



KAMILA CÁBOVÁ¹⁾
 PAVEL RYJÁČEK²⁾
 ONDŘEJ HRÁSKÝ³⁾
 LUDVÍK KOLPASKÝ⁴⁾
 JAN VŮJTĚCH⁵⁾

FIRE TEST OF FRP MEMBERS APPLIED FOR THE RENOVATION OF A STEEL RAILWAY BRIDGE

BADANIA POŻAROWE ELEMENTÓW Z KOMPOZYTÓW FRP PRZEWIDZIANYCH DO WYKORZYSTANIA W RAMACH REMONTU WIADUKTU KOLEJOWEGO O KONSTRUKCJI STALOWEJ

STRESZCZENIE. Przedmiotem artykułu są badania pożarowe wyrobów z kompozytu FRP (polimeru zbrojonego włóknem szklanym), zabudowanych na wiadukcie kolejowym o konstrukcji stalowej. Na obiekcie o konstrukcji zbudowanej z dwóch głównych dźwigarów stalowych o rozpiętości 9,9 m z torowiskiem na podkładach drewnianych zabudowano cztery różne rodzaje płyt pomostowych z kompozytu FRP w obrębie podkładów i na wspornikach oraz systemy balustrad. Badane wyroby z FRP miały różne kształty geometryczne oraz klasę reakcji na ogień. Na podstawie wyników badań pożarowych stwierdzono możliwość wykorzystania w przewidzianym zastosowaniu wyłącznie elementów kratowych bez obudowy lub z obudową jednostronną lub dwustronną. Wykluczono elementy z żebrami usztywniającymi biegnącymi prostopadle do osi podkładów, gdyż mogą sprzyjać przenoszeniu ognia na kolejne podkłady. Wyklucza to możliwość ich stosowania na podkładach. Z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe nie ma żadnych ograniczeń dotyczących kształtu elementów balustrad mostowych. Dobrą charakterystykę odporności ogniowej wykazały nawet profile o klasie C reakcji na ogień, co oznacza brak konieczności stosowania krat ognioodpornych z osnową z żywicy fenolowej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono i zarekomendowano przydatność elementów z kompozytów FRP jako alternatywę dla konwencjonalnych materiałów stalowych wykorzystywanych w remontach kolejowych obiektów mostowych.

SŁOWA KLUCZOWE: badanie pożarowe, bezpieczeństwo pożarowe, klasa reakcji na ogień, obiekt kolejowy o konstrukcji stalowej, polimery zbrojone włóknem, remont obiektu.

ABSTRACT. The paper outlines the on-site fire tests of FRP (fibre-reinforced polymer) products applied to a steel railway bridge. The bridge consisting of two main steel girders with a span of 9.9 m, and with timber sleepers was mounted with four different FRP floor panels on sleepers, consoles and railing systems. The FRP products differed in shape, and reaction-to-fire class. The results of the fire tests showed that only grate elements or grids with one or both coated surfaces could be accepted. Ribbed elements with the ribs oriented perpendicular to the axis of the sleepers might contribute to the progressive spread of fire to other sleepers. That is why these elements are not permitted for floors on sleepers. The shape of elements for railing construction is not limited from the viewpoint of fire safety. Good behaviour after fire can be achieved even with the profiles of reaction-to-fire class C, so it is not necessary to use fire-resistant gratings with phenol resin. The present paper concludes that FRP equipment has proved to be a suitable, durable and technically well-grounded replacement for standard steel materials for renovation of railway bridges.

DOI: 10.7409/rabdim.018.002

KEYWORDS: class renovation, fibre-reinforced polymers, fire safety, fire test, steel railway bridge, reaction-to-fire.

¹⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Steel and Timber Structures, 7 Thákurova Street, 166 29 Prague, Czech Republic; kamila.cabova@fsv.cvut.cz (✉)

²⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Steel and Timber Structures; pavel.ryjacek@fsv.cvut.cz

³⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Steel and Timber Structures; ondrej.hrasky@fsv.cvut.cz

⁴⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Steel and Timber Structures; ludvik.kolpasky@fsv.cvut.cz

⁵⁾ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Steel and Timber Structures; jan.vujtech@fsv.cvut.cz

1. WSTĘP

Zasadniczym, bardzo istotnym elementem czeskiej sieci kolejowej są licznie występujące obiekty mostowe o konstrukcji stalowej. Uśredniony czas ich eksploatacji wynosi w przybliżeniu 73 lata i wiele z nich zbliża się do końca założonego okresu użytkowania [1]. W większości są one w niezadowalającym stanie technicznym. Najpowszechniejszym problemem jest korozja, której skutki widoczne są szczególnie na balustradach, czasami już niekompletnych. Ponadto profile stalowe balustrad oraz pomostu stają się często łupem złodziei. W tej sytuacji właściciel czeskiej infrastruktury kolejowej szuka nowych rozwiązań, które zapewnią zabezpieczenie przed kradzieżą elementów stalowych, zwiększą trwałość i zredukują koszty bieżących napraw.

Jako potencjalnie odpowiednie rozwiązanie zaproponowano wykorzystanie do napraw kolejowych obiektów mostowych materiałów wykonanych kompozytów FRP. Konieczne jest jednak uprzednie opracowanie zasad projektowania i sposobu wytwarzania oraz określenie istotnych właściwości materiałowych, takich jak niski moduł elastyczności oraz ortotropia. Przed zastosowaniem tych materiałów na szerszą skalę na obiektach infrastruktury kolejowej należy też sprawdzić ich podatność na działanie wysokich temperatur [2].

Sprawdzenie charakterystyki pożarowej wyrobów FRP zastosowanych na pomostach i balustradach jest istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ludzi uciekających przed ogniem oraz strażaków uczestniczących w akcji gaśniczej. Kompozyty FRP mogą też sprzyjać rozprzestrzenianiu ognia i zwiększać intensywność wydzielaniu dymu, jak również wytwarzać płonące krople powodujące zanieczyszczenie otoczenia obiektu [3]. W wyniku ustaleń z właścicielem infrastruktury kolejowej dla wyrobów z kompozytów FRP przewidzianych do zastosowania na obiektach o większym zagrożeniu pożarowym (z torowiskiem na drewnianych podkładach) wstępnie określono wymaganą klasę reakcji na ogień: B lub B_{fl} . Ograniczeń tego typu nie przewidziano dla obiektów o niskim zagrożeniu pożarowym (wykonanych z materiałów niepalnych). W zakresie intensywności występowania płonących kropli określono klasę d0, a w niektórych przypadkach d1 (klasyfikacja wg [4]).

W celu analizy ww. zagrożeń przeprowadza się badania terenowe, w ramach których weryfikuje się wstępną klasyfikację reakcji na ogień wyrobów z kompozytów FRP, sprawdza ich nośność w warunkach podwyższonej temperatury oraz przeprowadza kontrolę wzrokową powstawania płonących kropli. Opisane tutaj badanie wykorzystania kompozytu FRP do wykonania płyt pomostowych w obrębie podkładów i chodników oraz jako materiał balustrad na wiadukcie kolejowym

1. INTRODUCTION

There is a high number of bridges in the Czech railway network with steel structures which make a significant, and essential part of it. Their average age is 73 years, and many of them are approaching the end of their assumed lifetime [1]. The state of the bridges is generally not very good. Corrosion is the most widespread problem, especially on the railings, where the profiles are in some cases missing. The steel profiles on the railings and on the deck are also popular targets of thefts. The owner of the Czech railway infrastructure is therefore looking for new solutions, in order to prevent steel parts from stealing, increase durability and reduce maintenance costs.

For this purpose, the application of FRP materials has been put forward as a suitable solution for the reconstruction of railway bridges. However, it is necessary to determine how they should be designed and manufactured, as well as specific material parameters such as a low modulus of elasticity, and orthotropic material properties should be examined. Obviously, their sensitivity to elevated temperatures before large-scale application to the railway infrastructure should be observed [2].

The fire safety behaviour of FRP products on the floor, and on the railing system of bridges exposed to elevated temperatures ought to be checked to avoid threats to the life of people escaping from fires, and firemen in action. FRP material may also favour the spread of fire, and support the development of smoke and burning droplets, which can pollute the surrounding environment [3]. After discussions with the owner of the railway infrastructure, an initial recommendation for FRP products was made to set the reaction to fire on class B or B_{fl} for bridges with a higher risk of fire (bridges with wooden sleepers). No limitation is required for bridges with a low level of fire risk (bridges of non-inflammable materials). The droplets classification was set on d0, and in some cases on d1 (the classification follows [4]).

On-site demonstration fire tests are used for studying the threats mentioned above, verifying the reliability of the initial classification of the reaction of FRP products to fire, as well as the behaviour of the load-bearing capacity of FRP products at elevated temperatures including visual control of burning droplets. The application of FRP floor panels to sleepers, consoles and railing systems on the railway bridge tested here is a pilot application in the Czech Republic.

stanowi pilotażowe zastosowanie na terenie Republiki Czeskiej.

2. KONSTRUKCYJNE ZASTOSOWANIA KOMPOZYTÓW FRP

Kompozyty FRP znalazły szerokie zastosowanie w przebudowie i naprawie uszkodzonych konstrukcji [5]. Przykładem tego rodzaju zastosowań może być wzmacnianie stalowych, betonowych oraz drewnianych konstrukcji obiektów mostowych. Ponadto stanowią one atrakcyjną opcję przy remontach obiektów mostowych i innych zewnętrznych konstrukcji [6]. Dzięki swej wysokiej trwałości wyroby z kompozytów FRP stanowią idealne rozwiązanie w środowiskach agresywnych. W branży budowlanej kompozyty FRP stosowane są do wzmacniania konstrukcji betonowych. Wyniki badań dotyczących zastosowania kompozytów FRP na obiektach mostowych znaleźć można w opracowaniach [5], [7] i [8]. Wymagania projektowe dla konstrukcji z kompozytów FRP obejmujące projektowanie z uwzględnieniem oddziaływania pożaru znaleźć można w sprawozdaniach z badań przednormatywnych oraz krajowych dokumentach normatywnych [9-13].

3. WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTÓW FRP W WYSOKIEJ TEMPERATURZE

Kompozyty FRP zbudowane są z włókien (najczęściej szklanych) oraz osnowy (z żywicy poliestrowej, winyloestrowej, epoksydowej lub fenolowej), które po połączeniu ze sobą tworzą bardzo wytrzymały materiał. Ma on doskonale właściwości w kierunku zgodnym z kierunkiem włókien przy wyraźnie mniejszej wytrzymałości w innych kierunkach.

Ponadto, materiał charakteryzuje się małym modułem sprężystości, który w przypadku standardowych profili mieści się w za kresie 17-30 GPa [2]. Dużą zaletą wyrobów z kompozytów FRP jest ich mała gęstość, odpowiadająca 20-30% ciężaru analogicznego elementu ze stali. Dzięki swej wysokiej trwałości wyroby z kompozytów FRP stanowią dobry zamiennik dla metalowych krat pomostowych, zwłaszcza w środowiskach agresywnych.

W podwyższonej temperaturze wyroby z kompozytów FRP tracą wytrzymałość, sztywność oraz przyczepność. Uplastycznienie żywicy następujące wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza zdolność do przenoszenia naprężeń pomiędzy włóknami. Ważną charakterystyką materiałową jest temperatura zeszklenia T_g . Po jej przekroczeniu zwiększa się intensywność utraty początkowych właściwości polimeru. Precyzyjne wyznaczenie wartości T_g jest nadal przedmiotem

2. FRP COMPOSITES IN STRUCTURES

FRP materials are nowadays widely applied in the field of reconstruction and repair of damaged structures [5]. They are used as an additional strengthening of steel, concrete, timber or brick structures. They are also an attractive solution for rehabilitation of bridges and other outdoor structures [6]. Due to their high durability FRP products are an ideal solution especially in an aggressive environment. FRP grids and railing are therefore often used in the chemical industry and in waste-water treatment plants. In the building industry, FRP composite materials are used for reinforcement of concrete structures. Research studies on FRP applications for bridges can be found in [5], [7], and [8]. Requirements for design of structures from FRP composites, except others dealing also with fire design, are given in pre-normative and national normative documents [9-13].

3. FRP PROPERTIES AT HIGH TEMPERATURES

FRP (fibre reinforced polymer) consists of fibres (mainly glass), and matrix (polyester, vinylester, epoxy or phenol resin) which combined form a very strong material. They have excellent parameters, especially in the fibres-direction, while in other directions the strength is significantly lower. Moreover, the modulus of elasticity for standard profiles ranging between 17 GPa and 30 GPa is low [2]. The great advantage of FRP products is their density, which ranges from 20 per cent up to 30 per cent of its equivalent of steel. Due to their high durability FRP products are an ideal replacement for metal grids especially in an aggressive environment.

At elevated temperature, FRP products lose their strength, stiffness and bond properties with increasing temperatures. With temperature growth, the softening of the resin leads to capacity reduction of stress transfer between fibres. The glass transition temperature T_g of the matrix is an important material characteristics. When the glass transition temperature is exceeded, the loss of initial properties is more significant. The precise definition of T_g is still under discussion in the scientific community. The reduction in mechanical properties after reaching temperature T_g differs in relation to the fibres. There is also a great deal of scatter in the results, due to the wide range of possible fibre materials, fibre orientations, and fibre volume fractions which are considered through [6]. Anyway, it is extremely difficult to make generalization regarding the FRP [6] behaviour at high temperatures due to a large number of possible fibre-matrix combinations, manufacturing methods, and applications.

dyskusji w środowisku naukowym. Pogorszenie właściwości mechanicznych po osiągnięciu temperatury T_g przebiega inaczej w przypadku włókien. Ponadto mamy do czynienia z dużym rozrzutem wyników wynikającym z szerokiego spektrum możliwych materiałów, orientacją oraz udziałem objętościowym włókien w badanych materiałach [6]. Wobec dużej liczby możliwych układów włókna/osnowa, metod wytwarzania i zastosowań trudno o uniwersalne wnioski dotyczące charakterystyki pracy kompozytów FRP poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury [6].

4. ELEMENTY KONSTRUKCYJNE Z KOMPOZYTU FRP ZASTOSOWANE NA WIADUKCIE

Do eksperymentalnego zastosowania systemów z kompozytów FRP wybrano typowy obiekt o stalowej konstrukcji w mieście Hostivice. Obiekt zlokalizowany jest na 23.056 km linii Praga Smichov - Stredokluky i przeprowadzony nad linią kolejową Praga - Kladno. Obiekt ma 7,4 m szerokości i 6,5 m długości. Rys. 1a przedstawia konstrukcję obiektu zbudowaną z dwóch głównych dźwigarów stalowych o rozpiętości 9,9 m, na których ułożone są drewniane podkłady. Do głównych dźwigarów przytwierdzone są stalowe wsporniki podchodnikowe, na których oparte są drewniane pomosty chodnikowe. Obecnie obiekt jest wyłączony z eksploatacji, a pomost i balustrady są poważnie uszkodzone.

W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych na obiekcie zabudowano w sposób przedstawiony na Rys. 1b cztery różne systemy pomostowe z kompozytu FRP. Lokalizację wszystkich zabudowanych systemów wypełnienia pomostu wraz z krótkim opisem przedstawiono schematycznie na Rys. 2. Zastosowane płyty pomostowe różniły się wykończeniem, klasą reakcji na ogień oraz sposobem mocowania podkładów i pomostu. Materiałem osnowy była żywica poliestrowa i w jednym przypadku ognioodporna żywica fenolowa. Do podkładów płyty pomostowe przytwierdzono śrubami. Nie stykały się one jednak bezpośrednio z powierzchnią podkładów. Aby umożliwić wentylację drewna zastosowano małe podkładki z kompozytu FRP lub tworzywa sztucznego z recyklingu.

W polu nr 1 (lokalizację przedstawia Rys. 2) zabudowano kratę kompozytową obudowaną od góry warstwą laminatu o wys. 41 mm. Wyrób ten zbudowany z osnowy poliestrowej i włókna szklanego spełnia kryteria klasy reakcji na ogień C lub B_{fl}. Warstwie laminatu nadano wykończenie antypoślizgowe. Sposób zabudowania przedstawiono na Rys. 3a. Rys. 3b przedstawia pole nr 2 zabudowane kratą kompozytową obudowaną obustronnie warstwami laminatu

4. FRP MEMBERS APPLIED TO THE BRIDGE

A typical steel bridge in Hostivice was chosen for an experimental application of FRP systems. The bridge is situated at the 23.056 km mark on the Prague Smichov - Stredokluky railway, and it crosses the Prague - Kladno railway. The bridge is 7.4 m wide and 6.5 m high. Its structure consists of two main steel girders with a span of 9.9 m, with timber bridge sleepers shown in Fig. 1a. Steel consoles with a timber floor and a steel railing are mounted on the main girders. The bridge is currently out of order, and the floor and the railing are heavily damaged.

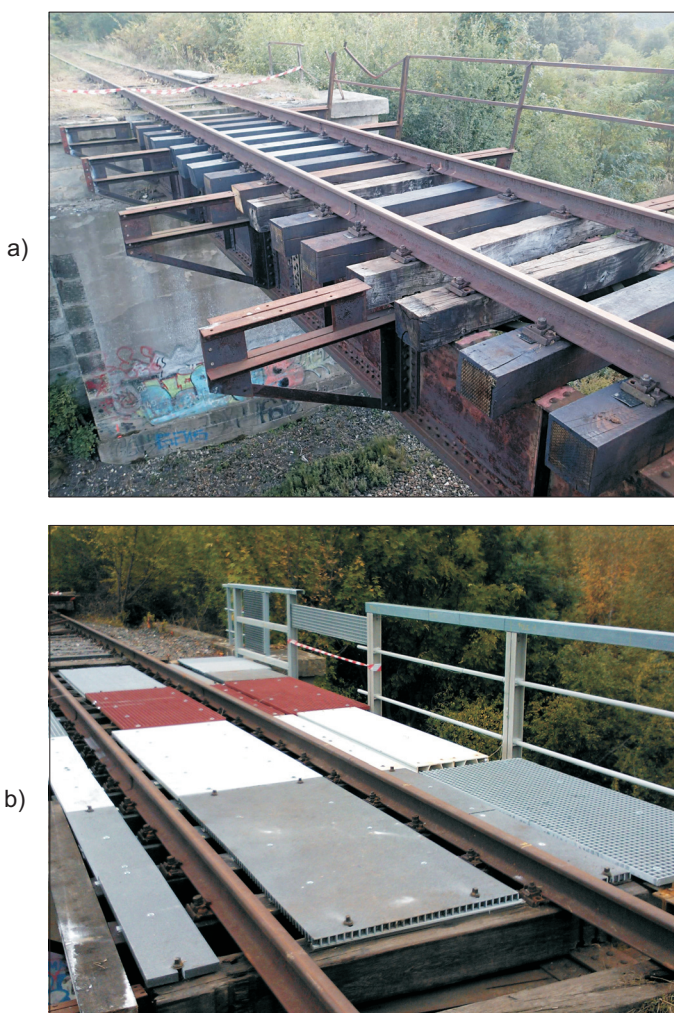


Fig. 1. The view of the tested bridge: a) before FRP application, b) after the FRP members were mounted on the bridge
Rys. 1. Widok wiaduktu stanowiącego przedmiot badań. a) przed zabudowaniem elementów z kompozytu FRP, b) po zabudowaniu elementów z kompozytu FRP

o wysokości 54 mm. Podobnie jak w przypadku wyrobów zamontowanych w polu nr 1 kompozyt zbudowany jest z osnowy poliestrowej i włókna szklanego a sam wyrób posiada klasę reakcji na ogień C lub B_{fl}. Na górnej powierzchni wykonano wykończenie antypoślizgowe.

For the purposes of the experimental investigation, four different FRP systems were mounted on the bridge, as shown in Fig. 1b. Fig. 2 schematically shows the location of all applied systems together with a brief description. The panels that were used varied in their surface finishing, in the reaction-to-fire class, and also in the way in which they were mounted on the sleepers and to the superstructure. The matrix material was polyester, and in one case, fire-resistant phenol resin. The floor panels on the sleepers were bolted. The panels were not directly lying on top of the sleeper. To enable ventilation of the timber, small FRP or recycled plastic spacers were used.

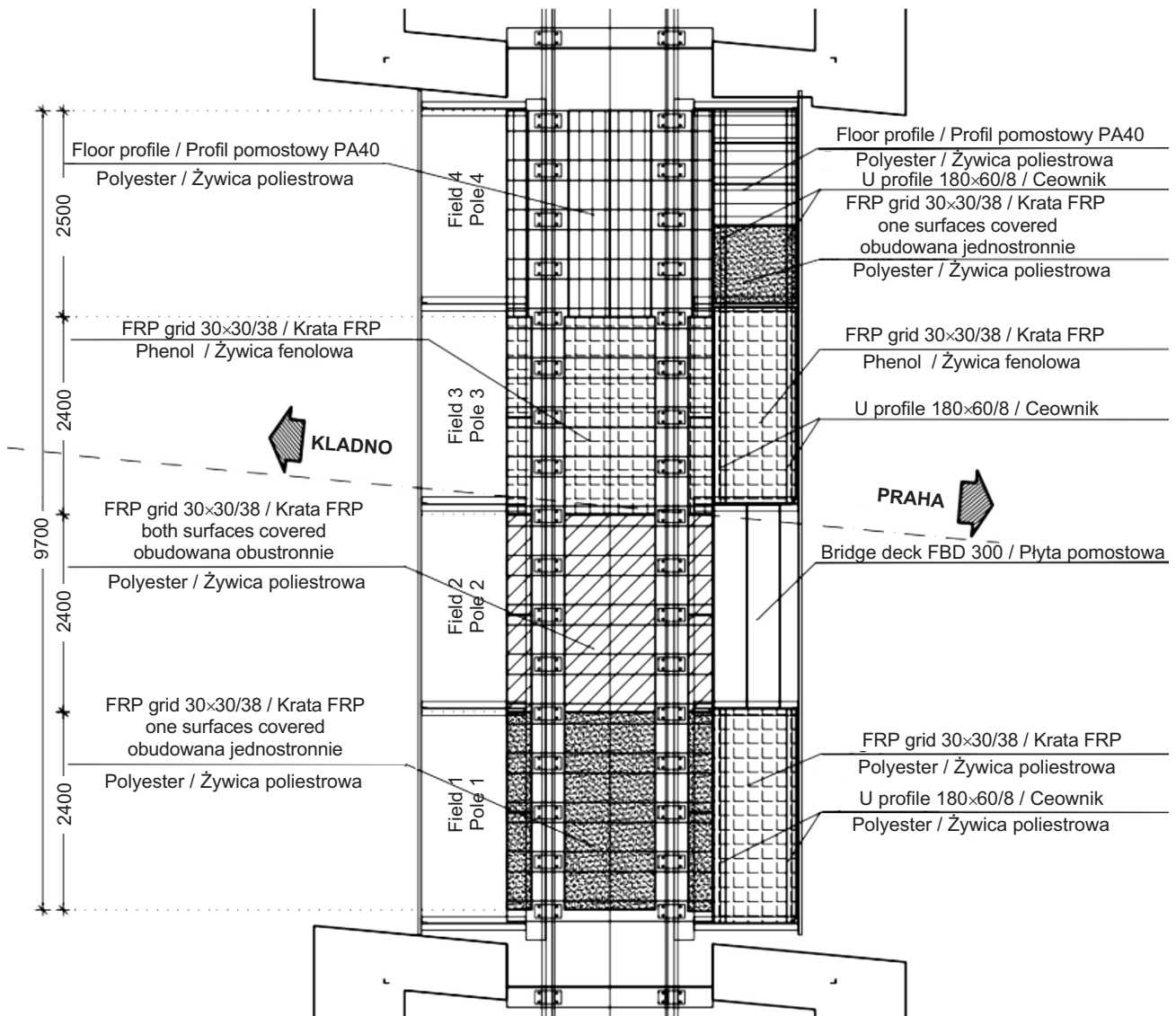


Fig. 2. FRP Floor panels mounted on the bridge in Hostivice

Rys. 2. Schemat zabudowy płyt pomostowych z kompozytu FRP na wiadukcie w mieście Hostivice

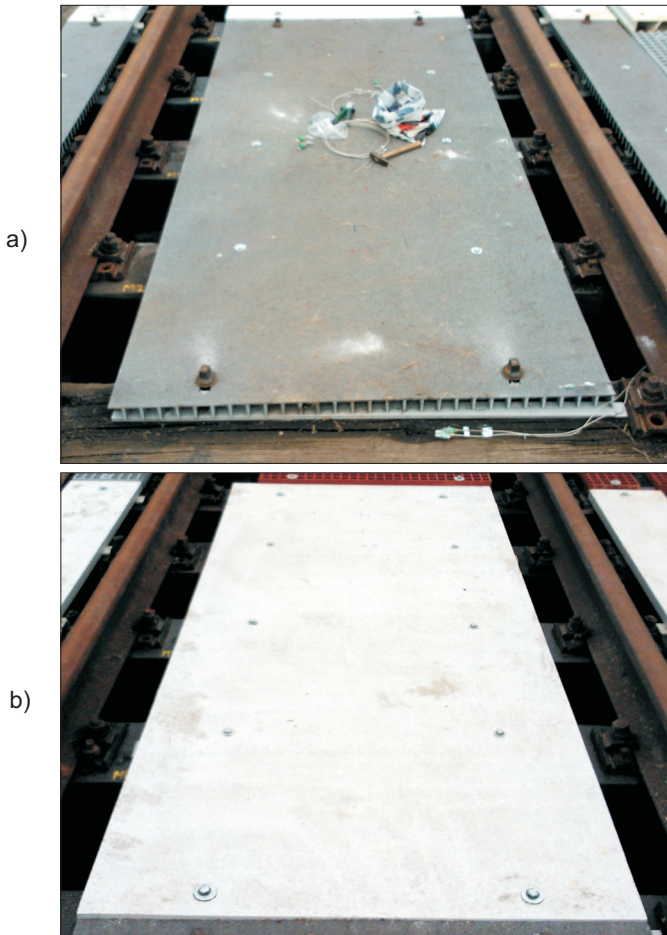


Fig. 3. a) FRP grid with a laminated deck on the top surface in field 1, b) FRP grid with a laminated deck on both surfaces in field 2

Rys. 3. a) Krata z kompozytu FRP obudowana warstwą laminatu od góry, zabudowana w polu 1, b) Krata z kompozytu FRP obustronnie obudowana warstwą laminatu, zabudowana w polu 2

Rys. 4a przedstawia system wypełnienia pomostu z krat z kompozytu FRP o wys. 38 mm i wymiarze oczka 30 mm × 30 mm, które zostały zabudowane w polu nr 3 obiektu. Kratę wykonano z ognioodpornej żywicy fenolowej i włókien szklanych. Regułą jest przełożenie się lepszej charakterystyki ogniowej zastosowanej żywicy na lepszą klasę reakcji na ogień wyrobu. Naturalna jest więc klasa B reakcji na ogień. Powierzchni nadano analogiczne wykończenie antypoślizgowe. Na Rys. 4b przedstawiono pole 4 zabudowane płytą z kompozytu FRP typu PA40. Górną powierzchnię stanowi płyta o właściwościach antypoślizgowych. Od spodu na całej długości płyty biegną żebra usztywniające. Wyrób uzyskano w procesie prasowania ciągłego (pultruzji), w którym następuje złączenie żywicy poliestrowej i włókien szklanych. Wyrób spełnia wymagania klasy C reakcji na ogień.

Field 1 (for the location, see Fig. 2) was mounted by an FRP grid with a laminated deck 41 mm high on the top surface. This product, made from polyester matrix and glass fibers, fulfilled the criteria for reaction-to-fire class C or B_{fl}. Its surface was provided with nonskid finishing. The application is shown in Fig. 3a. The FRP grid with laminated decks on both surfaces 54 mm high was applied to field 2 shown in Fig. 3b. The material composition was polyester matrix and glass fibers, the same as for the products used in field 1 with product of reaction-to-fire class C or B_{fl}. The upper surface deck was fitted with a nonskid finish.

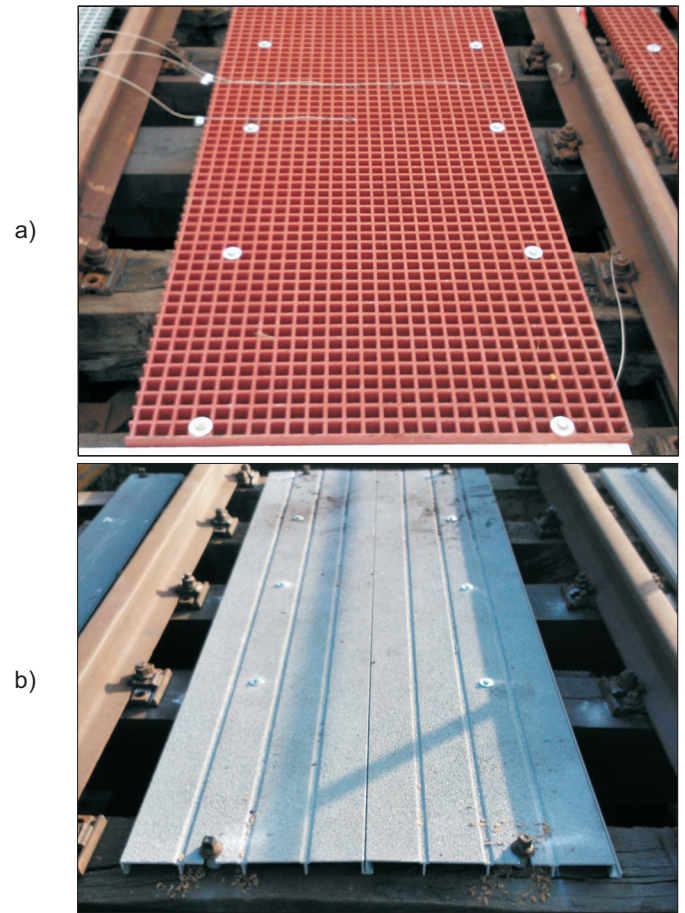


Fig. 4. a) FRP grid with phenol resin in field 3, b) FRP system PA40 plank on sleepers in field 4

Rys. 4. a) Krata FRP z osnową z żywicy fenolowej zabudowana w polu 3, b) Płyta systemowa PA40 z kompozytu FRP zabudowana w obrębie podkładów w polu 4

Fig. 4a shows a floor system composed of an FRP grid 38 mm high, and a grid size of 30 mm × 30 mm mounted on field 3 of the experimental bridge. The grid was made of resistant phenol resin and glass fibers. As a rule, when the resin material reveals, the reaction-to-fire of the product

Wypełnienie pomostów chodnikowych wykonano z materiałów analogicznych jak w obrębie podkładów. Biorąc jednak pod uwagę rozpiętość wynoszącą 2,5 m we wszystkich polach z wyjątkiem pola nr 2 płyty oparto na podłużnych ceownikach z kompozytu FRP, które zostały przytwierdzone do stalowych dźwigarów poprzecznych. W miejsce kraty pomostowej z kompozytu FRP zastosowano deski pomostowe typu FBD 300. Płyta tego typu umożliwia przekrycie rozpiętości 2,5 m bez dodatkowego wzmocnienia.

W polu nr 1 zabudowano kratę z kompozytu FRP wykonaną z żywicy poliestrowej i włókna szklanego. Płyta spełnia wymagania klasy reakcji na ogień C lub B_{fl}. Parametry geometryczne kratki były identyczne z kratą zastosowaną jako wypełnienie w obrębie podkładów w polu nr 3. Jedyną różnicą była niższa klasa reakcji na ogień.

Jak wspomniano powyżej w polu nr 2 zabudowano deski pomostowe typu FBD 300 bez podparcia z ceowników. Wyrób sklasyfikowano w klasie B reakcji na ogień. W wykonaniu standardowym płyta nie ma wykończenia powierzchni. W takiej sytuacji, powszechniejsze wykorzystanie tego wyrobu na kolejowych obiektach mostowych wymagałoby wykonania wykończenia antypoślizgowego.

W obrębie pomostów chodnikowych w polu nr 3 zabudowano kratę 30×30/38, czyli taką samą jak w obrębie podkładów. Na podstawie koloru wyrobu wskazującego na wykorzystanie w produkcji żywicy fenolowej przyjęto klasę B reakcji na ogień.

W ostatnim polu zabudowano dwa rodzaje płyt z kompozytu FRP: opisane wcześniej płyty PA40 oraz kraty P38 o wys. 41 mm obudowane od góry warstwą laminatu. Oba wyroby zamocowano śrubami do dwóch ceowników o klasie C reakcji na ogień. System wypełnienia pomostu przedstawiono na Rys. 5.

Scalone z dwóch ceowników słupki balustrad przytwierdzono do istniejącej blachy węzłowej stosując połączenie kombinowane śrubowo-klejone w celu zwiększenia jego początkowej sztywności. Poprzeczki poziome wykonano z rur lub kątowników o odpowiedniej sztywności. Poręcze wykonano z profilu zamkniętego o wym. 100 mm × 100 mm × 5 mm ze względu na jego wysoką wytrzymałość na skręcanie. Na przyczółkach zastosowano analogiczne, zróżnicowane rozwiązanie balustrad tj. balustrady z wypełnieniem z trzech profili poziomych lub krat zabezpieczających przed odpryskującymi kamykami.

increases. The reaction-to-fire class of this product is therefore B. A similar nonskid finish was used. Field 4 was mounted with a PA40 FRP panel, see Fig. 4b. The upper side of the panel was covered by a deck with a non-skid finish. On the bottom, there were longitudinal ribs along the whole length of the panel. The product was made of polyester matrix and glass fibres by the pultrusion process. Its reaction-to-fire class is C.

The floor on the consoles was made from a similar decking to that used on the sleepers. However, due to the span of 2.5 m it was placed and bolted on longitudinal FRP U profiles 180 mm high, attached to steel cross beams, except for field 2. An FBD 300 bridge deck panel was used there instead of an FRP grid. This panel could span 2.5 m by itself.

In field 1, an FRP grid made of polyester resin and glass fibers was used. It corresponds to reaction-to-fire class C or B_{fl}. The geometry of the grid is the same as the geometry of the grid applied to the sleepers in field 3. The only difference is that it has a lower reaction-to-fire class.

Field 2 was fitted by bridge panel FBD 300, with no supporting U profiles, as described above. The product was classified as class B for reaction-to-fire. By default, the panel had no surface finishing. Therefore for more extensive use on railway bridges, a non-slippery finish should be required.

The same 30×30/38 FRP grid as applied to the sleepers in field 3 was mounted to the consoles in this field. The colour of the product indicated phenol resin, and therefore reaction-to-fire class B.

The last field was fitted by two types of FRP panels: panel PA40, which has already been described, and the P38 grid 41 mm high with a laminated top surface. Both products mounted by bolts on two U profiles were of reaction-to-fire class C. The floor systems are shown in Fig. 5.

The railing columns consist of a pair of U profiles attached to the existing gusset plate by a combined bonded and bolted connection in order to increase the initial stiffness of the connection. The horizontal rails were made from circular tubes or angles to provide sufficient stiffness. A cuboidal tube with dimensions of 100 mm × 100 mm × 5 mm was used for the handrail, because of its high stiffness in torsion. Similarly, various railing arrangements were proposed on abutments e.g. a three-rail system or a system with a filling made of gratings to provide protection against flying gravel.

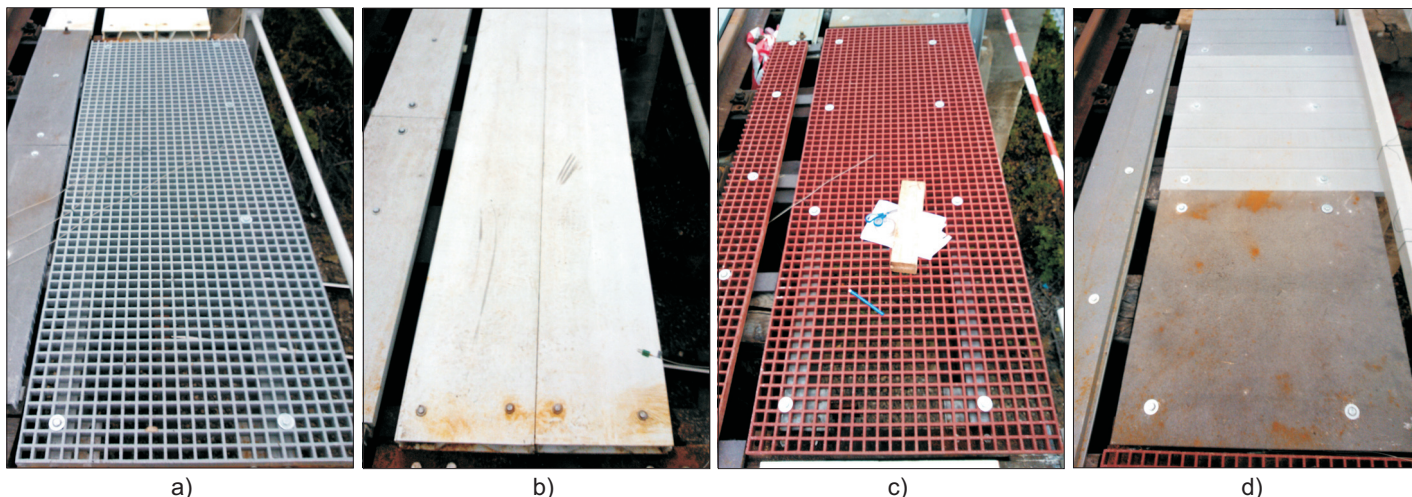


Fig. 5. a) FRP grid placed on two U profiles in field 1, b) FBD 300 bridge deck in field 2, c) FRP grid with phenol resin on two U profiles in field 3, d) A combination of PA40 panel and P38 grid with laminated top surface in field 4

Rys. 5. a) Krata z kompozytu FRP na dwóch ceownikach nośnych, zabudowana w polu 1, b) Deski pomostowe typu FBD 300 w polu 2, c) Krata z kompozytu FRP z osnową z żywicy fenolowej osadzona na dwóch ceownikach, zabudowana w polu 3, d) Wypełnienie w polu 4 płytą typu PA40 i kratą P38 obudowaną od góry warstwą laminatu

5. BADANIA POŻAROWE

5.1. UWAGI OGÓLNE

W uzgodnieniu z właścicielem infrastruktury kolejowej badania elementów konstrukcyjnych z kompozytu FRP przeprowadzono dla dwóch wariantów przebiegu oddziaływania ognia. Analizy statystyczne wskazują, że najczęstszym źródłem ognia na sieci kolejowej na terenie Republiki Czeskiej są śmiecie i suche liście, zgromadzone w przestrzeniach między drewnianymi podkładami. Tego typu źródło ognia ulega zaproszeniu po przejeździe pociągu, a powstały w ten sposób ogień jest łatwy do ugaszenia przez strażaków. Potencjalnym źródłem ognia na obiektach mostowych mogą być również podwieszane do obiektu kable elektryczne (prowadzone zazwyczaj blisko wsporników lub balustrad). W większości przypadków przyczyną pożaru jest zwarcie. Od pewnego czasu stosuje się już kable o podwyższonej odporności na rozprzestrzenianie ognia. Pomimo tego, na wielu mostach nadal występują kable o powłoce polietylenowej. Duża ilość materiałów polimerowych występujących w izolacji tego typu grozi intensywnym rozwojem ognia.

W przeprowadzonym badaniu palenie się śmieci i liści nagromadzonych między podkładami zasymulowano przy użyciu 500 g papieru równomiernie rozłożonego na kracie między podkładami na powierzchni $0,800 \text{ m} \times 0,355 \text{ m}$. Materiał obciążenia ogniowego rozpalono za pomocą pochodni. W drugiej symulacji oddziaływania ognia wykorzystano dwa kable TCEKPFLEZE 7P1,0 D o długości 1,25 m

5. FIRE TESTS

5.1. GENERAL REMARKS

On the basis of consultations with the owner of the railway infrastructure, two fire scenarios were chosen for testing the FRP members mounted on the bridge. Statistics show that the most frequent source of fire recorded in the Czech railway system is rubbish and dry leaves between timber sleepers. This source of fire usually ignites after the passage of a train causing a small scale fire, which can be easily extinguished by firefighters. Electrical lines located below the bridge structure (usually close to consoles or railings) can also be considered as a potential source of fire on bridges. In most cases, fires are initiated by short circuits. Cables less likely propagating flames have recently come into use. However, many bridges are still fitted with cables made of polyethylene outer envelopes. Unfortunately, intense burning may occur due to the large amount of polymer material that is widely used for insulating cables.

During the fire test, burning of rubbish and dry leaves between timber sleepers was simulated by 500 g of paper uniformly distributed on a metal grid between sleepers, over an area of $0.800 \text{ m} \times 0.355 \text{ m}$. The fire load was ignited by a torch. A second fire scenario was created by two TCEKPFLEZE 7P1.0 D cables 1.25 m long placed in a U profile on the steel consoles [14]. The cables were ignited by a small amount of kerosene poured into the

przewodzone wewnątrz ceownika przymocowanego do stalowych wsporników podchodnikowych [14]. Kable rozpalono przy użyciu niewielkiej ilości nafty, którą wiano do ceownika i następnie zapalono pochodnią. Dwa wykorzystane w badaniach rodzaje obciążenia ogniowego przedstawiono na Rys. 6. Symulacje równoczesnego rozwoju ognia w obu wariantach powtórzono w czterech polach odpowiadających przedstawionym na Rys. 2. czterem systemom wypełnienia pomostu oraz balustrad.

5.2. POMIARY

Wskaźnikiem gwałtowności utraty początkowych właściwości kompozytu FRP jest temperatura przejścia żywicznej osnowy w stan szklisty T_g . W celu oceny możliwego pogorszenia właściwości kompozytu FRP przeprowadzono pomiar temperatury gazu w pobliżu badanych elementów przy użyciu 29 szt. termopar o średnicy 3 mm w powłoce typu K. Trzy termopary umieszczono w każdym polu pomostu jezdniowego, od jednej do dwóch w każdym polu pomostu chodnikowego, trzy na poszczególnych poprzeczkach balustrad oraz dwie na ceownikach nośnych pomostu chodnika. Pomiar temperatury powierzchni przeprowadzono przy użyciu kamery termowizyjnej Flir ThermoCAM PM695. Temperaturę odniesienia zmierzono za pomocą termometru laserowego typu Fluke 68 IR. Wynikające z obecności strażaka obciążenie o wartości 100 kN przyłożone pośrodku przęsła (waga strażaka wraz ze sprzętem wg [15]) zasymulowano układając w połowie przęsła cegły o łącznej wadze 100 kg. Podczas badań pożarowych prowadzono bieżącą kontrolę odkształceń pionowych płyt pomostu chodnikowego. Kierunek i prędkość wiatru kontrolowano przy użyciu anemometru. Anemometr był zamontowany na górnym profilu balustrady w połowie przęsła mostu.

5.3. PRACA SYSTEMÓW WYPEŁNIENIA POMOSTU W WARUNKACH ODDZIAŁYWANIA OGNI

Przebieg oddziaływania ognia w obszarze pomiędzy podkładami charakteryzuje szybkie i intensywne spalanie z dużym wzrostem temperatury. Zupełnie inaczej wyglądało oddziaływanie kabli podwieszonych pod wspornikami, które paliły się wolno wywołując jedynie niewielki wzrost temperatury. Na intensywność rozwoju pożaru znaczny wpływ ma kształt zamontowanych profili kompozytowych oraz rzeczywista prędkość przepływu powietrza. W trakcie badań wiatr osiągał prędkość w przedziale od 0,7 m/s do 2,5 m/s. Słabszy wiatr towarzyszył badaniom w polach 4, 3 i 2 (od 0,7 m/s do 2,0 m/s). Silniejszy wiatr odnotowano podczas badań w polu nr 1 (od 1,0 m/s do 2,5 m/s). Wiatr wiał zasadniczo z kierunku

U profile and ignited by a torch. Fig. 6 shows two fire loads. Both simultaneously running scenarios were repeated in four fields corresponding to the four types of FRP floor and railing systems presented in Fig. 2.

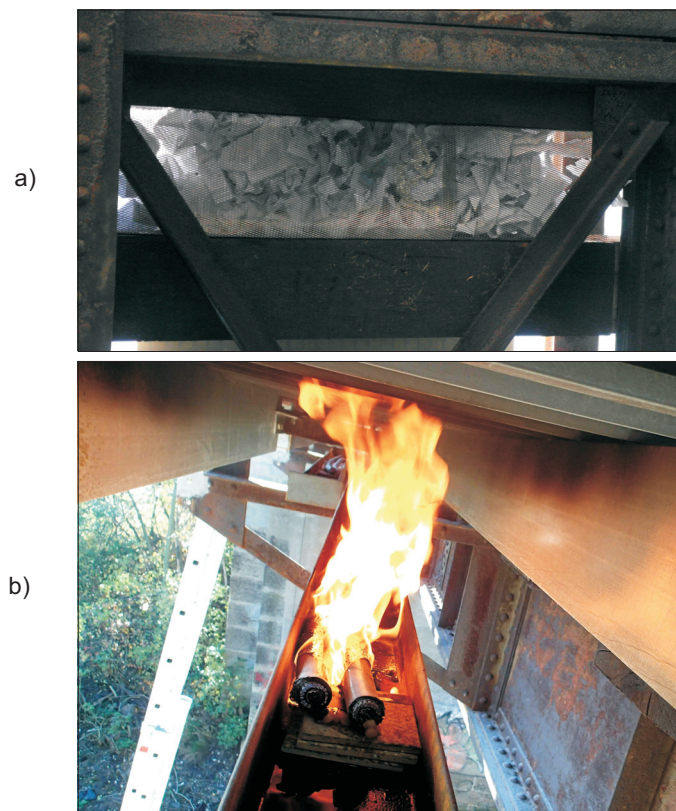


Fig. 6. a) Fire load between sleepers, the view from the bottom side, b) Two electric cables burning below the console deck Rys. 6. a) Materiał obciążenia ogniowego umieszczony między podkładami, widok od spodu, b) Dwa kable elektryczne płonące pod kapą chodnikową

5.2. MEASUREMENTS

The significant loss of initial properties of FRP may be evaluated by the temperature of the glass transition T_g of the matrix resin. To evaluate the potential degradation of FRP properties, the gas temperature in the vicinity of FRP members was measured using all of 29 type K coated thermocouples 3 mm in diameter. Three thermocouples were located on the floor deck in each field, from one to two on the floor deck of the consoles in each field, three at different vertical levels of the railing and two on the bearing U profiles of the console decks. The surface temperature of the structure was scanned by a PAL Flir ThermoCAM PM695 thermo-camera. The reference temperature was measured using a Fluke 68 IR laser ther-

północno-zachodniego (przy osi podłużnej obiektu biegnącej z północy na południe). Przedmiotem badania w polu nr 1 była płyta z kompozytu FRP zbudowana z kraty wewnętrznej i płaskiej płyty okładzinowej zamykającej kratę od góry. Po rozpaleniu materiału obciążenia ogniowego nastąpił gwałtowny wzrost temperatury pod płytą. W warunkach blokowania przez pełną okładzinę dopływu chłodnego powietrza z góry oraz wydostawania się gorących gazów w górę temperatura wzrosła aż do 350°C (na obrazie z kamery termowizyjnej na Rys. 7a). Ogień wypalił się tak szybko jak powstał. Temperatura, która mogły mieć wpływ na właściwości kompozytu FRP (powyżej 120°C) utrzymywała się około 2 minut. W czasie palenia się ognia płomień wystawał spod obu krawędzi. W tych obszarach płyta pomostowa z kompozytu FRP została zabrudzona sadzą. Uszkodzenia były ograniczone do strefy krawędziowej i nie miały wpływu na ogólną nośność płyty. Dzięki swym parametrom geometrycznym wewnętrzna część płyty przy powierzchni pokładów zapobiegała rozprzestrzenianiu się ognia.

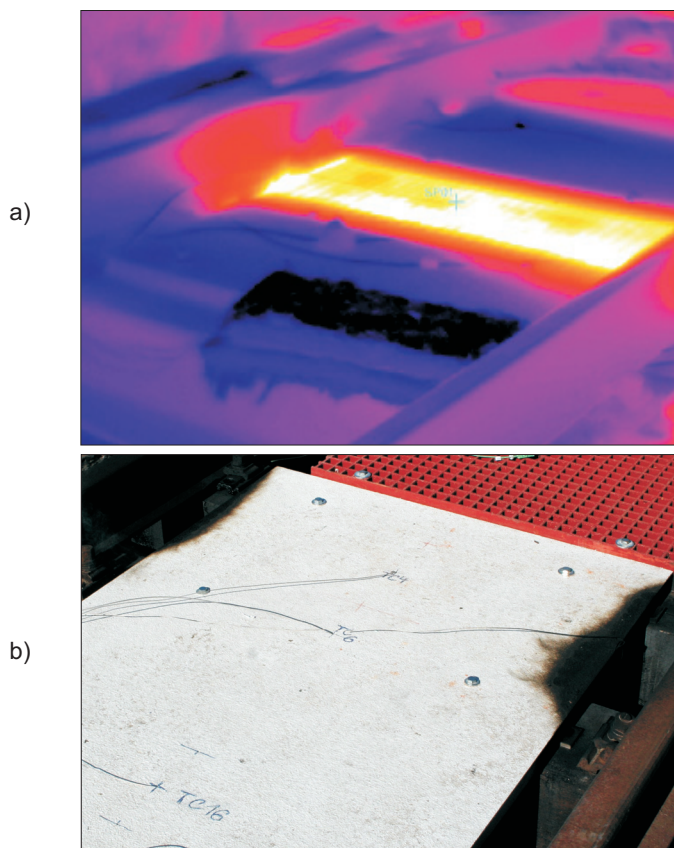


Fig. 7. a) FRP floor deck with a laminate deck on the top surface in field 1 controlled by the thermo-camera, b) FRP floor deck with laminated decks on both sides in field 2 after the fire test
Rys. 7. a) Obraz z kamery termowizyjnej kraty pomostowej obudowanej warstwą laminatu od góry, pole 1, b) Skutki działania ognia na zabudowaną w polu 2 kratę z kompozytu FRP obustronnie obudowaną warstwą laminatu

Przedmiotem badania w polu nr 2 była płyta z kompozytu FRP zbudowana z kraty obudowanej obustronnie płaską płytą pokryciową. Podobnie jak w polu nr 1 po wzniesieniu ognia nastąpił gwałtowny wzrost temperatury. Uniemożliwienie

mometer. The mechanical loading of 1 kN in the mid-span of the FRP console panels simulating the presence of a fire-fighter, consisted of 100 kg of bricks (the weight of a firefighter, including all equipment, as stated in [15]). The vertical deformation of the console panels was monitored during the fire test. During the tests wind direction and wind speed were measured with the use of an anemometer. The anemometer was located on the upper member of the railing, in the centre of the bridge span.

5.3. BEHAVIOUR OF THE FLOOR SYSTEMS DURING FIRE

The fire scenario between sleepers may be characterized by fast and intensive burning with high temperatures. By contrast, the cables below the consoles burned very slowly, and only low temperatures were reached. The severity of the fire was greatly influenced by the shape of the mounted FRP profiles and by the actual rate of air flow. During the tests wind flow ranged from 0.7 m/s to 2.5 m/s. The wind was weaker during the tests on fields 4, 3 and 2 (0.7 m/s - 2.0 m/s). During the test on field 1 the wind was stronger (1.0 m/s - 2.5 m/s). The dominant flow direction was northwestern (the axis of the bridge is located in the north-south direction). An FRP floor panel made of an inner grid covered from the upper side with a flat deck was mounted on field 1. After the fire load was initiated, the temperature below the panel rose rapidly. Because the full upper surface prevented the access of cold air from above, and the upward escape of hot gases, the temperature reached 350°C (recorded by the thermo-camera in Fig. 7a). The fire burned out as quickly as it arose. Temperatures that may influence the properties of the FRP material (above 120°C) lasted for about 2 min. During the fire, flames were visible along both edges of the panel. In these regions, the FRP floor deck was colored by soot. The FRP panel was affected only in the edge regions, and the overall bearing ability was not affected. The inner shape of the panel close to the surface of sleepers prevented the spread of fire.

An FRP floor panel consisting of an inner grid covered from both sides with a flat deck was mounted on field 2. Similarly to field 1, the temperature grew rapidly after the fire was ignited. Because there were full surfaces that did

wydstawiania się gorących gazów w górę przez pełne okładziny spowodowało wzrost temperatury pod pomostem do poziomu 130°C (wynik pomiaru z termopary umieszczonej pośrodku wypełnienia pomostu - patrz Rys. 7b). Wartości temperatury powyżej 600°C zostały zarejestrowane przez termoparę zlokalizowaną przy krawędzi płyty, blisko szyny, czyli w miejscu, gdzie łatwo mogły wydostawać się języki płomieni. Tak wysoka temperatura spowodowała zapalenie obu krawędzi płyty. Po krótkim czasie ogień został zgaszony przez podmuch wiatru. Jak widać na Rys. 7b oddzielenie włókien od osnowy nastąpiło jedynie w strefie przykrawędziowej. Całkowita nośność płyty nie uległa pogorszeniu. Rozprzestrzenieniu się ognia zapobiegła geometria płyty położonej blisko powierzchni podkładów.

Przedmiotem badania w polu nr 3 była krata wypełniająca o osnowie z żywicy fenolowej. Po rozpaleniu materiału obciążenia ogniowego (Rys. 8a) nastąpił gwałtowny wzrost temperatury gazów. Był on wynikiem spalania papieru w korzystnych warunkach przepływu powietrza. Pomimo tych warunków temperatura gazów poniżej kraty pomostowej przekroczyła 500°C. Temperatury mogące mieć wpływ na właściwości kompozytu FRP czyli wyższe niż 150°C utrzymywały się przez nie dłużej niż 2 minuty. Krzywe temperatur gazów uzyskane z termopar TC7, TC8 i TC9 przedstawiono na wykresie na Rys. 8b. Materiał obciążenia ogniowego spalił się szybko a konstrukcja kraty umożliwiła obniżenie temperatury gazów przed wiatr wiejący z prędkością od 0,7 m/s do 2,0 m/s. Badanie powtórzono stosując taki sam materiał obciążenia ogniowego (drugi pik na wykresie na Rys. 8b) uzyskując w tym przypadku wyższą temperaturę na termoparze TC7. Podobnie jak przy pierwszej próbie materiał spalił się całkowicie nie powodując zapalenia oleju impregnującego i profilu kompozytowego. Rozprzestrzenieniu się ognia na pozostałe części obiektu zapobiegł profil kraty ściśle przylegający do górnej powierzchni podkładów. Dwie próby spowodowały jedynie zmianę koloru wyrobów. Nie nastąpiło pogorszenie nośności.

Najniekorzystniejszą sytuację pożarową odnotowano w polu 4, w którym zabudowany został profil typu PA40 (o klasie C reakcji na ogień). Płyta tego typu ma żebra usztywniające na całej długości. Żebra osłaniały płomień, uniemożliwiając schłodzenie przez konwekcję otaczających gazów. Materiał obciążenia ogniowego spalił się w krótkim czasie od rozpalenia. Spadek temperatury odnotowanej przez termoparę TC10 przedstawia wykres na Rys. 9b. Rozmieszczenie termopar TC10, TC11 i TC12 na wypełnieniu pomostu obiektu przedstawia Rys. 9a. Następnie pod wpływem wysokiej temperatury gazów zapalił się olej kreozotowy na podkładach (na wykresie na Rys. 9b przedstawia to ponowny wzrost

not allow upward leakage of hot gases, the gas temperature accumulated below the deck reached 130°C (recorded by thermocouple placed in the center of the floor deck, see Fig. 7b). Temperatures higher than 600°C were measured at thermocouple located at the edge of the panel, close to the rail where the flames came upwards. Both edges of the panel were ignited because of high temperature. After a short time, the fire was extinguished by a gust of wind. As shown in Fig. 7b, the FRP floor decks were affected by the separation of fibers and matrix only in the edge regions. The overall bearing ability of the panel was unchanged. The shape of the panel, which lay closely to the surface of the sleepers, prevented any spreading of the fire.

In field 3, an FRP grid panel with fire-resistant phenol resin was used. After the fire load was ignited (Fig. 8a), the temperature of the gas rose rapidly. This was caused by burning of paper in favourable ventilation conditions. However, the gas temperatures below the floor grid reached more than 500°C. The duration of temperatures above 150°C which may influence the properties of FRP was not longer than 2 min. The development of the gas temperatures recorded at thermocouples TC7, TC8, and TC9 is shown in Fig. 8b. The fire load burned out quickly, and thanks to the grid shape, the gas temperature was cooled down by the wind flow, which ranged from 0.7 m/s to 2.0 m/s. The test was repeated with the same fire load (the second peak in the diagram in Fig. 8b), and variable wind conditions led to a higher temperature measured at TC7. Similarly to the first ignition of the fire load, the second test also came to an end when the fire load was consumed without igniting the impregnation oil or the FRP profile. The grid profile closely fitting the upper surface of the sleepers stopped the fire spreading to other parts of the bridge. After the two fire tests, the FRP products changed color only. The load-bearing capacity was not affected.

The worst fire event was observed in field 4, where the PA40 profile (reaction-to-fire class C) was mounted. On the bottom side of the panel, there were longitudinal ribs along the length of the whole panel. These ribs protected the fire, and it could not be cooled down by the surrounding gas convection. After ignition, fire load was quickly consumed by fire. Fig. 9b shows a decrease in temperature at TC10. The location of thermocouples TC10, TC11 and TC12 placed on floor deck is illustrated in Fig. 9a. Then, the impregnation oil on timber sleepers was initiated due to high gas temperature (in Fig. 9b, temperature at TC10 started to grow again), and the fire supported by the burning oil ignited the FRP floor panel. Hot gases accumulated under the FRP deck reached a maximum temperature of

temperatury odnotowany przez termoparę TC10) podtrzymując ogień i powodując w rezultacie zapalenie płyty pomostowej z kompozytu FRP. Najwyższą temperaturę gorących gazów pod pomostem kompozytowym otrzymano na termoparze TC10. Ogień rozprzestrzenił się szybko z miejsca zapłonu wzdłuż żeber na całą długość profilu (Rys. 10a). W tej sytuacji, ogień, który wymknął się spod kontroli został ugaszony przez strażaków. Znaczące uszkodzenie wypełnienia pomostu z płyt PA40 w skutek przeprowadzonego w ramach badania eksperymentu ilustruje wykres na Rys. 10b.



700°C at thermocouple TC10. Through the ribs, the fire spread quickly from the place of ignition along the whole length of the profile (Fig. 10a). The fire, which burned out of control, was extinguished by fire fighters. As is illustrated in Fig. 10b, considerable destruction of floor deck PA40 was observed after the fire test.

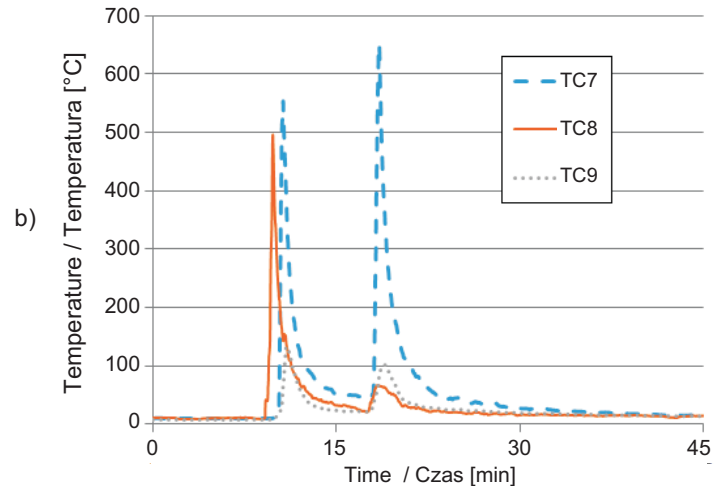


Fig. 8. a) The FRP grid floor in field 3 during the fire test, b) Gas temperature measured below the FRP grid in field 3 - TC8 located close to the rail, TC9 between the FRP grid and a wooden sleeper
Rys. 8. a) Wypełnienie z krat FRP w polu 3 w trakcie oddziaływania ognia, b) Temperatura gazów mierzona pod wypełnieniem z krat FRP w polu 3 za pomocą termopary TC8 umieszczonej przy szynie oraz termopary TC9 umieszczonej między kratą FRP i drewnianym podkładem

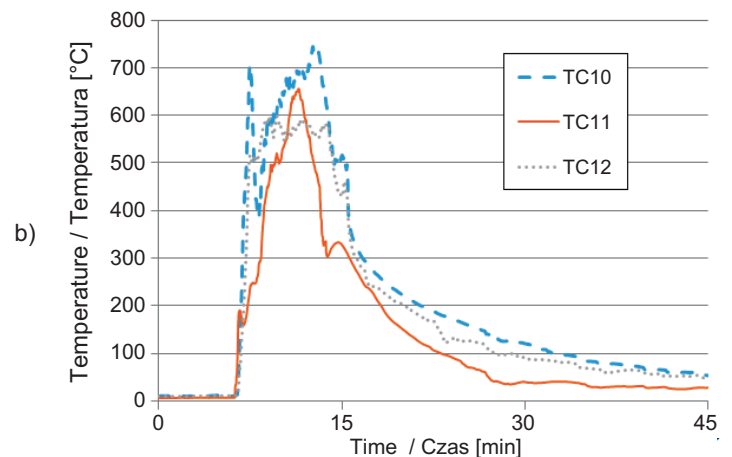
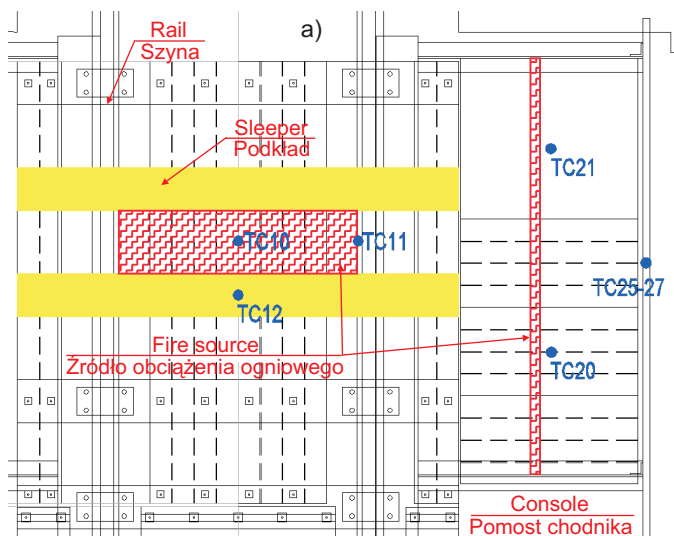


Fig. 9. a) Location of the thermocouples in field 4, b) Gas temperature measured below FRP floor panel PA40 in field 4
Rys. 9. a) Rozmieszczenie termopar w polu 4, b) Temperatura gazu zmierzona pod płytą wypełniającą z kompozytu FRP zabudowaną w polu 4

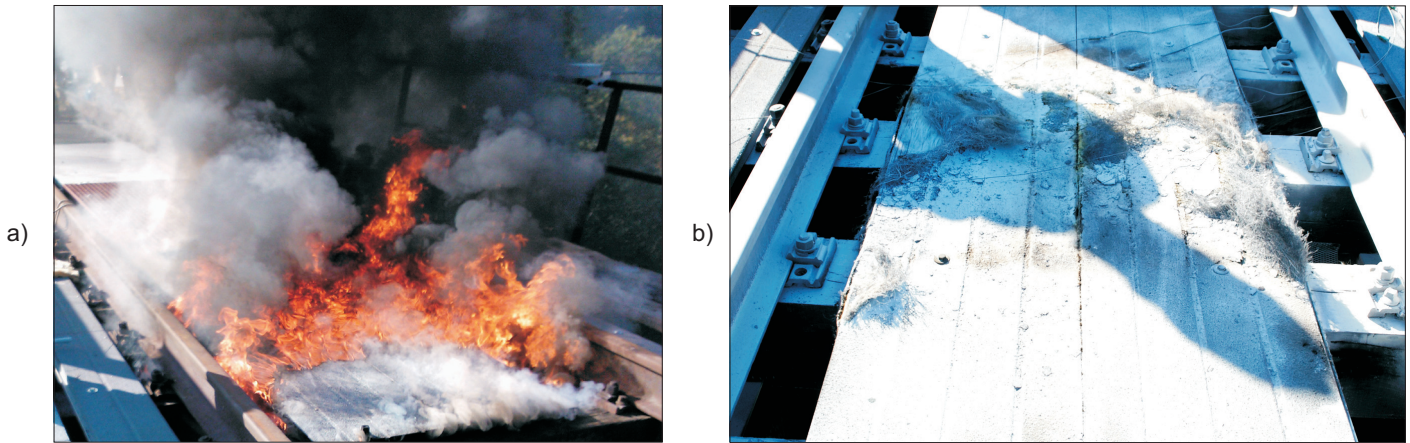


Fig. 10. a) FRP floor deck PA40 ignited by burning papers placed between two sleepers, b) Destruction of floor deck PA40 after the fire test

Rys. 10. a) Płonąca płyta pomostowa z kompozytu FRP typu PA40 zapalona od papierów umieszczonych między dwoma podkładami, b) Uszkodzenia płyty typu PA40 po badaniu pożarowym

5.4. PRACA POMOSTU CHODNIKA I BALUSTRAD W WARUNKACH ODDZIAŁYWANIA OGNI

Palenie się kabli elektrycznych prowadzonych na stalowych wspornikach nie było obojętne dla płyt pomostu chodnika i poprzeczek z kompozytu FRP. Nie odnotowano wysokich temperatur, co przypisać należy powolnemu spalaniu, odstępowi między elementami kompozytowymi a płomieniami oraz przepływowi powietrza wskutek działania wiatru. Zasadniczo temperatura gazów pod płytami pomostowymi z kompozytu FRP obustronnie obudowanymi warstwami laminatu (które zostały zabudowane w polach nr 4 i 2) mieściła się w zakresie 100-150°C. W połowie przęsła kraty zabudowanej w polu nr 3 odnotowano maksymalną temperaturę, która wyniosła 120°C przy temperaturze w połowie przęsła w polu nr 1 wynoszącej 45°C. Temperatury te uznawane są za bezpieczne dla materiałów z kompozytów FRP. Temperatura zmierzona na ceownikach nośnych zabudowanych w polu nr 1 wyniosła 45°C. Na poprzeczkach balustrad temperatura wzrosła do maksymalnie 40°C. Wpływ palenia się kabli elektrycznych na odkształcenie płyt był pomijalny. Maksymalne pionowe odkształcenie w połowie rozpiętości płyt wypełniających wskutek oddziaływania gorących gazów wyniosło 2,6 mm (w polu nr 1). W żadnej z przeprowadzonych prób pożarowych nie zaobserwowano płonących kropli, które mogłyby spowodować zapalenie się materiałów palnych pod mostem oraz zanieczyszczenie otoczenia.

6. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Wyniki prób pożarowych przeprowadzonych w obrębie pomostów chodników wskazują na pomijalny wpływ palenia

5.4. BEHAVIOUR OF THE CONSOLE AND RAIL SYSTEMS DURING FIRE

FRP panels and rail members located on steel consoles were influenced by the burning of electric cables. Due to the slow burning, the distance between the FRP members and the fire and the wind flow, the measured temperature did not reach high values. In general, the gas temperature measured below the FRP floor panels with a laminated deck on both sides (field 4 and 2) ranged between 100°C and 150°C. The maximum measured temperature in the middle of the grid span reached 120°C in field 3 and 45°C in field 1. The recorded temperature is considered safe for FRP materials. The temperature measured at the bearing U profiles in field 1 rose to 45°C. The maximum temperature on the railing members measured during the tests was 40°C. The influence of the burning of the electric cables on the deformation of the panel was negligible. The maximum vertical deformation in mid-span of the console deck caused by the elevated gas temperature reached 2.6 mm (field 1). During all the fire tests, no burning droplets were observed which could ignite combustible materials located below the bridge and pollute the environment.

6. DISCUSSION OF RESULTS

The results of the fire tests on bridge consoles have shown that the effect of burning electric cables is negligible. The fire tests on bridge sleepers revealed that, with the exception of floor panel PA40 with longitudinal ribs on the bottom, all FRP systems, grids with or without laminated decks, were able to carry the live load even after the fire,

się podwieszonych kabli. Próby przeprowadzone w obrębie podkładów wykazały, że z wyjątkiem płyty pomostowej PA40 z podłużnymi żebrami usztywniającymi od spodu ogień nie naruszył zdolności do przenoszenia obciążeń dynamicznych przez systemy kompozytowych płyt z kratą obudowaną lub nie obudowaną warstwą laminatu, nawet w przypadku wystąpienia pewnych uszkodzeń. Wyniki badań pożarowych przeprowadzonych w obrębie podkładów zestawiono w Tabl. 1. Temperatura T_{exp} to maksymalna temperatura gazów zgromadzonych pod elementem zmierzona przez czujnik zamontowany pośrodku elementu. W innych przypadkach podano lokalizację miejsca pomiaru. Dobrą odporność na działanie ognia wykazały nawet profile o klasie C reakcji na ogień, co oznacza brak konieczności stosowania krat ognioodpornych z osnową z żywicy fenolowej. Jest to ważne o tyle, że profil o klasie B reakcji na ogień, który został zabudowany w polu 3 kosztuje 2-3 razy więcej od profilu standardowego.

and after some damages. A summary of results of fire tests on the bridge sleepers is presented in Table 1. The temperature T_{exp} presents the maximum gas temperature measured below the centre of a FRP member. When the position of measured temperature differs, its location is specified. Good fire behaviour was achieved even with profiles of reaction-to-fire class C, so it is not necessary to use fire-resistant gratings with phenol resin. The price of the reaction-to-fire class B profile used in field 3 is from 2 to 3 times higher than a standard grid profile.

Table 1. Summary of the results of fire tests on the bridge sleepers

Tablica 1. Zestawienie wyników testów pożarowych przeprowadzonych w obrębie podkładów kolejowych badanego wiaduktu

Panel type Rodzaj płyt	Location Usytuowanie	Temperature Temperatura [°]	Duration (above 120°C) Czas oddziaływania (w temperaturze powyżej 120°C) [min]	Observed damage Zaobserwowane uszkodzenia
Grid / Krata FRP 30×30/38, one surfaces covered, polyester jedna strona pokryta poliestrem	Field 1 Pole 1	350	2	edges of the panel coloured by soot, overall bearing ability not affected krawędzie płyty pokryte sadzą, nośność całkowita podpory nienaruszona
Grid / Krata FRP 30×30/38, both surfaces covered, polyester obie strony pokryte poliestrem	Field 2 Pole 2	130 (centre / środek)	3	separation of fibers and matrix in edges of the panel, overall bearing ability not affected oddzielenie włókien i matrycy na krawędziach płyty, nienaruszona nośność całkowita podpory
		600 (edge / krawędź)		
Grid / Krata FRP 30×30/38, phenol / żywica fenolowa	Field 3 Pole 3	550/650 (centre / środek)	2	panel coloured by soot, overall bearing ability not affected płyta pokryta sadzą, nienaruszona nośność całkowita podpory
		500 (edge / krawędź)		
Floor profile / Profil podłogowy PA40, polyester / żywica poliestrowa	Field 4 Pole 4	700	8 (extinguished by firefighters / ugaszony przez strażaków)	ignition of the panel and timber sleepers, spread of fire along the panel, considerable destruction of the panel zapalenie płyty i belek podkładowych, rozprzestrzenianie ognia wzdłuż płyty, znaczne uszkodzenie płyty

W wyniku analizy przebiegu i wyników badań skorygowano początkowo przyjęte zalecenia odnośnie wymaganej klasy reakcji na ogień elementów z kompozytów FRP do zastosowań w naprawach obiektów mostowych. Uwzględniając zróżnicowanie wyników badań pożarowych przeprowadzonych na analizowanym obiekcie sformułowano dla niego przedstawione poniżej zalecenia. W celu uogólnienia tych

After an examination of the in-situ fire tests and an evaluation of the results of the study, a revision was made to the initial recommendations on the reaction-to-fire class for FRP members that should be used when renovating steel railway bridges. Due to variability of results originating from in-situ fire tests, following recommendations are valid for the case of steel bridge renovation described in

wymagań konieczne byłoby przeprowadzenie dodatkowych badań. Klasę reakcji na ogień B_{fi} zaleca się przyjmować jako wymaganą w przypadku elementów z kompozytów FRP stosowanych na obiektach, na których występują materiały palne (drewniane podkłady) oraz obiektach o podwyższonym zagrożeniu pożarowym (o długości przekraczającej 350 m). Elementy wypełnienia pomostu na obiektach, na których nie występują materiały palne powinny posiadać klasę reakcji na ogień od B_{fi} do D_{fi} . Klasę odporności C zaleca się przyjmować jako wymaganą dla innych elementów z kompozytów FRP stosowanych na obiektach, na których występują materiały palne (drewniane podkłady, niezabezpieczone przewody elektryczne) oraz obiektach o podwyższonym zagrożeniu pożarowym (o długości przekraczającej 350 m). W przypadku obiektów, na których nie występują materiały palne przyjmować można dla tych elementów klasy od D do E. W przypadku wykorzystania elementów z kompozytów FRP do napraw starych obiektów o konstrukcji stalowej zaleca się przyjmowanie klas uzupełniających d0 do d1 w zakresie powstawania płonących kropli oraz s1 w zakresie wytwarzania dymu.

Przestrzeganie ww. klas reakcji na ogień wymagane jest nie tylko z punktu widzenia odporności samych wyrobów lecz również wpływu ich geometrii na rozprzestrzenianie się ognia pod ich powierzchniami. W tym kontekście dopuszcza się wyłącznie stosowanie elementów w formie krat otwartych lub obudowanych jedno lub obustronnie. Elementy z żebrami usztywniającymi biegnącymi prostopadle do osi podkładów mogą sprzyjać przeniesieniu ognia na inne podkłady. Wyklucza to możliwość stosowania tych elementów jako wypełnienie pomostu w obrębie podkładów. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego nie ma żadnych ograniczeń co do kształtu elementów balustrad mostowych.

7. WNIOSKI

W ramach realizacji celu pracy przeprowadzono serię badań dotyczących możliwości zastosowania elementów z kompozytów FRP na kolejowych obiektach mostowych o konstrukcji stalowej. Wyniki analiz potwierdziły możliwość i przydatność ich wykorzystania do zabudowy płyt pomostowych. Badania obejmowały sprawdzenie w próbach terenowych sztywności i nośności elementów obiektu mostowego (poza zakresem artykułu) oraz jego terenowe badania pożarowe. Powyższe dane doświadczalne stanowiły podstawę opracowania instrukcji MVL725 „Zastosowanie kompozytów FRP do wykonania elementów wyposażenia obiektów kolejowych” [16] w ramach „Wymagań Jakościowych Czeskich Kolei Państwowych”. Dokument ten przedstawia i określa wymagania dla materiałów z kompozytów

this paper. Generalization of the requirements should undergo further testing. Class B_{fi} is recommended for floor FRP members on bridges where there are combustible materials (wooden sleepers) and on bridges with an increased fire risk (bridges longer than 350 m). Products of reaction-to-fire class B_{fi} to D_{fi} are recommended for floor members on bridges without combustible materials. Class C is recommended for other FRP equipment on bridges where combustible materials are present (wooden sleepers, unprotected cables) and on bridges with an increased fire risk (bridges longer than 350 m). Class D to E is recommended for other FRP equipment on bridges without combustible materials. An additional class d0 to d1 for burning droplets and also class s1 for smoke development is recommended for FRP members on the old steel bridge.

It is necessary to observe the above-mentioned reaction-to-fire classes for products, and also to ensure that the shape of floor elements do not contribute to fire spreading below their surfaces. Only grate elements or grids coated with surface layers on one or both sides can be accepted. Ribbed elements with ribs oriented perpendicular to the axis of sleepers may lead to progressive spread of fire to other sleepers. These elements are therefore not permitted for floors on sleepers. The shape of elements for the construction of railings is not limited from the point of view of fire safety.

7. CONCLUSIONS

A series of tests was performed on the application of FRP members to a steel railway bridge. The tests verified the possibility of using and mounting FRP products. The tests included in-situ verification of the stiffness and the load capacity of the members (not included in this paper), and in-situ fire tests. These tests have formed the basis for National Railway Quality Requirements MVL 725 “Application of FRP composites for the equipment of railway bridges” [16]. This document describes and specifies requirements for the design, manufacture, installation and maintenance of components made of FRP materials for railway bridges in the Czech Republic.

Finally, it can be concluded that when correct principles for mounting, manufacturing and design are followed, FRP equipment has proved to be a suitable, durable and technically competitive replacement material for traditional steel materials, even for a traditional railway bridge management. In the long term, FRP components requiring minimum maintenance are a suitable solution.

FRP przeznaczonych do wykorzystania na obiektach kolejowych zlokalizowanych na terenie Republiki Czeskiej, obowiązujące na etapie projektowania, wytwarzania, zabudowy oraz konserwacji wiaduktów mostowych.

Reasumując, można stwierdzić, że pod warunkiem przestrzegania właściwych zasad montażu i produkcji oraz profesjonalnego projektu elementy wyposażenia obiektów mostowych z kompozytów FRP mogą stanowić odpowiednią alternatywę dla tradycyjnych elementów stalowych pod względem trwałości i parametrów technicznych. Korzyści z zastosowania kompozytów FRP nabierają znaczenia w dłuższym horyzoncie czasowym ze względu na ich minimalne wymagania w zakresie konserwacji.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Ryjacek P.*, et al.: Application of FRP materials for a renovation of steel railway bridges. Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Foz do Iguaçu, Brazil, 2016
- [2] *Ryjacek P.*, et al.: Application of FRP materials for railway bridges and tunnels. Research report, Czech Technical University in Prague, 2015
- [3] *Cabova K.*: Fire test of FRP members applied to railway bridge. Proceedings of the 9th International Conference on Structures in Fire, Princeton, USA, 2016, 784-790
- [4] EN 13501-1:2007 Fire classification of construction products and building elements, Part 1: Classification using data from reaction-to-fire tests. CEN
- [5] *Zhao X-L.*, *Zhang L.*: State-of-the-art review of FRP strengthened steel structures. *Engineering Structures*, **29**, 8, 2007, 1808-1823
- [6] *Bisby L.A.*: ISIS Educational Module 8: Durability of FRP Composites for Construction. ISIS Canada, A Canadian Network of Centres of Excellence, 2006
- [7] *Davalos J.F.*, *Chen A.*, *Zou B.*: Performance of a scaled FRP deck-on-steel girder bridge model with partial degree of composite action. *Engineering Structures*, **40**, 8, 2012, 51-63
- [8] *Karbhari V.M.* (Ed.): Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites, Types Properties and Testing Methods. Elsevier, Woodhead Publishing, 2014
- [9] *Clarke J.L.* (Ed.): Structural Design of Polymer Composites. EUROCOMP - Design Code and Handbook. The European Structural Polymeric Composites Group, EifN SPON, London, UK, 1996
- [10] *Ascione L.*, *Gutierrez E.*, *Dimova S.*, *Pinto A.*, *Denton S.* (Eds.): Prospect for new guidance in the design of FRP. EC Joint Research Centre, Scientific and Technical Report No. 27666 EN, European Union, 2016
- [11] BD90/05 Design of FRP Bridges and Highway Structures, The Highways Agency, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, the Department for Regional Development Northern Ireland, May 2005
- [12] CNR-DT 205/2007 Guide for the Design and Construction of Structures made of Pultruded FRP elements. Italian National Research Council, October 2008
- [13] CUR 96 Fibre Reinforced Polymers in Civil Load Bearing Structures. Dutch Recommendation, 2003
- [14] *Hraský O.*: Fiber-reinforced polymers at elevated temperature. Diploma thesis. Czech Technical University in Prague, 2016
- [15] CSN EN 1147:2001 Portable ladders for fire fighters. Czech Standard
- [16] *Ryjacek P.*, et al.: MVL 725 - Application of FRP composites for equipment of railway bridge, Praha, 2016