maximum peel stresses calculated and obtained in the finite-element analysis, including their comparison. Letters “F” and “Z” designate the type end detailing: with and without taper respectively.

fazowania, a „Teoria F” oznacza wyznaczanie naprężeń odrywających w próbkach z uwzględnieniem fazowania.

Table 4. Comparison of shear stress
Tablica 4. Porównanie wartości naprężeń ścinających

Specimen type Typ próbek	Measured Zmierzone [MPa]	Calculated Teoria [MPa]	FEA / MES		Measured / Calculated Zmierzone / Teoria [%]	Measured / Max. FEA Zmierzone / Maks. MES [%]	Calculated / Max. FEA Teoria / Maks. MES [%]
			strip/adhesive taśma-klej [MPa]	steel/adhesive stal-klej [MPa]			
165.120.FA	10.9	11.0	10.7	8.6	98.6	101.3	102.7
200.120.FA	9.4	12.5	12.3	9.9	75.2	76.8	102.1
200.120.ZA	7.9	14.4	12.3	14.0	54.9	56.3	102.6

Table 5. Comparison of peel stresses
Tablica 5. Porównanie wartości naprężeń odrywających

Specimen type Typ próbek	Calculated / Teoria		FEA / MES		Calculated Z / Max. FEA Teoria Z / Maks. MES [%]	Calculated F / Max. FEA Teoria F / Maks. MES [%]
	square zwykłe [MPa]	with reverse taper fazowane [MPa]	strip/adhesive taśma-klej [MPa]	steel/adhesive stal-klej [MPa]		
165.120.FA	8.4	2.4	2.4	5.1	165.9	47.2
200.120.FA	8.9	2.8	2.7	5.4	165.4	52.6
200.120.ZA	8.6	not applicable / nie dotyczy	6.2	19.0	54.9	not applicable / nie dotyczy

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie uzyskanych wyników badań laboratoryjnych, można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Doklejanie elementów CFRP do elementów stalowych jest efektywną metodą podnoszenia nośności konstrukcji stalowych, co pokazały w szczególności badania próbki z taśmami o długości 1,20 m przy odwrotnym fazowaniu taśmy i z wypływem kleju w zakończeniu złącza.
2. Odpowiednie ukształtowanie końca taśmy FRP lub kleju, ma wpływ na wytrzymałość układu wzmocnienia. W tym przypadku, punktem odniesienia są wartości sił, które układ stal-klej-taśma CFRP przenosił do momentu zniszczenia. Odwrotnie fazowana taśma z wypływem kleju wykazuje wyższe nośności od taśmy ze zwykłym zakończeniem bez wypływu kleju.
3. Grubość kleju ma wpływ na długość zakotwienia. Porównując trzy typy próbek o różnych grubościach kleju, ale tej samej długości zakotwienia zauważono wzrost nośności ze wzrostem grubości kleju do pewnej granicy. Na podstawie wyników laboratoryjnych można stwierdzić, że wystąpiła grubość miarodajna, której wartość wynosiła 1,3 mm. Zarówno powyżej, jak i poniżej tej grubości nośność systemu stal-klej-kompozyt była porównywalnie niższa. Autorzy zalecają stosowanie grubości kleju

5. FINAL CONCLUSIONS

The laboratory results allow us to draw the following conclusions:

1. Externally bonded CFRP strips are an effective strengthening measure for steel structures which was particularly evident in testing specimens strengthened with 1.20 long strips with a reverse taper and spew fillet at the end.
2. End detailing of the FRP strip and spew fillet are relevant to the strengthening effect of the system. The baseline in this case are the load values resisted by the steel-adhesive-CFRP strip assembly until failure. End detailing with a reverse taper and a spew fillet exhibited a higher load bearing capacity than the strip with square end and without a spew fillet.
3. The bond layer thickness is related to the bond length. Comparing three types of specimens with different thickness of the bond layer and the same bond length it was noted that bearing capacity increases with increasing thickness of adhesive up to a certain limit. Based on the results of experiments we can consider the thickness of 1.3 mm a robust value. Both above and below that value the bearing capacity of the steel-adhesive-CFRP strip assembly was comparably lower. Therefore, the

1,3 mm, jako dającą najlepsze wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych, jednakże dalsze badania w zakresie rozpoznania optymalnej grubości warstwy kleju muszą być prowadzone.

4. Określono efektywną długość zakotwienia na poziomie 265 mm.
5. Wartości maksymalne naprężeń uzyskane numerycznie, pokrywają się z wynikami uzyskanymi w laboratorium oraz w obliczeniach matematycznych.

Dalsze analizy powinny być skierowane w kilku kierunkach, tak aby rozwijać wiedzę i zwiększyć zaufanie do korzystania z taśm CFRP. Obszary badań mogą być następujące:

- Określenie trwałości układu wzmocnienia w warunkach środowiskowych.
- Opracowanie nieniszczących metod badawczych obliczenia wytrzymałości złącza.
- Określenie trwałości układu wzmocnienia pod obciążeniami dynamicznym i zmęczeniowym.
- Zbadanie wpływu wzmocnienia elementów stalowych sprężonymi taśmami CFRP.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. CNR-DT 202/2005, June 2007, CNR, Rome, Italy
- [2] *Luke S.*: Strengthening structures with carbon fibre plates case histories for Hythe bridge, Oxford and Qafco Prill tower, Qatar. NGCC first annual conference and AGM - Composites in construction, through life performance, Watford, UK, 2001
- [3] *Luke S.*: The use of carbon fibre plates for the strengthening of two metallic bridges of an historic nature in the UK. International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, vol. 2, Hong Kong, China, 2002, 975-983
- [4] *Moy S.S.J., Bloodworth A.G.*: Strengthening a Steel Bridge with CFRP Composites. ICE Proceedings - Structures and Buildings, **160**, 2, 2007, 81-93
- [5] *Farmer N., Smith I.*: King Street Railway Bridge - Strengthening of cast iron girders with FRP composites. 9th International Conference on Structural Faults and Repairs, London, UK, 2001
- [6] *Harries K.A.*: FRP International – the official newsletter of the International Institute for FRP in Construction, **8**, 3, July 2011 - website version, 17.11.2014
- [7] *Canning L., Farmer N., Luke S., Smith I.*: Recent Developments in Strengthening Technology and the strengthening/reconstruction decision. Conference on Railway Bridges Today and Tomorrow, Bristol, UK, 2006, 107-113
- [8] *Łagoda G., Łagoda M.*: Strengthening steel bridge across Vistula River in Poland. 33rd IABSE Symposium, Sustainable Infrastructure Environment Friendly, Safe and Resource Efficient, vol. 96, Bangkok, Thailand, 2009
- [9] *Tsai M.Y., Morton J.*: The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. Composite Structures, **32**, 1995, 123-131
- [10] *Lang T.P., Mallick P.K.*: Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. International Journal of Adhesion & Adhesives, **18**, 3, 1998, 167-177
- [11] *Stratford T.J., 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, Hong Kong, 2005, 453-458
- [12] *Valle'e T., Keller T.*: Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part 3 – effects of chamfers. Composites: Part B Engineering, **37**, 2006, 328-336

authors recommend 1.3 mm thickness at which the best results were obtained in the current experimental research, yet the research on the optimum thickness of adhesive must be continued.

4. The effective bond length was determined at 265 mm.
5. The maximum stress levels obtained through numerical analysis are consistent with the experimental results and calculations.

Multifaceted analyses are required to broaden the expertise and promote CFRP as a reliable construction material. The research could include for example:

- Determination of the system durability in field conditions.
- Development of non-destructive test method for calculating the bearing capacity of the joint.
- Determination of the strengthening system resistance to dynamic and fatigue loading.
- Testing the strengthening effect of prestressed CFRP strips applied on steel members.

- [13] *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 Engineering*, **39**, 4, 2008, 731-739
- [14] *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**, 3, 2009, 1413-1422
- [15] *Łagoda M., Kowal M.*: Wpływ kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość złącza stal-kompozyt FRP. *Budownictwo i Architektura*, **12**, 2, 2013, 39-46
- [16] *Łagoda M., Kowal M.*: Wzmacnianie płaskich, zginanych elementów stalowych materiałami kompozytowymi FRP. *Budownictwo i Architektura*, **13**, 2, 2014, 257-264
- [17] *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, 514-522
- [18] *Jiao H., Zhao X.L.*: CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-Walled Structures*, **42**, 7, 2004, 963-978
- [19] *Nozaka K., Shield C.K., Hajjar J.F.*: Effective bond length of carbon-fiber-reinforced polymer strips bonded to fatigued steel bridge I-girders. *ASCE Journal of Bridge Engineering*, **10**, 2, 2005, 195-205
- [20] *Smith S.T., Teng J.G.*: Interfacial stresses in plated beams. *Engineering Structures*, **23**, 7, 2001, 857-871