

PRZEMYSŁAW MOSSAKOWSKI¹⁾

PRĘTY Z KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH Z WŁÓKNAMI DO ZBROJENIA BETONOWYCH KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH

STRESZCZENIE.Jedną z podstawowych tendencji we współczesnym mostownictwie jest wprowadzanie nowych niekonwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych. Celem, który przyświeca naukowcom i inżynierom jest zwiększenie trwałości konstrukcji z jednoczesnym zmniejszeniem kosztów związanych z ich budową i utrzymaniem. Pręty z kompozytów polimerowych zbrojonych włóknami są przykładem nowych materiałów konstrukcyjnych. W artykule przedstawiono przegląd podstawowych wiadomości dotyczących właściwości tego rodzaju prętów, ich zastosowań, uwarunkowań technicznych: projektowych i wykonawczych oraz zagadnień badawczych związanych z stosowaniem prętów z FRP w konstrukcjach.

1. WSTĘP

Mosty to bardzo ważna część sieci komunikacyjnej, ponieważ są najbardziej newralgicznymi i jednymi z najdroższych elementów tej sieci. Te czynniki są powodem, dla którego poszukuje się rozwiązań wydłużających czas użytkowania oraz zmniejszających koszty utrzymania obiektów mostowych. Większość współcześnie budowanych mostów to obiekty betonowe. Jednym z podstawowych czynników powodujących obniżenie trwałości mostów betonowych jest korozja zbrojenia. Proces ten rozpoczyna się w momencie, gdy otulina betonowa straci swoje właściwości ochronne

¹⁾ mgr inż. – Instytut Dróg i Mostów, Politechnika Warszawska

względem stali zbrojeniowej. Korozja prętów stalowych może w bardzo szybki sposób rozwijać się zwłaszcza tam gdzie elementy konstrukcji narażone są na działanie wilgoci, zmian temperatury i dużych obciążeń. Do takich konstrukcji zaliczają się: konstrukcje morskie, płyty jezdne i podpory mostów, płyty stropowe w garażach, zbiorniki, konstrukcje przemysłowe, oczyszczalnie ścieków. W ostatnim czasie z pomocą w rozwiązaniu tego problemu przyszły nowe materiały konstrukcyjne, które powstawały z myślą o zastosowaniu w lotnictwie, a współcześnie znalazły swoje zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, w tym budownictwie.

Kompozyty polimerowe zbrojone włóknami, (ang. *Fiber Reinforced Polymer*, FRP) są to tworzywa sztuczne, w których zatopiono włókna najczęściej szklane, węglowe lub aramidowe [1]. Postęp w technologii kompozytów polimerowych nastąpił po II Wojnie Światowej w związku z dynamicznym rozwojem lotnictwa, które potrzebowało materiału lekkiego i wytrzymałego, jednocześnie dającego się w dowolny sposób kształtować i obrabiać. Przemysł budowlany wykorzystuje ten nowy materiał w postaci [2]:

- kształtowników podobnych do tych w konstrukcjach stalowych,
- prętów służących do zbrojenia betonu,
- cięgien i kabli do sprężania konstrukcji betonowych lub podwieszania konstrukcji,
- płyt, taśm, mat i arkuszy wykorzystywanych głównie do wzmacniania i remontów konstrukcji,
- prefabrykowanych elementów stanowiących np.: pomosty konstrukcji inżynierskich [3],
- elementów wyposażenia budowli np.: instalacje wodno-kanalizacyjne czy balustrady.

Niniejsze opracowanie dotyczy tylko prętów zbrojeniowych wykonanych z kompozytów polimerowych do zbrojenia betonu.

2. WŁAŚCIWOŚCI PRĘTÓW ZBROJENIOWYCH WYKONANYCH Z KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH ZBROJONYCH WŁÓKNAMI

Pierwsze prace związane z prętami zbrojeniowymi wykonanymi z kompozytów polimerowych podjęła armia amerykańska w latach 60 ubiegłego wieku [4]. Zastosowanie w budownictwie cywilnym znalazły po raz pierwszy w latach 80-tych XX wieku w USA, Japonii i Niemczech [5, 6]. Do dnia dzisiejszego w Japonii, Kanadzie, Niemczech, Wielkiej Brytanii i USA wykonano kilkaset konstrukcji z zastosowaniem zbrojenia z kompozytów polimerowych. Doświadczenie naukowców, projektantów i wykonawców zaowocowało opracowaniem wytycznych do projektowania i stosowania prętów z FRP w konstrukcjach budowlanych różnego przeznaczenia np. [5]. W Europie pręty z FRP stosuje się głównie w budownictwie kubaturowym, w Japonii w budownictwie kubaturowym (np. w płytach stropowych budynków szpitalnych) oraz w konstrukcjach inżynierskich, w Kanadzie i USA głównie w konstrukcjach inżynierskich.

Udoskonalanie właściwości mechanicznych zbrojenia z FRP oraz uprzemysłowienie produkcji spowodowało, że w ostatnim 10-leciu pręty z FRP stały się alternatywą dla klasycznego zbrojenia stalowego, zwłaszcza w konstrukcjach narażonych na działanie czynników silnie agresywnych względem otuliny betonowej, chroniącej stal zbrojeniową przed korozją [7].

Właściwości prętów z kompozytów polimerowych zbrojonych włóknami ściśle zależą od cech składników i procesu technologicznego ich wykonania. Kompozyty można sklasyfikować na podstawie materiału włókien i spoiwa oraz formy uzbrojenia (włókien).

Pręty zbrojeniowe wykonywane są z dwóch podstawowych składników: zbrojenia i spoiwa. Zbrojeniem najczęściej są włókna szklane, węglowe i aramidowe. Od rodzaju włókien pochodzą również skróty opisujące nazwy poszczególnych rodzajów prętów: GFRP – ang. *glass fiber reinforced polymer*, pręty z kompozytu FRP zbrojone włóknami szklanymi, CFRP – ang. *carbon FRP*, pręty z kompozytu FRP zbrojone włóknami węglowymi oraz AFRP – ang. *aramid FRP*, pręty z kompozytu FRP zbrojone włóknami aramidowymi. Włókna spełniają rolę szkieletu kompozytu, który przenosi obciążenia i od ich cech zależą właściwości mechaniczne prętów: wytrzymałość na rozciąganie, sztywność itp. O wyborze włókna decydują nie tylko właściwości mechaniczne, ale również technologiczne (produkcja prętów) i ekonomiczne (cena, koszty produkcji) [3]. Spoiwem są żywice poliestrowe, epoksydowe, winylowe, fenolowe i poliuretanowe, do których dodawane są wypełniacze i dodatki mające wpływ np. na kolor lub szybkość starzenia materiału pod wpływem działania promieni ultrafioletowych, co ma ważne znaczenie w czasie transportu i składowania prętów. Zadaniem spoiwa jest utrzymywanie włókien we właściwym położeniu, przekazywanie na nie obciążeń, ochrona przed działaniem substancji agresywnych. Chcąc osiągnąć pożądane właściwości końcowego produktu można stosować różne włókna i spoiwa, projektując kompozyt o zupełnie nowych cechach, jednak tą dziedziną wiedzy zajmuje się inżynieria materiałowa.

Pręty zbrojeniowe z FRP mają naturę anizotropową. Ich cechy mechaniczne ściśle zależą od takich parametrów, jak zawartość włókien, kształt i materiał włókien, rodzaj żywicy, układ włókien. Właściwości takie, jak gęstość, współczynnik rozszerzalności termicznej, zachowanie się w wysokich temperaturach oraz właściwości mechaniczne: wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie, ścinanie, przyczepność do innych materiałów, pełzanie, efekty zmęczeniowe czy forma zniszczenia mają wpływ na właściwą interpretację zachowania się prętów z FRP pod obciążeniem oraz możliwości ich stosowania do zbrojenia betonu. Przykładowe właściwości prętów kompozytowych zaczerpnięte z pracy [5] przedstawiono w tablicy 1.

Pręty zbrojeniowe wykonane z FRP, charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie, ale dużo niższą wytrzymałością na ściskanie. Zniszczenie przy rozciąganiu następuje nagle, bez wyraźnego uplastycznienia, a odkształcenie graniczne jest dużo mniejsze niż w przypadku prętów stalowych. Elementy betonowe zbrojone prętami z FRP wykazują bardzo dobre właściwości zmęczeniowe, ale nie są odporne na obciążenia działające poprzecznie do włókien. Prętami z FRP nie można zbroić

elementów konstrukcji narażonych na działanie ognia lub wysokich temperatur, mimo otuliny betonowej i niepalności kompozytów. W temperaturze około 65 – 120 °C (tzw. temperatura zeszklenia) polimer zaczyna mięknąć i tracić swoje właściwości – zmniejsza się zwłaszcza moduł odkształcalności podłużnej kompozytu, choć włókna cały czas zachowują swoje właściwości. Rozszerzalność termiczna prętów w kierunku poprzecznym i podłużnym może różnić się nawet kilkakrotnie. Współpraca prętów z betonem jest zapewniona przez odpowiednie ukształtowanie powierzchni prętów – uźebrowanie (współpraca mechaniczna), jak również przez adhezję materiałów (współpraca chemiczna).

Tablica 1. Podstawowe właściwości prętów GFRP, CFRP i AFRP w porównaniu z prętami stalowymi [5]

Table 1. Basic properties of GFRP, CFRP and AFRP bars in comparison to steel bars [5]

	Stal	GFRP	CFRP	AFRP
Właściwości fizyczne				
Gęstość objętościowa [g/cm ³]	7,85	1,25 – 2,10	1,50 – 1,60	1,25 – 1,40
Współczynnik rozszerzalności termicznej $\alpha^* \cdot 10^{-6}$ [1/°C]				
w kierunku α_L	11,7	6 do 10	- 2 do 0	- 6 do - 2
w kierunku α_T	11,7	21 do 23	23 do 32	60 do 80
Właściwości mechaniczne w próbie rozciągania *)				
Granica plastyczności [MPa]	270 – 550	–	–	–
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	483 – 690	483 – 1600	600 – 3690	1720 – 2540
Moduł odkształcalności podłużnej [GPa]	200	35 – 51	120 – 580	41 – 125
Odształcenie na granicy plastyczności [%]	1,4 – 2,5	–	–	–
Odształcenie przy zerwaniu [%]	6 – 12	1,2 – 3,1	0,5 – 1,7	1,9 – 4,4
*) – dla prętów z FRP z objętościową zawartością włókien od 50% do 70% α_L – w kierunku równoległym do włókien α_T – w kierunku prostopadłym do włókien				

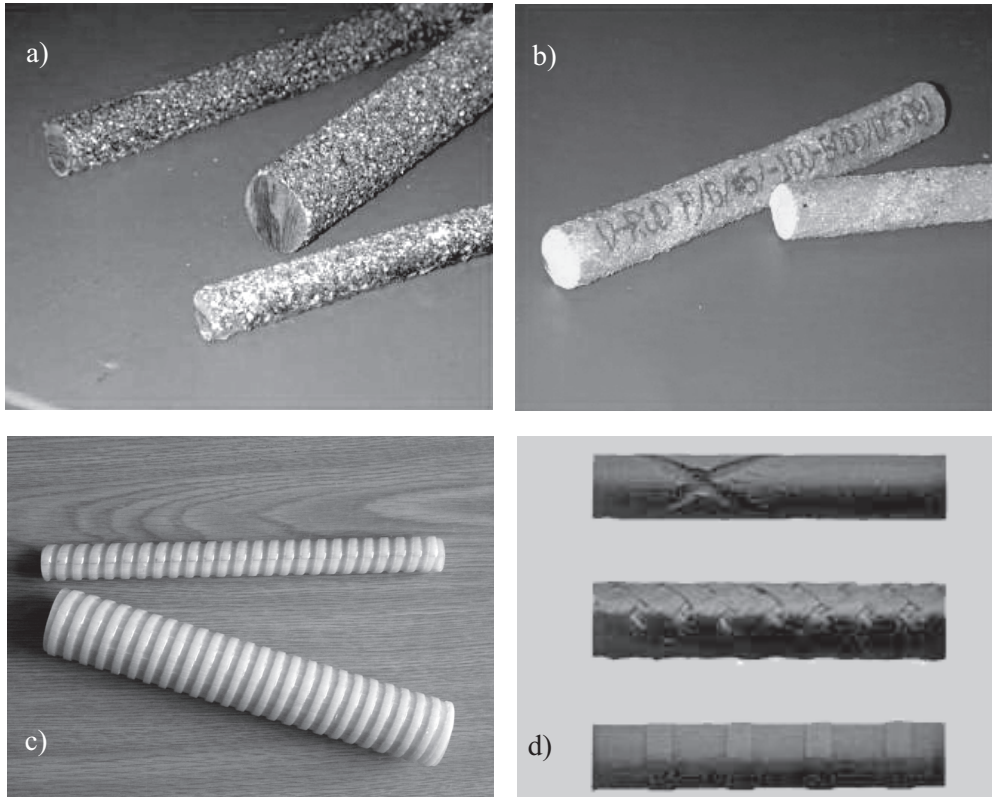
Do tej pory brak jest ogólnej standaryzacji materiału. W zaleceniach ACI [5] nakazuje się, by przed zastosowaniem prętów w danej konstrukcji, przeprowadzić komplet badań materiałowych w celu sprawdzenia czy dane zbrojenie spełnia wymogi dopuszczające je do stosowania. Na podstawie właściwości fizycznych i mechanicznych można określić zalety i wady zbrojenia z FRP – zostały one przedstawione w tablicy 2 wraz ze wskazaniem ich zastosowań konstrukcyjnych.

Tablica 2. Zalety i wady prętów z FRP [5]
 Table 2. Advantages and disadvantages of FRP bars [5]

Zalety i zastosowania:	
- odporność na korozję	- konstrukcje inżynierskie, wodne,
- wysoka wytrzymałość na rozciąganie	- stosowanie w miejscach konstrukcji gdzie występują znaczące naprężenia rozciągające, przypowierzchniowe zbrojenie przeciwskurczowe
- bardzo niska przewodność cieplna	- w elementach konstrukcji, które mają posiadać niską przewodność cieplną
- nie zakłócanie pola magnetycznego	- konstrukcje niepowodujące zakłóceń pola magnetycznego np. wieże telewizyjne, pomieszczenia radiologiczne w szpitalach,
- odporność na działanie substancji chemicznych	- oczyszczalnie ścieków, budownictwo przemysłowe,
- mała przewodność elektryczna (AFRP, GFRP)	- konstrukcje służące izolowaniu urządzeń pracujących pod wysokim napięciem
Wady:	
- anizotropowość cech fizycznych i mechanicznych (np.: rozszerzalność termiczna, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie)	
- wrażliwość na siły ścinające	
- niski moduł odkształcalności podłużnej	
- redukcja nośności przy obciążeniach długotrwałych	
- mała odporność na temperaturę	
- brak standaryzacji materiału	
- stosunkowo wysoka cena jednostkowa	

Z właściwościami materiałowymi wiążą się uwarunkowania technologiczne stosowania prętów z FRP. Wraz z niskim ciężarem objętościowym idzie łatwość transportu i układania tego typu zbrojenia. Pręty z FRP dają się w dowolny sposób kształtować, jednak nie można ich giąć na budowie. Tak samo jak w przypadku zbrojenia stalowego muszą być zachowane minimalne promienie gięcia w zależności od średnicy pręta. Wszystkie elementy zbrojeniowe muszą być przywożone w postaci prefabrykatów zbrojeniowych. Poszczególne pręty można łączyć na zakład, lub też za pomocą specjalnych łączników. Siatki i kosze zbrojeniowe można wiązać sznurkiem o odpowiedniej średnicy, który musi być wykonany z materiału określonego przez producenta prętów. Niska gęstość kompozytów może powodować wypieranie przez mieszankę betonową prętów, co powoduje, że szkielet zbrojeniowy musi być zawsze mocowany do desek w sposób trwały i zapewniający niezmienność założonego kształtu zbrojenia. Do przycinania prętów na wymiar można stosować zwykłe narzędzia.

Producenci prętów z FRP oferują je w różnym asortymencie średnic i długości. Zasadnicza odmienność, jaka może wystąpić między prętami, to sposób zapewnienia współpracy między betonem a prętem. Mają one różne ukształtowanie powierzchni: uźebrowaną, w powłoce piaskowej, nacinaną, powlekaną piaskiem i nacinaną (rys. 1).



Rys.1. Pręty kompozytowe: a) pręty z CFRP, b) pręty z GFRP, c) pręty z GFRP uźebrowane, d) różne przykłady powierzchni prętów z FRP [9, 14]

Fig.1. Examples of FRP bars: a) CFRP, b) plain GFRP, c) ribbed GFRP, d) various shapes [9, 14]

W tablicach 3 i 4 zostały przedstawione niektóre rodzaje prętów z FRP produkowane w Europie i USA [8, 9]. W tablicy 4 widać zmniejszenie wytrzymałości przy rozciąganiu prętów wraz z wzrostem ich średnicy, spowodowane jest tzw. efektem „*shear lag*”, który powoduje ścięcie spoiwa i zniszczenie pręta. Producent w przypadku prętów produkowanych w USA zastrzega, że do betonów opartych na cemencie portlandzkim można stosować tylko średnice prętów od 6 mm do 25 mm, w których spoiwem są żywice winylowe; wyższe średnice można stosować wyłącznie jako zbrojenie montażowe (spoiwem w nich są żywice poliestrowe).

Tablica 3. Przykład asortymentu prętów z GFRP produkowanych w Europie [9]
Table 3. Example of GFRP bars produced in Europe [9]

Rodzaj pręta, właściwości	Średnica [mm]	Standardowa długość [m]		
Pręty proste	16	10	12	14
	32	–	12	14
Strzemiona i fabrycznie gięte pręty	20	–	–	–
Moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa]	60			
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1000			

Tablica 4. Przykład asortymentu prętów z GFRP produkowanych w USA [8]
Table 4. Example of GFRP bars produced in the U.S. [8]

Średnica [mm]	Przekrój poprzeczny [mm ²]	Średnica rzeczywista [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości przy próbie rozciągania E [GPa]
6	33,23	6,35	825	40,8
8	84,32	9,53	760	40,8
13	144,85	12,70	690	40,8
16	217,56	15,88	655	40,8
19	295,50	19,05	620	40,8
22	382,73	22,23	586	40,8
25	537,90	25,40	550	40,8
29	645,00	28,65	517	40,8
32	807,34	31,75	480	40,8

Wytyczne projektowe dotyczące zbrojenia konstrukcji prętami kompozytowymi narzucają ograniczenia w ich stosowaniu. Nie należy ich stosować w elementach ściskanych (np. słupach), ponieważ następuje wtedy duża redukcja ich nośności ze względu na wyboczenie włókien kompozytu. Nie należy ich stosować w obszarach występowania obciążeń sejsmicznych, ponieważ mogą zaistnieć w konstrukcji duże siły tnące, na które pręty kompozytowe są bardzo wrażliwe. Nie należy ich stosować w układach ramowych i układach statycznych, w których może dojść do efektu redystrybucji momentów. Można stosować pręty kompozytowe w elementach zginanych i ścinanych, zbrojenie z prętów kompozytowych może służyć do przeniesienia sił powstałych od zmian temperatury i skurczu [5, 8].

Doświadczenia projektowe dotyczące zbrojenia konstrukcji prętami kompozytowymi są niewielkie. W kilku krajach opracowano wytyczne do projektowania elementów zbrojonych prętami z FRP (Japonia, Kanada, USA). Najczęściej projektowanymi elementami z wykorzystaniem prętów kompozytowych są płyty w konstrukcjach kubaturowych i inżynierskich. W niniejszym opracowaniu opisane zostaną płyty jezdne mostów. Pierwsze płyty były projektowane ze względu na tzw. zrównoważony stopień zbrojenia – ρ_s , tak by wraz ze zniszczeniem stali w strefie rozciąganej następowało zniszczenie betonu w strefie ściskanej. Następnie obliczony stopień zbrojenia prętami stalowymi zastępowano równoważnym stopniem zbrojenia prętami kompozytowymi z uwzględnieniem warunku sztywności lub wytrzymałości.

Zbrojenie dolne (rozciągane) obliczano na warunek sztywności $\rho_f = E_s / E_f \cdot \rho_s$, zbrojenie górne (ściskane) na warunek wytrzymałości $\rho_f = f_s / f_f \cdot \rho_s$, gdzie:

ρ_f, ρ_s – stopień zbrojenia prętami kompozytowymi, stalowymi;

E_f, E_s – moduł odkształcalności podłużnej materiału prętów kompozytowych, stali;

f_f, f_s – wytrzymałość na rozciąganie/ściskanie prętów kompozytowych, stali.

Takie podejście powodowało zbyt duże nasycenie przekrojów prętami – nie było ekonomiczne w porównaniu do rozwiązań z zastosowaniem prętów stalowych. Nowe podejście (empiryczne/użytkowe) to takie zbrojenie płyt by rozwarcie rys nie było większe niż 0,5 mm (czyli dużo większe niż dopuszczalne rozwarście dla rys, w przypadku zbrojenia konstrukcji prętami stalowymi) oraz naprężenia w zbrojeniu kompozytowym od obciążeń długotrwałych nie przekraczały 15% wytrzymałości charakterystycznej, a pod obciążeniem długotrwałym i użytkowym 30% wytrzymałości charakterystycznej. Tak nieduży poziom wykorzystania nośności spowodowany jest jej spadkiem, gdy pręty są poddane obciążeniom długotrwałym.

Głównym powodem ograniczającym zastosowanie prętów z kompozytów polimero-wych jest ich cena. Na podstawie danych z Wielkiej Brytanii [10] cena jednostkowa prętów kompozytowych z włóknami szklanymi jest 3 - 5 razy większa od ceny prętów stalowych i stanowi 50 - 70% ceny prętów ze stali nierdzewnej. Zastosowanie zbrojenia z GFRP powoduje zwiększenie wydatków sumarycznych o 4 - 8% w przypadku typowego wiaduktu drogowego. Analizę ekonomiczną zastosowania prętów z FRP należy widzieć z szerszej perspektywy tzn. głównie stosując materiały kompozytowe o innych właściwościach mechanicznych musimy zmienić konstrukcję obiektu. Przekładać się to może na zmniejszenie ciężaru konstrukcji, a to spowoduje zmniejszenie np. wymaganych fundamentów. Mniejsza objętość materiałów powoduje zmniejszenie kosztów robocizny, przyspieszenie robót zbrojarskich i zmniejszenie zaangażowania ciężkiego sprzętu. Ta sama cecha powoduje zmniejszenia nakładów na transport prętów. Koszt zbrojenia kompozytowego należy również rozpatrywać w odniesieniu do czasu eksploatacji obiektu. Trwałość obiektu wzrasta, a nakłady na utrzymanie maleją (jednak jak na razie jest to hipoteza, ponieważ najstarsze mosty, w których zastosowano pręty kompozytowe są użytkowane nie dłużej niż 10 lat). Można przypuszczać, że cena kompozytów będzie maleć, ponieważ ich cena w ciągu ostatnich 10 lat spadła o 50% [3].

Do dnia dzisiejszego nie opracowano dokładnej oceny wpływu prętów kompozytowych na środowisko naturalne [10] w czasie ich produkcji jak i wykorzystania w przemyśle. W przypadku produkcji prętów to zużycie energii na wykonanie kształtownika kompozytowego z włókien szklanych ze spoiwem polimerowym metodą pultruzji (przeciąganie włókien przez matrycę, poddaną działaniu wysokiej temperatury i ciśnienia [2, 11]) wymaga $\frac{1}{4}$ energii potrzebnej do wykonania kształtownika stalowego [3]. Przewaga stali nad kompozytem to możliwość jej recyklingu, jednak odzyskanie jej z konstrukcji jest bardzo kosztowne.

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ PRĘTÓW Z FRP DO ZBROJENIA KONSTRUKCJI INŻYNIERSKICH

Poniżej przedstawione zostaną konstrukcje amerykańskie i kanadyjskie, w których wykorzystano zbrojenie FRP do wykonania płyt jezdnych mostów. Jak wykazano w pracach [12, 13] użyteczność płyt mostowych, które są oparte na dźwigarach głównych oraz gdy ich rozstaw nie przekracza 2,50 m jest zadawalająca, mimo że pręty z FRP cechuje dużo niższa sztywność niż pręty stalowe. Wszystkie niżej opisane mosty to konstrukcje belkowe, na których oparta jest płyta betonowa zbrojona prętami z FRP [7] z wyjątkiem ostatniej, która w 70 % zbrojona jest prętami z FRP i sprężona ciągniami z FRP.

Joffre Bridge wybudowany został w Kanadzie w 1997 roku. Jest to pięcioprzęsłowy most (prześła skrajne po 25,90 m, wewnętrzne 37,50 m), w którym dźwigarami głównymi są blachownice stalowe, a na nich oparta jest płyta betonowa grubości 260 mm. Rozstawy osiowe czterech dźwigarów są równe i wynoszą 3,70 m, a wysięg wsporników to 1,00 m. Znacząca część płyty betonowej jest zbrojona prętami CFRP.

Wotton Bridge (rys. 2) został wybudowany również w Kanadzie w 2001 roku. Płyta betonowa oparta na czterech strunobetonowych dźwigarach w rozstawach 2,65 m, przy rozpiętości belek 30,60 m, które są swobodnie podparte. Płyta mostu do osi podłużnej została uzbrojona prętami z GFRP, a warstwa dolna zbrojenia częściowo prętami z CFRP. Krawężniki i betonowe bariery były uzbrojone również prętami GFRP, drugą połowę mostu uzbrojono stalą.

Magog Bridge (rys. 3) wybudowany w 2002 roku w Kanadzie ma trzy prześła: 26,20+31,30+26,20 m. W przekroju poprzecznym znajduje się pięć blachownic stalowych o schemacie statycznym belki ciągłej. Na nich oparta jest płyta pomostu grubości 220 mm, rozstaw dźwigarów to 2,845 m, a wysięg wsporników to 1,352 m. Jedno prześło 26,20 m zostało w całości uzbrojone prętami FRP, w ten sam sposób, co Wotton Bridge.

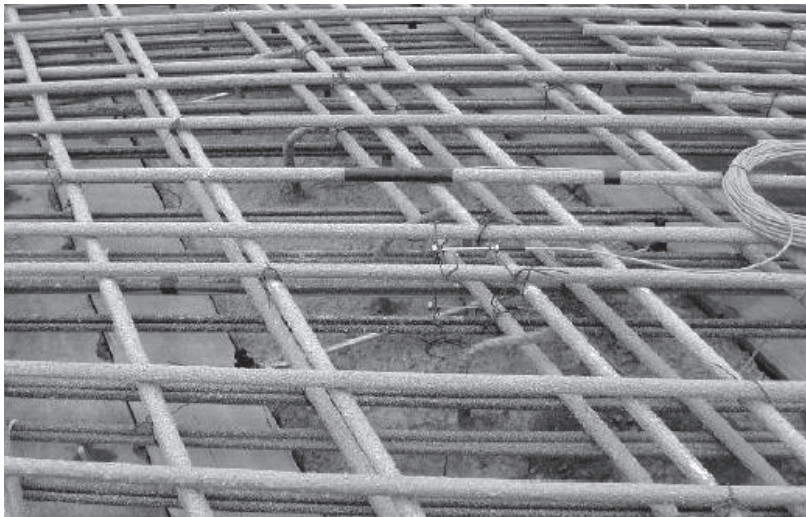
Morristown Bridge został oddany do użytku w 2002 roku w USA. W przekroju poprzecznym znajduje się pięć dźwigarów stalowych zintegrowanych z przyczółkami. Rozpiętość mostu to 43,00 m, rozstaw osiowy dźwigarów to 2,364 m, a wysięg wsporników to 0,915 m. Z dźwigarami połączona jest płyta betonowa o grubości 230 mm.

Ten most różni się tym od innych, że został zaprojektowany według kryteriów użytkowalności tzn. tak by rysy pod obciążeniem użytkowym nie miały szerszego rozwarcia niż 0,5 mm. Płyta jezdna mostu jest całkowicie uzbrojona prętami z GFRP. Suma długości prętów średnicy 19 mm, użytych do zbrojenia płyty wyniosła 16 775 m.

a)



b)



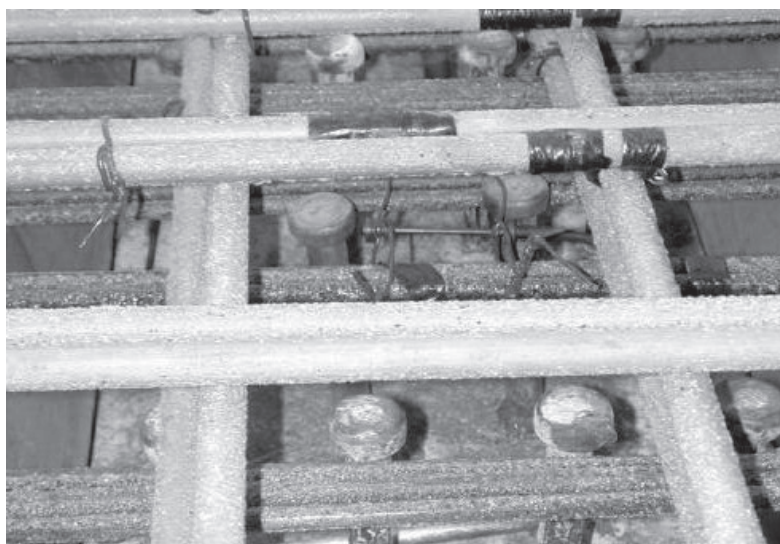
Rys.2. Most Wotton: a) widok ogólny, b) układ zbrojenia wraz z doczepionymi do niego tensometrami [13, 14]

Fig.2. Wotton Bridge: a) general view b) arrangement of reinforcement with the attached strain gauge [13, 14]

a)



b)



Rys.3. Most Magog: a) widok ogólny, b) układ zbrojenia wraz z doczepionymi do niego tensometrami, widoczne trzpienie zespolenia [13, 14]

Fig.3. Magog Bridge: a) general view, b) arrangement of reinforcement with the attached strain gauge (connection pins are visible) [13, 14]

Dane techniczne mostów są zamieszczone w tablicy 5.

Tablica 5. Mosty z płytą jezdnią zbrojoną prętami z FRP [7]
 Table 5. Bridges with the surface of the roadway slab reinforced by FRP bars [7]

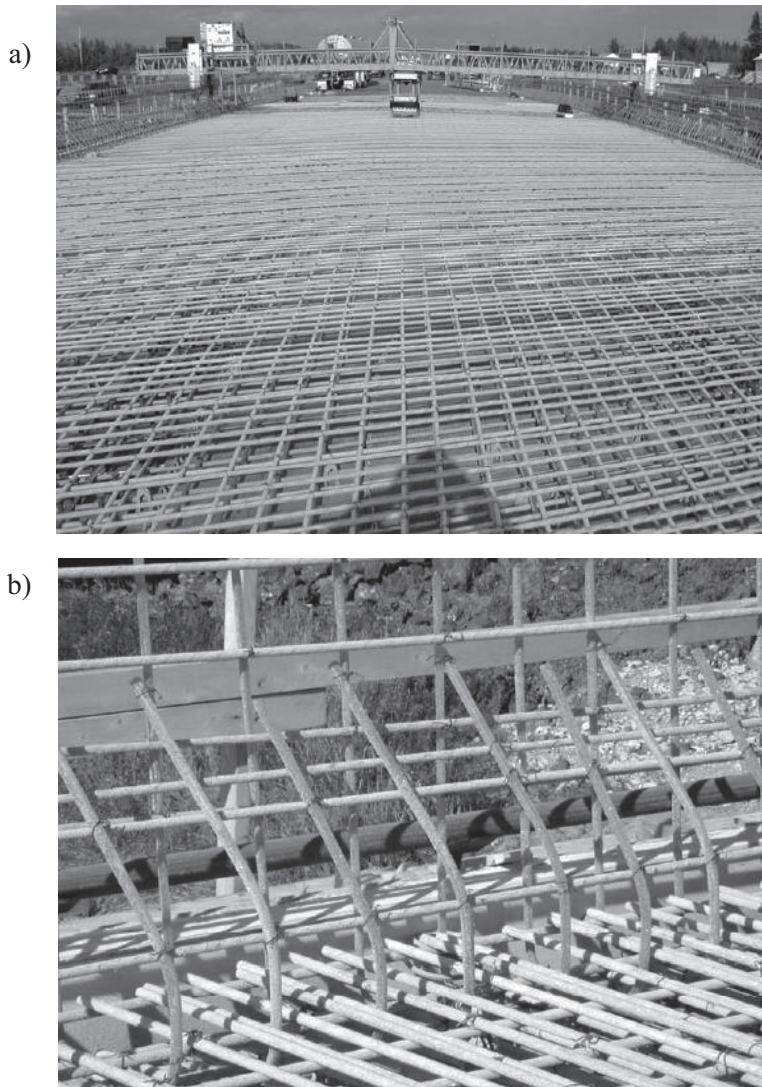
Most	Rok budowy	Długość × szerokość [m]	Grubość płyty jezdnej [mm]	Rozstaw osiowy dźwigarów [m]	Zbrojenie w płycie (główne)	Liczba pojazdów dziennie
Joffre most miejski	1997	164,4 × 16,8	260	3,70	CFRP – góra Stal – dół	27 000
Wotton most lokalny	2001	30,6 × 8,9	200	2,60	GFRP – góra CFRP – dół	< 1000
Magog obiekt autostradowy	2002	83,7 × 14,1	220	2,85	GFRP – góra CFRP – dół	35 000
Morriestown most miejski	2002	43,0 × 11,3	230	2,36	GFRP – góra i dół	7 000

Wszystkie opisane mosty przeszły obciążenia próbne oraz są w ciągłym użytku od momentu wybudowania. Przez cały czas są monitorowane przez pomiary temperatury, odkształceń zbrojenia z FRP i płyty (za pomocą czujników światłowodowych wbudowanych w płytę betonową), odkształceń dźwigarów i ich ugięć. Autorzy projektów po przeanalizowaniu wyników pomiarów z kilkuletniego okresu czasu użytkowania mostów podali takie oto wnioski [7]:

1. Nie ma przeciwwskazań do stosowania prętów z FRP do zbrojenia płyt jezdnych mostów.
2. Wyniki monitoringu potwierdziły podobieństwo, jeżeli chodzi o szerokość rys, odkształcenia prętów z FRP i ugięcia do wyników dla płyt zbrojonych stalą.
3. Płyty zbrojone prętami z FRP spełniają wymagania ze względu na trwałość mimo, wyjątkowo agresywnego środowiska i obciążeń, jakim były poddawane. Nie stwierdzono nowych rys ani propagacji już istniejących.

Pozytywne doświadczenia z eksploatacji wybudowanych mostów spowodowały, że powstały jeszcze trzy obiekty: most Cookshire-Eaton (2003), Val-Alain (2004) oraz najmłodszy z nich most Melbourne (2005), wszystkie wybudowano w Kanadzie. Pierwszy z nich to obiekt miejski, dwa pozostałe to obiekty autostradowe. Most Cookshire-Eaton to obiekt dwuprzęsłowy 26,80+26,05 m, płyta o grubości 200 mm oparta na pięciu dźwigarach strunobetonowych, rozstaw belek to 2,70 m, wysięg wsporników to 1,40 m. Płyta na jednym przęśle została zbrojona całkowicie stalą, a na drugim całkowicie prętami kompozytowymi GFRP. Otulina betonowa górna 64 mm, dolna 38 mm. Most Val-Alain (rys. 4) to również konstrukcja płytowo belkowa; dźwigary główne to cztery blachownice stalowe w rozstawie 3,15 m, w układzie trójprzęsłowym: 24,95+18,70+6,24 m. Zespolono z nimi płytę betonową ze wspornikami o wysięgu 1,57 m, o grubości 225 mm całkowicie zbrojoną prętami

z GFRP wraz, z którą zostały monolitycznie połączone bariery betonowe, które również były w całości zazbrojone prętami z GFRP. Otuliny (betonowa górna i dolna) mają po 38 mm.

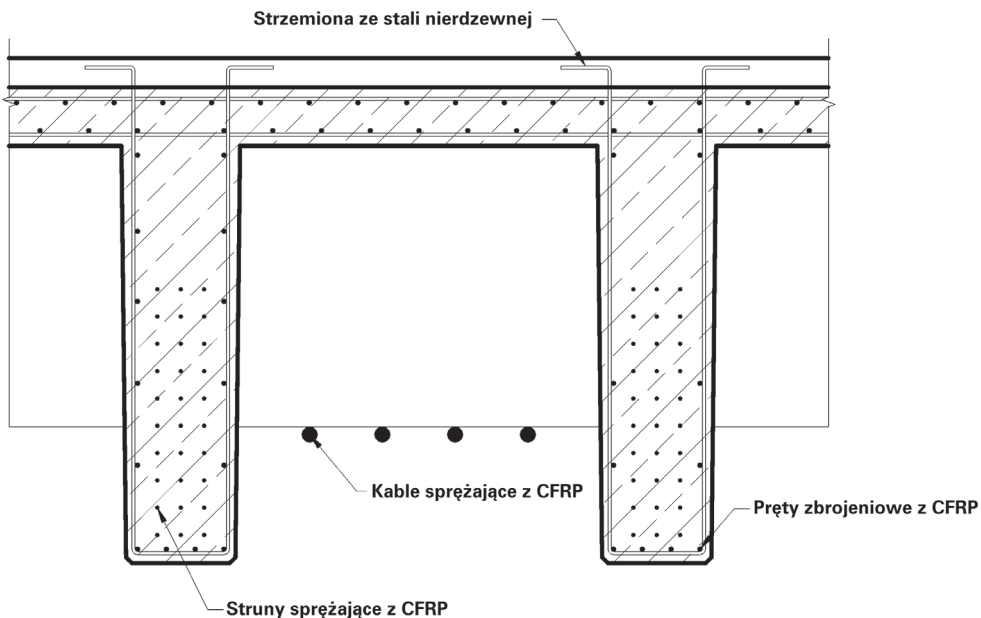


Rys.4. Zbrojenie mostu Val-Alain: a) widok na zbrojenie płyty, b) widok zbrojenia barier betonowych i krawędzi płyty [13, 14]

Fig.4. Reinforcement of Val-Alain bridge: a) at the surface of the roadway slab, b) inside the concrete barriers and at the edges of the surface of the roadway slab [13, 14]

Most Melbourne to też konstrukcja płytowo belkowa, cztery dźwigary strunobetonowe w rozstawie 3,15 m, na nich płyta betonowa o grubości 200 mm, ze wspornikami o wysięgu 1,53 m. Płyta została całkowicie zazbrojona prętami z GFRP jak również połączone z płytą monolitycznie bariery betonowe. Otulina w przypadku tego mostu to 60 mm dla górnego i 38 mm dla dolnego zbrojenia, ale w jednym z pośrednich przęsł wykonano otulinę 25 mm do dolnego i górnego zbrojenia [14]. Płyty pomostowe w wyżej wymienionych obiektach zostały zaprojektowane według kryteriów użyteczności z jednoczesnym ograniczeniem naprężeń w prętach z FRP. Po wybudowaniu tych obiektów poddano je próbnym obciążeniom oraz monitorowaniu w czasie normalnej eksploatacji. Wnioski, które zostały zaprezentowane w pracy [14] potwierdziły wcześniejsze i dodatkowo potwierdzono, iż kryterium sztywności lepiej przybliży pracę płyt zbrojonych prętami z FRP i jest ekonomiczniejsze.

Najciekawszym mostem, który został wybudowany z zastosowaniem prętów zbrojeniowych z FRP jest „Bridge Street” w Southfield w USA. Poza prętami zbrojeniowymi z FRP do budowy tego mostu użyto strun sprężających i kabli sprężających z FRP. Budowę mostu poprzedziły 5-letnie badania belek w skali 1:1 [4, 15], których celem było znalezienie rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego o 100% odporności na korozję. Układ konstrukcyjny ma schemat statyczny belki trójprzęsłowej. W przekroju poprzecznym znajduje się 8 belek, sprężonych wewnątrz strunami z FRP, zewnętrznie podłużnie i poprzecznie kablami z FRP, współpracujących z płytą o grubości 225 mm (rys. 5).

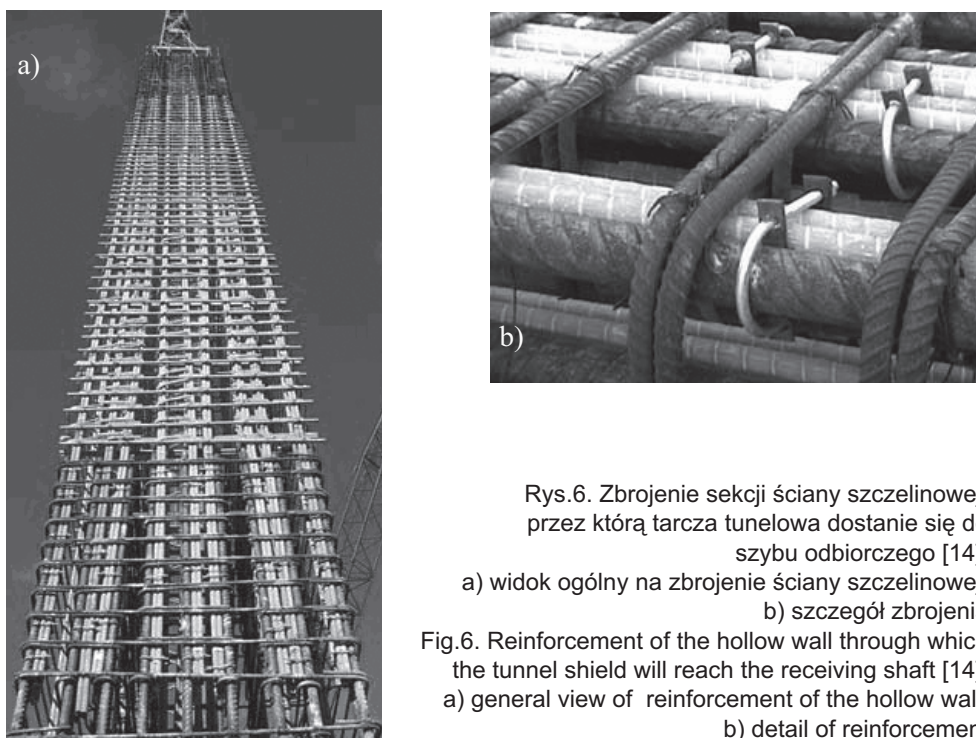


Rys.5. Przekrój poprzeczny przez most w Southfield [4]

Fig.5. Cross-section of the Bridge in Southfield [4]

Belki były prefabrykowane w układzie dwubelkowym (podwójne T). Stal nierdzewna została wykorzystana jedynie na strzemiona belek. Badania przeprowadzono w celu sprawdzenia faktycznej nośności belek zbrojonych prętami i cięgnami sprężającymi z FRP. Odształcenie graniczne w próbie rozciągania prętów jest niewielkie, a pręty niszczą się nagle, projektanci mostu obawiali się całkowitego i nagłego zniszczenia w przypadku przeciążenia. Wykonano identyczne belki, jedną zbrojoną stalą, drugą FRP w celu określenia zapasów nośności oraz porównania pracy pod obciążeniem eksploatacyjnym. Jednocześnie belki te posłużyły do opracowania systemu monitoringu konstrukcji, któremu został poddany most po oddaniu do użytku na czas pięciu lat. Po przeprowadzonych testach okazało się, że belkę zbrojoną prętami z FRP zniszczono dopiero po ponad pięciokrotnym przeciążeniu względem projektowanego maksymalnego obciążenia użytkowego. Obciążenie, które zarysowało belkę było większe o 40% niż maksymalne obciążenie użytkowe. Wartościowym spostrzeżeniem z przeprowadzonych badań był wniosek, że przed całkowitym zniszczeniem konstrukcji, występuje znaczące jej zarysowanie. Może to być wskaźnik wyczerpania nośności konstrukcji zbrojonej prętami FRP, jednak tu należy przypomnieć, że głównym zbrojeniem nośnym były cięgna sprężające z FRP.

Pręty zbrojeniowe z kompozytów polimerowych mogą służyć jako zbrojenie montażowe. W ten sposób wykorzystano pręty z FRP do budowy ścian szczelinowych (rys. 6) szybu odbiorczego dla tarczy tunelowej TBM w Amsterdamie, New Dehli, Szanghaju.



Rys.6. Zbrojenie sekcji ściany szczelinowej, przez którą tarcza tunelowa dostanie się do szybu odbiorczego [14];

a) widok ogólny na zbrojenie ściany szczelinowej,
b) szczegół zbrojenia

Fig.6. Reinforcement of the hollow wall through which the tunnel shield will reach the receiving shaft [14];
a) general view of reinforcement of the hollow wall,
b) detail of reinforcement

Pręty z FRP posłużyły do wykonania pewnej części ściany, przez którą „przewierciła” się tarcza tunelowa. Gdyby wykorzystano zbrojenie stalowe nie byłoby to możliwe. Ten sposób połączenia tunelu budowanego przez tarczę i ścian szczelinowych stacji nazywa się „*soft-eye*” i nie wymaga drogich zabiegów zabezpieczających szyb odbiorczy przed zalaniem przez wodę, ponieważ tarcza tunelowa sama toruje sobie drogę do szybu, a styk obudowy tunelu ze ścianą szczelinową wykonywany jest z wnętrza tarczy [16]. Zbrojenie z kompozytów polimerowych stosuje się do wykonywania przepustów, konstrukcji portowych i nabrzeżnych, wzmacniania konstrukcji murowych i nowością jest wykorzystanie ich do napraw konstrukcji z drewna [17].

4. ZAGADNIENIA BADAWCZE

Konstrukcje z betonu zbrojone prętami z FRP są w obecnej chwili nowością na polskim rynku budowlanym. Nie ma jeszcze żadnych obiektów, czy ich fragmentów wykonanych z zastosowaniem tych prętów. W krajach wysoko uprzemysłowionych stosuje się je w praktyce już od ponad ćwierć wieku, choć oczywiście w ograniczonej jeszcze skali. Wynikiem tego są przepisy i wytyczne, które mają służyć do projektowania i budowy konstrukcji z prętami z FRP. Mimo to jest wiele jeszcze zagadnień wymagających podjęcia lub kontynuacji badań, ponieważ nie zostały jeszcze dostatecznie dokładnie poznane. Dotyczy to przede wszystkim określenia stopnia zmienności cech mechanicznych i fizycznych samych prętów pod wpływem wysokich i niskich temperatur oraz oddziaływań chemicznych, co jest szczególnie ważne z uwagi na trwałość konstrukcji. Oddzielną, ale bardzo istotną ze względów praktycznych, tematykę badań stanowi współpraca prętów z betonem (zjawiska na styku kompozytu z różnego rodzaju betonami, także betonami nowych generacji, określanie wymaganych długości zakotwień). Ponadto badania obejmują: zagadnienia zmniejszenia wytrzymałości w przypadku przenoszenia przez pręty obciążeń długotrwałych, zwiększenie odporności na siły poprzeczne, kontrolowanie formy zniszczenia, zmniejszenie kruchości prętów, testowanie prętów w różnych typach konstrukcji i pod różnymi rodzajami obciążeń (także zmęczeniowych), kalibracja modeli obliczeniowych i opracowanie standardów, które powinny spełniać pręty pod względem jakości zastosowanych do ich produkcji materiałów [2].

Zagadnienie przyczepności prętów FRP do różnego rodzaju betonów, w tym także betonów niekonwencjonalnych, jest przedmiotem badań podjętych przez autora. Pierwsze analizy wskazują na występowanie różnic w porównaniu z przyczepnością prętów stalowych. Ponieważ tematyka ta jest nowa, zwłaszcza na gruncie polskim i może przez to wzbudzać wiele dyskusji, wyniki poszczególnych etapów badań będą przedmiotem kolejnych publikacji.

5. PODSUMOWANIE

Stosowanie zbrojenia z prętów FRP jest odzwierciedleniem nowych tendencji we współczesnym mostownictwie, obejmujących wprowadzanie nowych materiałów oraz dążenie do zwiększenia trwałości konstrukcji, co stanowi główny argument techniczny i ekonomiczny użycia niemetalicznego zbrojenia betonu. Zbrojenie z FRP znajdzie zastosowanie wszędzie tam, gdzie stal wyczerpała swoje możliwości ze względów wytrzymałościowych czy użyteczności. Właściwości prętów z FRP stwarzają nowe możliwości w rozwiązywaniu problemów konstrukcyjnych np. ścian szczelinowych.

Dalszy rozwój konstrukcji z zastosowaniem prętów z FRP zależy od ulepszania cech samych prętów kompozytowych. Chociaż jednostkowe ceny prętów z kompozytów polimerowych z włóknami są jeszcze wyraźnie wyższe od jednostkowych cen prętów stalowych, to zwiększenie trwałości konstrukcji i znaczna w związku z tym redukcja kosztów związanych z ich naprawami, remontami i wzmocnieniami wynikającym z korozji zbrojenia ze stali, stanowią ekonomiczne uzasadnienie stosowania prętów FRP.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zobel H., Karwowski W., Sarnowska J., Wróbel M.: Nowa generacja mostów – cz. I. Mosty z kompozytów polimerowych. *Autostrady*, 4/2004, 16 – 19
- [2] Brandt A.M.: O zastosowaniu uzbrojenia i sprężenia konstrukcji prętami, cięgnami i taśmami z materiałów kompozytowych. *Materiały Pokonferencyjne z XLII Konferencji Naukowej KILiW PAN i PZITB „Krynica 1996”*, Kraków – Krynica 1996, 9, 169 – 191
- [3] Zobel H., Karwowski W.: Kompozyty polimerowe w mostownictwie – pomosty wielowarstwowe. *Międzynarodowa Konferencja „Mosty”*, Kielce 2005, 61 – 74
- [4] First CFRP Bridge in the USA, Michigan Researchers and Consultants Using Tomorrow’s Technology Today. Michigan Department of Transportation, Construction & Technology, 2/2005
- [5] Guide for design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2000
- [6] Taewre L., Mattys S.: FRP for Concrete Construction – Activities in Europe. *Concrete International*, 10, 1999
- [7] Mossakowski P.: Zbrojenie niekonwencjonalne – pierwsze zastosowania i perspektywy rozwojowe. *Międzynarodowa Konferencja „Mosty”*, Kielce 2005, 25 – 32
- [8] Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar Aslan 100 by Hughes Brothers. Hughes Brothers Inc, December 2002
- [9] Reinforcement element for concrete made from glass fiber-reinforced polymer. Technical information Schöck Combar. Schöck Bauteile GMBH, 2004

- [10] www.polymercomposites.co.uk
- [11] Zobel H., Karwowski W., Mossakowski P., Wróbel M.: Kładka komunikacyjna z kompozytów polimerowych w oczyszczalni ścieków. Badania i doświadczenia eksploatacyjne. Gospodarka Wodna 7/2005, 285 – 291
- [12] El-Salakawy E., Benmokrane B.: Serviceability of Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Composite Bars. ACI Structural Journal, 9-10, 2004, 727 – 736
- [13] Benmokrane B., El-Salakawy E., El-Ragaby A.: Design, construction and monitoring of four innovative concrete bridge decks using non-corrosive FRP composite bars. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, 2004
- [14] Benmokrane B., El-Salakawy E.: Design, Construction and Testing of Innovative Concrete Bridge Decks Using FRP Reinforcing Bars. International Workshop on Innovative Deck Technologies, Winnipeg, Canada, 2005, www.isiscanada.com
- [15] Dolan C.W.: FRP Prestressing in the U.S.A., Concrete International, 10, 1999
- [16] Weber A.: Newly Developed GFRP – Rebar as Internal Reinforcement. Cobrae Conference 2005 – Bridge Engineering with Polymer Composites, EMPA, Switzerland 2005
- [17] www.hughesbros.com

REINFORCING BARS OF POLYMER COMPOSITES USED IN CONCRETE ENGINEERING STRUCTURES

Abstract

One of the main trends in modern bridge engineering is an introduction of new and unconventional construction materials. Engineers and scientists aim at enhancing durability of structures and at the same time they are trying to reduce the cost of the construction process and its maintenance. Reinforcing bars made of polymer composites reinforced by fibers reflect the already mentioned trend. The article presents some basic information concerning the properties of FRP reinforcing bars, their application as well as design and execution of concrete structures. A brief description of research problems connected with the application of FRP bars in constructions is included.