

Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych

Dr hab. inż. Maciej Szumigała, prof. nadzw. PP, mgr inż. Dawid Pawłowski,
Instytut Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

Zbrojenie kompozytowe FRP (fiber-reinforced polymer) jest wykorzystywane w konstrukcjach budowlanych od ponad dwudziestu lat [W1]. Wysoka odporność na korozję, duża wytrzymałość na rozciąganie, obojętność elektromagnetyczna oraz łatwość cięcia, to główne czynniki decydujące o wyborze prętów kompozytowych jako zbrojenia konstrukcji. Liczne projekty, w których zastosowano takie zbrojenie oraz pozytywne wyniki wielu badań [1, 2] świadczą o tym, iż może być ono dobrą alternatywą dla klasycznej stali zbrojeniowej.

2. Rodzaje zbrojenia kompozytowego

Zbrojenie kompozytowe składa się z ciągłych włókien osadzonych w żywicy polimerowej. Główną rolą włókien jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości oraz sztywności kompozytu, natomiast żywica odpowiada za połączenie włókien z zachowaniem odpowiedniej odległości pomiędzy nimi, zabezpieczenie ich powierzchni przed uszkodzeniem oraz przekazywanie na nie naprężeń. W zależności od typu włókien, wyróżnia się cztery rodzaje zbrojenia FRP:

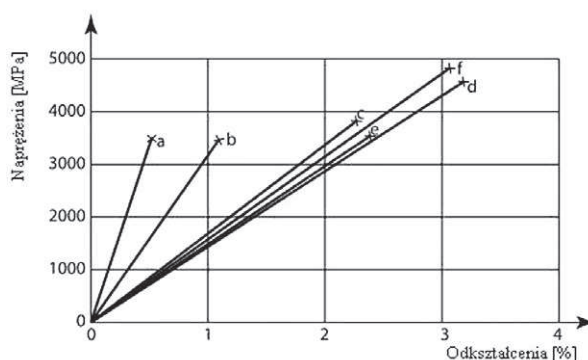
- z włókien węglowych CFRP (carbon fiber-reinforced polymer) – włókna węglowe i grafitowe,
- z włókien aramidowych AFRP (aramid fiber-reinforced polymer) – włókna Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 149, Technora H, SVM,
- z włókien szklanych GFRP (glass fiber-reinforced polymer) – włókna E-glass, S-glass oraz włókna odporne na alkalia – AR-glass,
- z włókien bazaltowych BFRP (basalt fiber-reinforced polymer) – rys. 1,

W celu uzyskania kompozytu, włókna te są „zatapiane” w żywicy termoutwardzalnej (poliestrowej, epoksydowej, winyloestrowej) bądź termoplastycznej (PEEK, PPS, PSUL).

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę naprężenie-odkształcenie dla różnego rodzaju rozciąganych włókien [3]. Zgodnie z nią, cechują się one liniowo-sprężystym zachowaniem w całym zakresie wytrzymałości, która waha się w granicach od 3000 do 5000 MPa. Zbrojenie kompozytowe może występować w posta-



Rys. 1. Zbrojenie kompozytowe BFRP [źródło: EEC Sp. z o.o.]



Rys. 2. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla rozciąganych włókien [3]: a) grafitowych, b) węglowych, c) aramidowych (Kevlar 49), d) S-glass, e) E-glass, f) bazaltowych

ci prętów, siatek, mat oraz lin. Pręty zbrojeniowe mogą mieć przekrój okrągły bądź kwadratowy i mogą być pełne lub drażnione w środku. W celu zapewnienia współpracy zbrojenia z betonem jego powierzchnia jest odpowiednio przygotowana poprzez pokrycie jej posypką piaskową, wykonanie w niej żeber, nawinięcie na nią dodatkowych włókien imitujących żebra bądź łączenie tych metod.

3. Właściwości zbrojenia kompozytowego

Zbrojenie kompozytowe charakteryzuje się zachowaniem anizotropowym. Właściwości fizyczne i mechaniczne prętów FRP są ściśle związane z rodzajem i kierunkiem ułożenia włókien, rodzajem matrycy, ich udziałem objętościowym w kompozycie, średnicą oraz procesem produkcji. Amerykańska Norma ACI 440.1R-06 [N1] podaje zakres wartości różnych parametrów mechanicznych i fizycznych zbrojenia FRP, jednak podczas projek-

Tabela 1. Właściwości fizyczne zbrojenia kompozytowego [N1,W2]

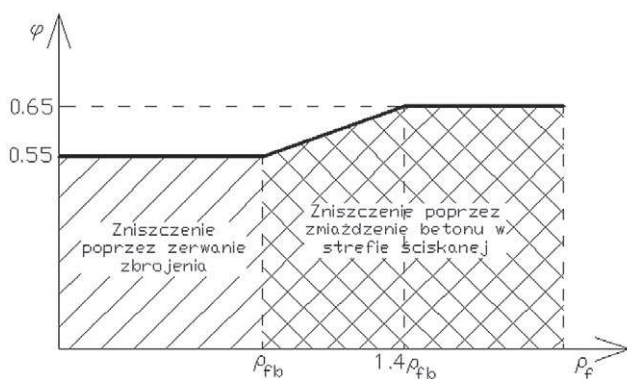
Właściwości	Rodzaj zbrojenia				
	Stal	CFRP	AFRP	GFRP	BFRP*
Współczynnik Temp. Rozszerz. Podłużnej α_T [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	11,7	(-9,0)-0,0	(-6,0)-(-2,0)	6,0-10,0	b.d.
Współczynnik Temp. Rozszerz. Poprzecznej α_T [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	11,7	74,0-104,0	60,0-80,0	21,0-23,0	b.d.
Gęstość [g/cm^3]	7,86	1,50-1,60	1,25-1,40	1,25-2,10	1,90

*na podstawie informacji producenta [W2]

Tabela 2. Właściwości mechaniczne zbrojenia kompozytowego [N1,W2]

Właściwości	Rodzaj zbrojenia				
	Stal	CFRP	AFRP	GFRP	BFRP*
Granica plastyczności [Mpa]	276-517	-	-	-	-
Wytrzymałość na rozciąganie [Mpa]	483-690	600-3690	1720-2540	483-1600	1100
Moduł Younga** [Gpa]	200	120-580	41-125	35-51	70
Odkształcenie plastyczne [%]	0,14-0,125	-	-	-	-
Odkształcenia przy zerwaniu [%]	6,0-12,0	0,5-1,7	1,9-4,4	1,2-3,1	2,2

*na podstawie informacji producenta [W2]
**w przypadku zbrojenia FRP – moduł Younga dla rozciągania



Rys. 3. Współczynnik redukcji nośności przekroju zginanego w funkcji stopnia zbrojenia ρ_f [N1], ρ_{fb} – graniczny stopień zbrojenia

towania należy korzystać z informacji udostępnionych przez producentów poszczególnych wyrobów.

• Właściwości fizyczne

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe właściwości fizyczne zbrojenia kompozytowego zawarte w normie ACI 440.1R-06 [N1] oraz w karcie technicznej producenta [W2]. Zgodnie z nią, zbrojenie FRP charakteryzuje się ponad czterokrotnie mniejszą gęstością od stali, co w znaczący sposób ułatwia prace zbrojarskie i obniża koszty transportu zbrojenia. Biorąc pod uwagę

rozszerzalność termiczną, stal jest materiałem izotropowym, natomiast zachowanie prętów FRP jest uzależnione od kierunku ułożenia włókien. To rodzaj włókien decyduje o rozszerzalności podłużnej zbrojenia, a rodzaj żywicy o rozszerzalności poprzecznej.

• Właściwości mechaniczne

W tabeli 2 przedstawiono wybrane właściwości mechaniczne zbrojenia FRP w kierunku równoległym do włókien. Pręty kompozytowe cechują się liniowo-sprężystą charakterystyką wytrzymałościową podczas rozciągania (do zerwania), a zatem nie wykazują odkształceń plastycznych. Ich zniszczenie ma charakter gwałtowny i nie jest wcześniej sygnalizowane. W celu zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji, norma ACI 440.1R-06 [N1] zaleca stosowanie współczynnika ϕ redukującego nośność przekroju zginanego, zgodnie z rysunkiem 3. W porównaniu z klasyczną stalą zbrojeniową, pręty kompozytowe charakteryzują się znacznie wyższą wytrzymałością na rozciąganie (od 600 do 3700 MPa) i stosunkowo niskim modułem Younga (od 35 do 125 GPa, wyjątek stanowi CFRP). Wytrzymałość na ściskanie natomiast stanowi od 20 do 70% wytrzymałości na rozciąganie, dlatego nie zaleca się uwzględniać w obliczeniach wkładek kompozytowych umieszczonych w strefie ściskanej przekroju.

4. Długotrwałe właściwości zbrojenia FRP

Właściwości zbrojenia kompozytowego poddanego długotrwałemu obciążeniu i oddziaływaniu agresywnego środowiska różnią się w sposób znaczący od jego właściwości krótkotrwałych. Wiąże się to ze zjawiskiem pełzania, relaksacji oraz zmęczenia materiału.

• Pełzanie

Pełzanie jest zjawiskiem polegającym na wzroście odkształceń materiału wraz z uływem czasu, poddanego stałemu obciążeniu. Pręty FRP, w przeciwieństwie do zbrojenia stalowego, wykazują znaczną podatność na proces pełzania. Intensywność tego zjawiska wzrasta wraz ze wzrostem poziomu długotrwałego obciążenia oraz z występowaniem niekorzystnych warunków środowiska: wysokiej temperatury, promieniowania UV, środowiska zasadowego, naprzemiennego zamrażania i rozmrażania oraz zawilgacania i osuszania. Wyniki licznych badań pozwalają stwierdzić, iż zbrojenie węglowe wykazuje najmniejszą, aramidowe średnią, a szklane największą podatność na pełzanie. Dla przykładu, zgodnie z rezultatami badań [4], naprężenia w prętach CFRP, AFRP i GFRP poddanych długotrwałemu obciążeniu (wyniki badań ekstrapolowane dla okresu czasu 500 000 h), w chwili zniszczenia stanowiły odpowiednio 93, 47 i 23% ich krótkotrwałej wytrzymałości na rozciąganie.

• Relaksacja

Relaksacja to proces polegający na spadku naprężeń w materiale wraz z upływem czasu, poddanym stałemu odkształceniu w stałej temperaturze. Na podstawie ba-

Tablica 3. Współczynniki redukcji wytrzymałości na rozciąganie prętów FRP ze względu na wpływ warunków środowiska oraz obciążeń długotrwałych [N1,N2,N3]

Współczynnik	Norma		
	ACI 440.1R-06	JSCE	CAN/CSA-S806-02
Wpływ środowiska (SGU)	C_E „środowiskowy wsp. redukcyjny” GFRP: 0,70–0,80 AFRP: 0,80–0,90 CFRP: 0,90–1,00	$1/\gamma_{fm}$ „współczynnik materiałowy” GFRP: 0,77 AFRP: 0,87 CFRP: 0,87	Φ_{FRP} „współczynnik wytrzymałości” GFRP: 0,50 AFRP: 0,60 CFRP: 0,75
Wpływ obciążenia długotrwałego (SGU)	–	–	–
Całkowita redukcja nośności – wpływ środowiska (SGN)	Zawiera: Φ (0,55–0,65) GFRP: 0,39–0,52 AFRP: 0,44–0,59 CFRP: 0,50–0,65	GFRP: 0,77 AFRP: 0,87 CFRP: 0,87	F_{SLS} : największe naprężenia od obc. użytkowych GFRP: 0,25 AFRP: 0,35 CFRP: 0,65
Ograniczenie naprężeń od obciążeń stałych (SGN)	GFRP: 0,14–0,16 AFRP: 0,24–0,27 CFRP: 0,44–0,50	0,8x „wytrzymałość na rozciąganie podczas pełzania”, nie więcej niż: GFRP $\leq 0,70$ AFRP $\leq 0,70$ CFRP $\leq 0,70$	GFRP: 0,25–0,30 AFRP: 0,35–0,40 CFRP: 0,65–0,70

dań [5] szacuje się, że redukcja obciążenia w prętach CFRP, AFRP oraz GFRP po 50 latach obciążenia wynosi odpowiednio 2–10%, 4–14% i 11–25%, i zależy od początkowego poziomu obciążenia.

• Zmęczenie

Zmęczenie materiału polega na degradacji jego jednorodności, w wyniku poddania go dużej liczbie cykli obciążenia. Wytrzymałość zmęczeniowa prętów kompozytowych zależy od warunków środowiska, w jakich znajduje się konstrukcja (kwasowość i zasadowość środowiska, wilgotność, temperatura), częstotliwości przykładania obciążenia oraz stopnia wyężdżenia materiału. Zniszczenie zmęczeniowe zbrojenia FRP jest spowodowane złożonymi mechanizmami, na które składają się: zarysowanie matrycy, pęknięcie włókien, propagacja rys oraz rozwarstwienie kompozytu. Zgodnie z wynikami wielu badań, pręty CFRP wykazują największą, AFRP średnią, a pręty z włókna szklanego najmniejszą odporność na zmęczenie.

W celu zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji przez cały projektowy okres użytkowania, normy podejmujące tematykę zbrojenia FRP zalecają stosowanie odpowiednich współczynników bezpieczeństwa. W tabeli 3 przedstawiono wartości takich współczynników na podstawie Normy Amerykańskiej ACI 440.1R-06 [N1], Japońskiej JSCE [N2] oraz Kanadyjskiej CAN/CSA-S806-02 [N3]. Wahają się one w granicach od 0,14 do 1,00 i są najmniejsze dla zbrojenia z włókna szklanego (największa redukcja nośności), pośrednie dla AFRP i największe dla CFRP (najmniejsza redukcja nośności).

5. Zachowanie zbrojenia FRP w podwyższonej temperaturze

Podwyższona temperatura negatywnie wpływa na właściwości zbrojenia kompozytowego, dlatego nie zaleca się go stosować w konstrukcjach, od których wymagana jest wysoka odporność ogniowa. Po osiągnięciu przez zbrojenie temperatury zeszklenia T_g , następuje znacz-

na redukcja modułu sprężystości żywicy polimerowej, co skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości kompozytu oraz pogorszeniem jego przyczepności do betonu. Zgodnie z normą [N1], wartość T_g waha się w granicach od 65 do 120°C i zależy od rodzaju żywicy.

Oslabienie zakotwienia zbrojenia w betonie jest jedną z głównych przyczyn zniszczenia elementów konstrukcji poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury. Drugą jest osiągnięcie przez zbrojenie temperatury progowej, powyżej której całkowicie traci ono swoją nośność. Temperatura ta wynosi 880, 180 i 1600°C, odpowiednio dla włókien szklanych, aramidowych i węglowych [N1].

6. Zastosowanie zbrojenia FRP

Zbrojenie kompozytowe charakteryzuje się wieloma właściwościami odróżniającymi je od stali zbrojeniowej. Z jednej strony są to zalety, do których można zaliczyć:

- wysoką wytrzymałość na rozciąganie,
- odporność na zjawisko korozji,
- obojętność elektromagnetyczną,
- niskie przewodnictwo cieplne i elektryczne (GFRP oraz AFRP),
- wysoką wytrzymałość zmęczeniową (w zależności od rodzaju włókien),
- małą gęstość,
- łatwość cięcia.

Z drugiej strony, zbrojenie FRP posiada również następujące wady:

- brak rezerwy plastycznej,
- niską wytrzymałość na ścinanie,
- niski moduł sprężystości (w zależności od rodzaju włókien),
- małą odporność na działanie promieniowania UV,
- niską trwałość włókien szklanych w środowisku wilgotnym,
- niską trwałość włókien szklanych i aramidowych w środowisku zasadowym,



Rys. 4. Zbrojenie posadzki prętami GFRP [źródło: Schöck Sp. z o.o.]

- wysoki współczynnik rozszerzalności cieplnej w kierunku poprzecznym do włókien,
 - może mieć niską odporność ogniową (w zależności od rodzaju żywicy i grubości otuliny betonowej),
 - wysoką cenę (od 2 do 10 razy droższe od stali zbrojeniowej, w zależności od rodzaju włókien),
- W związku z powyższym, zbrojenia FRP nie należy stosować w dowolnych konstrukcjach jako równorzędno zamiennika stali zbrojeniowej. Głównymi czynnikami decydującymi o wyborze prętów kompozytowych

Tabela 4. Zastosowanie zbrojenia kompozytowego

Zastosowanie zbrojenia FRP	Cechy zbrojenia FRP
zbrojenie posadzek przemysłowych, płyt na gruncie, rys. 4	wysoka odporność na korozję, obojętność elektromagnetyczna
konstrukcje parkingów wielopoziomowych	wysoka odporność na korozję, wysoka wytrzymałość na rozciąganie
konstrukcje inżynierskie (mosty, wiadukty, ekrany akustyczne, bariery energochłonne)	wysoka odporność na korozję, wysoka wytrzymałość zmęczeniowa, wysoka wytrzymałość na rozciąganie
konstrukcje narażone na silną agresję środowiska (zbiorniki, silosy, oczyszczalnie ścieków)	wysoka odporność na korozję
konstrukcje nadmorskie	wysoka odporność na korozję, wysoka wytrzymałość zmęczeniowa
konstrukcje szpitali, przychodni, laboratoriów, magazynów materiałów wybuchowych	obojętność elektromagnetyczna, elektryczna i elektrostatyczna
elementy infrastruktury kolei magnetycznej	obojętność elektromagnetyczna, wysoka odporność na korozję
fundamenty specjalne (pale, ściany szczelinowe)	odporność na korozję, wysoka wytrzymałość na rozciąganie
wzmacnianie i renowacja istniejących konstrukcji	wysoka wytrzymałość na rozciąganie
elementy prefabrykowane o małej grubości (np. prefabrykowane ściany żelbetowe)	wysoka odporność na korozję (wymagana mała otulina zbrojenia)
konstrukcje tymczasowe (elementy tuneli, budowli podziemnych)	łatwość cięcia

powinny być: przeznaczenie projektowanej konstrukcji oraz warunki środowiska, w jakich będzie ona pracować. W tabeli 4 podano najważniejsze zastosowania zbrojenia FRP.

Ze względu na brak dokładnych badań oraz graniczną ilość realizacji, nie zaleca się stosowania zbrojenia FRP w konstrukcjach ram o sztywnych węzłach, w elementach, w których wymagana jest redystrybucja momentów zginających oraz jako wzmocnienie strefy ściskanej przekroju betonowego.

7. Podsumowanie

Obecnie dostępne są na rynku cztery rodzaje zbrojenia kompozytowego: z włókien węglowych (CFRP), aramidowych (AFRP), szklanych (GFRP) oraz bazaltowych (BFRP). Główne cechy odróżniające je od stali zbrojeniowej to: liniowo-sprężyste zachowanie w całym zakresie nośności, wysoka wytrzymałość na rozciąganie, niski moduł sprężystości, wysoka odporność na korozję, obojętność elektromagnetyczna, elektryczna i elektrostatyczna (w zależności od rodzaju włókien), łatwość cięcia (niska wytrzymałość na ścinanie) oraz niska gęstość.

Takie właściwości zbrojenia FRP mają wpływ na projektowanie elementów zbrojonych prętami kompozytowymi (wysokie współczynniki bezpieczeństwa, zniszczenie betonu jako kryterium nośności przekroju zginanego) oraz decydują o jego zastosowaniu (konstrukcje narażone na działanie agresywnych warunków środowiska, konstrukcje tymczasowe, elementy, od których wymagana jest obojętność elektromagnetyczna, elektryczna).

BIBLIOGRAFIA:

Czasopisma:

- [1] Ashour A. F., Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars, *Composite Structures*, 71/2005, p. 130–138
 [2] Urbański M., Łapko A., Garbacz A., Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures, *Procedia Engineering*, 57/2013, p. 1183–1191
 [3] FIB Bulletin 40, FRP reinforcement in RC structures, September 2007
 [4] Yamaguchi T., Kato Y., Nishimura T., Uomoto T., Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers, *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for concrete structures (FRPFCS-3)*, Japan Concrete Institut, Tokyo 1997, Vol. 2, p. 179–186
 [5] Balázs G. L., Borosnyoi A., Long-term behaviour of FRP, *Proceedings of the International Workshop Composites in Construction: A reality*, American Society of Civil Engineers, Reston 2001, p. 84–91

Normy:

- [N1] ACI 440.1R-06 (2006), Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, ACI Committee 440, American Concrete Institute
 [N2] JSCE (1997), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials, Japan Society of Civil Engineering
 [N3] CAN/CSA-S806-02 (2002), Design and construction of building components with fibre reinforced polymers, Canadian Standards Association

Internet:

- [W1] The American Composites Manufacturers Association (ACMA), <http://www.acmanet.org/the-industry/history>, Wrzesień 2013
 [W2] EEC Sp. z o.o., www.comfibertec.eu/pdf/declaration_BFRP.pdf, Wrzesień 2013