

ZBROJENIE KONSTRUKCJI BETONOWYCH NIEMETALICZNYMI PRĘTAMI KOMPOZYTOWYMI FRP

Robert GRYGO, Marta KOSIOR–KAZBERUK*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule przedstawiono rodzaje, właściwości i metody określania cech mechanicznych zbrojeniowych prętów kompozytowych FRP. Na podstawie analizy wyników badania właściwości wytrzymałościowych prętów z włóknem szklanym GFRP i prętów z włóknem bazaltowym BFRP zaprezentowano metody określania gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie i gwarantowanego modułu sprężystości zbrojenia niemetalicznego według standardów ACI 440.1R oraz CSA-S807. Jako przykład procedury projektowania elementu betonowego zbrojonego prętami FRP omówiono metodę obliczania nośności na zginanie według ACI 440.1R. Do obliczeń wykorzystano wyniki badań właściwości mechanicznych prętów GFRP i BFRP.

Słowa kluczowe: pręty zbrojeniowe typu FRP, konstrukcje zbrojone, właściwości mechaniczne, badania doświadczalne, metody obliczeniowe.

1. Wprowadzenie

Stosowanie zbrojenia kompozytowego FRP (*fiber-reinforced polymer*) w budownictwie, szczególnie przy wznoszeniu budynków i obiektów mostowych, staje się co raz bardziej powszechne (Artemenko, 2003; Bank, 2006). Biorąc pod uwagę wymagania odpowiedzialnego projektowania obiektów inżynierskich ze szczególnym naciskiem na trwałość konstrukcji, wykorzystanie zbrojenia niemetalicznego w konstrukcyjnych elementach betonowych zbrojonych pozwala na redukcję kosztów związanych z utrzymaniem budowli, a także kosztów związanych z utrzymaniem obiektów i ewentualnymi remontami. Większość rodzajów prętów niemetalicznych charakteryzuje się wysoką odpornością na korozję, co pozwala wydłużyć cykl życia obiektu zbrojonego (Ceroni i in., 2006; Park i in., 2008; Robert i in., 2009; Zhou i in., 2011). Zastosowanie prętów FRP pozwala zredukować grubość otuliny wokół zbrojenia, co umożliwia również zmniejszenie wymiarów i ciężaru własnego elementu konstrukcyjnego. Większa wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych, w porównaniu do typowych stalowych, umożliwia zmniejszenie średnicy prętów, a mniejszy ciężar objętościowy materiału również wpływa na zmniejszenie całkowitego ciężaru konstrukcji (Baena i in., 2009; Elgabbas i in., 2015). W procesie montażu zbrojenia w warunkach budowy, lub w zakładzie prefabrykacji konstrukcji zbrojonych ważną rolę ogrywa również łatwość transportu szkieletu zbrojeniowego. W przypadku zbrojenia FRP transport może odbywać się za pomocą

lekkich podnośników z pominięciem dźwigów i suwnic. Istotną zaletą jest również możliwość implementacji wybranych rodzajów zbrojenia kompozytowego w konstrukcjach fundamentowych, narażonych na wpływ pól elektromagnetycznych. Pręty kompozytowe FRP wykorzystywane są często do realizacji betonowych elementów konstrukcyjnych narażonych na silną agresję środowiska, takich jak fundamenty falochrony i inne konstrukcje nadmorskie oraz zbiorniki w oczyszczalniach ścieków (Barris i in., 2012; Chen i in., 2007; Fiore i in., 2011, Robert i in., 2009).

Obecnie w budownictwie stosuje się trzy typy prętów kompozytowych jako zbrojenie elementów konstrukcyjnych: pręty z włóknami węglowymi (CFRP), szklanymi (GFRP) i aramidowymi (AFRP). Przydatność tych prętów jako zbrojenia elementów konstrukcyjnych z betonu została potwierdzona licznymi badaniami (Bank, 2006; Park i in., 2008; Robert i in., 2009; Sayed Ahmad i in., 2011). Wytyczne do projektowania elementów zbrojonych tymi prętami zawarto, między innymi, w normach ACI 440.1R (2006) oraz CSA-S806 (2007). Od kilku lat produkowane są również pręty z włóknem bazaltowym. Jednakże, nie zostały one jeszcze ujęte w normach projektowania elementów konstrukcyjnych ze zbrojeniem niemetalicznym.

Pomimo szerokiej gamy oferowanych rodzajów prętów niemetalicznych oraz przeprowadzonych licznych badań elementów zbrojonych tymi prętami, nadal ten rodzaj zbrojenia traktowany jest na rynku budowlanym jako niekonwencjonalny materiał konstrukcyjny. Jedną z przyczyn jest brak krajowych norm oraz jasnych

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.kosior@pb.edu.pl

wytycznych projektowania konstrukcji zbrojonych prętami FRP. W odróżnieniu od tradycyjnego zbrojenia metalicznego, nie opracowano dotychczas norm dotyczących określania parametrów mechanicznych prętów zbrojeniowych typu FRP, co sprawia, że przy każdym wykorzystaniu tego rodzaju zbrojenia należy przeprowadzić odrębne badania właściwości mechanicznych. Jednakże, pręty niemetaliczne dzięki korzystnym właściwościom użytkowym, stanowią alternatywę dla zbrojenia konwencjonalnego. Należy zatem podejmować prace badawcze służące ich wdrożeniu i upowszechnieniu.

Celem badań eksperymentalnych, opisanych w pracy, było określenie właściwości mechanicznych prętów kompozytowych wykonanych przy zastosowaniu włókien szklanych (GFRP) oraz włókien bazaltowych (BFRP), a także zaprezentowanie sposobów ustalania wartości parametrów mechanicznych, stosowanych w projektowaniu konstrukcji inżynierskich, według dostępnych standardów. Normowe podejście do projektowania konstrukcji zbrojonych prętami FRP omówiono na przykładzie obliczania nośności na zginanie.

2. Rodzaje zbrojenia kompozytowego FRP oraz właściwości mechaniczne

Kompozytowe pręty FRP wykonywane są zwykle metodą pultruzji (ACI 440.1R, 2006). Metoda ta polega na przeciąganiu włókien przez odpowiednie sita, a następnie nasączeniu włókien w postaci splotów o zróżnicowanej średnicy, żywicą polimerową termoutwardzalną w warunkach wysokich temperatur i ciśnienia. W odróżnieniu do tradycyjnego zbrojenia metalicznego proces produkcji wymaga nieporównywalnie mniejszych nakładów energii i kosztów (Bank, 2006). Główną rolą włókien jest zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, natomiast żywica odpowiada za połączenie włókien z zachowaniem odpowiedniej odległości pomiędzy nimi, zabezpieczenie ich powierzchni przed uszkodzeniem oraz przekazywanie na nie naprężeń rozciągających (Artemenko, 2003).

W zależności od surowca wykorzystanego do produkcji wyróżnia się cztery podstawowe grupy zbrojenia FRP:

- pręty z włókien szklanych GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*),
- pręty z włókien węglowych CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*),
- pręty z włókien aramidowych AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*),
- pręty z włókien bazaltowych BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*).

Według ACI 440.1R (2006) w celu zapewnienia poprawnej współpracy zbrojenia FRP z betonem stosuje się trzy sposoby wykończenia powierzchni prętów w celu zwiększenia ich przyczepności do matrycy cementowej. Pierwszym sposobem, podobnie jak w przypadku prętów

stalowych, jest wykonanie żeber, drugim – powleczenie posypką piaskową, a trzecim – owinięcie wokół pręta dodatkowej warstwy włókien.

Parametry wytrzymałościowe prętów FRP znacząco różnią się od właściwości tradycyjnych prętów stalowych. Wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych zależy od surowca służącego do ich wykonania i waha się w przedziale od 483 MPa w przypadku prętów z włókien szklanych GFRP do nawet 3690 MPa dla prętów z włókien węglowych. Wytrzymałość na ściskanie stanowi natomiast od 20 do 78% wytrzymałości na rozciąganie. Ogólnie, wytrzymałość na ściskanie jest większa dla prętów o większej wytrzymałości na rozciąganie, z wyjątkiem przypadku, w którym włókna prętów aramidowych AFRP wykazują nieliniowe zachowanie podczas ściskania przy stosunkowo niskim poziomie naprężeń. Jednym z mankamentów kompozytowych prętów niemetalicznych jest niski moduł sprężystości podłużnej. W przypadku prętów GFRP moduł sprężystości waha się w przedziale od 35 do 51 GPa, a prętów AFRP od 41 do 125 GPa. Jedynie w przypadku kompozytowych prętów z włókien węglowych CFRP moduł sprężystości wynosi 580 GPa (Artemenko, 2003; Sim i in., 2005, Selejda i Brózda, 2016).

Pręty z włóknem bazaltowym (BFRP) są materiałem stosunkowo nowym i najmniej rozpoznany. Wytwarzane są z włókien bazaltowych, otrzymywanych w wyniku procesu topienia skały bazaltowej w temperaturze wyższej niż 1450°C. Włókna są nieszkodliwe dla środowiska, wolne od substancji rakotwórczych i innych składników, które mogą być przyczyną zagrożenia zdrowia. Proces wytwarzania włókien bazaltowych jest mniej złożony niż produkcja innych rodzajów włókien, a co za tym idzie, mniej energochłonny (Banibayat i Patnaik, 2014). Według nielicznych danych literaturowych (Branston i in., 2016; Wei i in., 2010, 2011) włókna charakteryzują się stabilnością termiczną, dobrą przyczepnością do matrycy żywicznej lub cementowej i małą nasiąkliwością. Ze względu na skład chemiczny są odporne na korozję, środowiska kwaśne i zasadowe. Ponadto włókna bazaltowe są odporne na niskie i wysokie temperatury, zakres roboczych temperatur ich stosowania waha się od -260°C do +750°C.

Badania prętów wykonanych przy zastosowaniu włókien bazaltowych, opisane między innymi przez Altamasa i in. (2015), Elgabbasa i in. (2015), Urbańskiego i in. (2013), Wanga i in. (2014), wykazały ich przydatność jako zbrojenia elementów betonowych. Pręty z włóknem bazaltowym charakteryzują się większą wytrzymałością niż pręty stalowe i pręty GFRP, nie korodują, są niepalne, ich współczynnik rozszerzalności cieplnej jest zbliżony do betonu i stali. W przeciwieństwie do prętów GFRP nie potrzebują powłoki chroniącej przez wysokim pH cieczy w porach betonu i nie wchłaniają wody. Jednakże, Urbański i in. (2013) zwrócili uwagę na problem zachowania stanu granicznego użytkowania konstrukcji zbrojonej prętami z włóknem bazaltowym. Z uwagi na relatywnie niższy moduł sprężystości prętów BFRP, w porównaniu do prętów stalowych zarówno ugięcie, jak i szerokość

rys mogą okazać się decydującymi parametrami przy projektowaniu belek zbrojonych BFRP.

Pomimo licznych korzystnych właściwości, zakres dotychczas przeprowadzonych badań nie pozwala na opracowanie standardowych wytycznych projektowania konstrukcji zbrojonych prętami BFRP.

3. Badania parametrów mechanicznych prętów FRP

3.1 Metodyka badań

W celu określenia charakterystyki wytrzymałościowej prętów niemetalicznych poddano rozciąganiu partię prętów z włóknem bazaltowym oraz szklanym o pomierzonej średnicy wynoszącej 7,6 mm i długości równej 400 mm. Przed każdym badaniem dokonywano pomiaru średnicy w trzech punktach na długości próbki.

Do wykonania próby rozciągania osiowego wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową umożliwiającą szybką kontrolę odkształceń i regulację obciążenia, zaopatrzoną w specjalne wkładki do uchwytów hydraulicznych. Wyniki pomiarów były rejestrowane automatycznie. Próbki prętowe były obciążane ze stałą prędkością w taki sposób, aby czas badania zawierał się pomiędzy 1 a 10 min, zgodnie z zaleceniami ACI 440.3R (2004). W celu określenia deformacji badanych próbek posłużono się mackowymi ekstensometrami przyczepnymi. Stanowisko pomiarowe pokazano na rysunku 1.

3.2. Analiza wyników pomiarów

Ocena parametrów wytrzymałościowych prętów opiera się na statystycznej interpretacji wyników pomiarów. Ze względu na brak wytycznych dotyczących określania cech prętów BFRP, do wyznaczenia parametrów mechanicznych zarówno prętów z włóknem szklanym, jak i bazaltowym wykorzystano zalecenie zawarte

w standardach ACI 440.1R-06 oraz CSA S807-10 odnoszące się do prętów FRP.

W opracowaniu ACI 440.1R (2006) podano następujące zależności do obliczenia gwarantowanej wartości wytrzymałości na rozciąganie f_{fu}^* i gwarantowanego modułu sprężystości E_f do celów obliczeniowych:

$$f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma \quad (1)$$

$$E_f = E_{f,ave} \quad (2)$$

gdzie: $f_{u,ave}$ jest średnią wartością wytrzymałości na rozciąganie, σ jest odchyleniem standardowym, a $E_{f,ave}$ średnią wartością modułu sprężystości.

Zgodnie z normą kanadyjską CSA S807 (2010) gwarantowaną wartość wytrzymałości na rozciąganie oblicza się według wzoru:

$$f_{fu}^* = F_{t_{csa}} \cdot f_{u,ave} \quad (3)$$

gdzie

$$F_{t_{csa}} = \frac{1 - 1,645V}{1 + \left(\frac{1,645V}{\sqrt{n}} \right)} \quad (4)$$

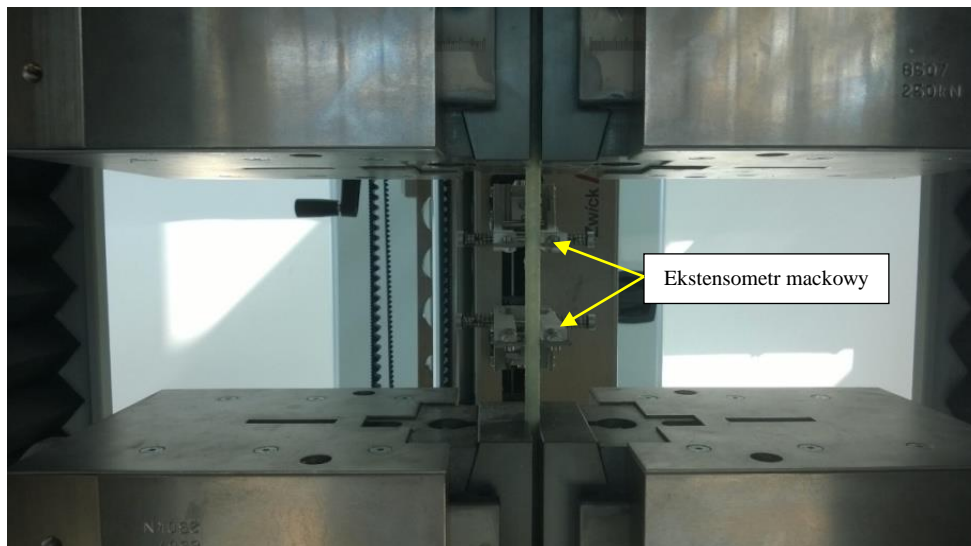
gdzie V jest wskaźnikiem zmienności wyrażonym wzorem $V = \sigma / \mu$, μ jest średnią wartością wyników próby, a n jest liczbą próbek w serii.

Wartość modułu sprężystości ustala się według następujących wzorów:

$$E_f = F_{e_{csa}} \cdot E_{f,ave} \quad \text{jeżeli } V > 5\% \quad (5)$$

gdzie $F_{e_{csa}}$ oblicza się analogicznie jak $F_{t_{csa}}$, biorąc pod uwagę odpowiednią wartość współczynnika zmienności V ,

$$E_f = E_{f,ave} \quad \text{jeżeli } V < 5\% \quad (6)$$



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego podczas badania pręta GFRP

Zapisanie równań (1) i (3) w następujący sposób (Banibayat i Patnaik, 2014):

$$\frac{f_{fu}^*}{f_{u,ave}} = 1 - 3V \quad (7)$$

$$\frac{f_{fu}^*}{f_{u,ave}} = \frac{1 - 1,645V}{1 + \left(\frac{1,645V}{\sqrt{n}}\right)} \quad (8)$$

pozwala na porównanie podejść do wyznaczenia gwarantowanych wartości parametrów wytrzymałościowych proponowanych w obu normach. Uzależnienie wartości wytrzymałości, przede wszystkim od współczynnika V , wynika ze zmienności parametrów wytrzymałościowych materiałów kompozytowych. Według analiz opisanych przez Banibayat i Patnaik (2014), w przypadku obliczeń według normy CSA S807 (2010) wpływ liczby elementów próbnych w serii staje się zaniedbywalny dla $n > 15$.

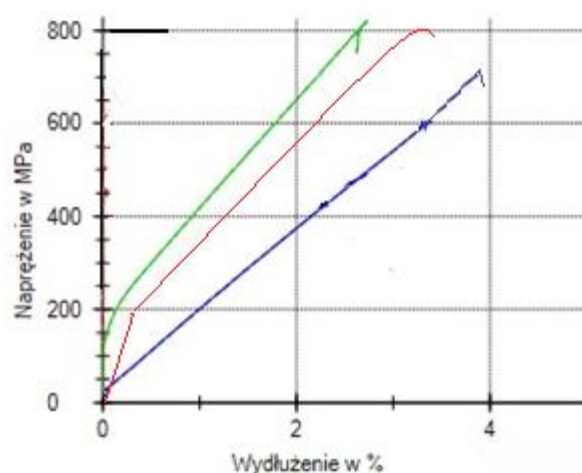
3.3. Wyniki badań parametrów wytrzymałościowych prętów FRP

Tabela 1 zawiera wyniki badań parametrów wytrzymałościowych serii prętów kompozytowych z włóknem szklanym GFRP. Podano również wartości średnie μ , odchylenie standardowe σ i współczynnik zmienności ν wyników pomiarów. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wykresy naprężeń w zależności od wydłużenia prętów kompozytowych GFRP.

Tab. 1. Wyniki badania parametrów wytrzymałościowych prętów z włóknem szklanym

Nr próbki	E	f_u	A_g	A_{gr}
	GPa	MPa	%	%
1	34,97	751	0,2	2,4
2	42,77	821	0,6	3,8
3	36,66	707	0,1	2,1
4	38,22	699	0,5	2,8
5	36,66	733	0,4	2,2
6	37,57	755	0,5	2,6
μ	37,81	744,33	0,43	2,42
σ	2,67	43,85	0,12	0,29
$\nu(COV)$	0,0705	0,0589	0,2794	0,1183

Oznaczenia: E jest modułem sprężystości, f_u jest wytrzymałością na rozciąganie, A_g jest wydłużeniem równomiernym, a A_{gr} jest to łączne wydłużenie odpowiadające największej sile rozciągającej.

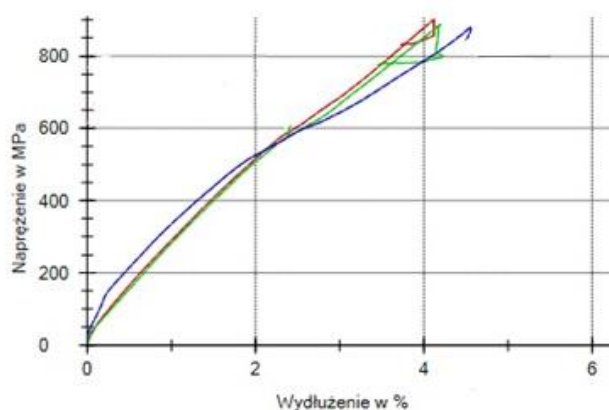


Rys. 2. Przykładowe zależności naprężenie-wydłużenie prętów GFRP

W tabeli 2 zaprezentowano wyniki badań parametrów wytrzymałościowych serii bazaltowych prętów kompozytowych (oznaczenia analogicznie jak w tabeli 1), natomiast na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wykresy naprężeń w funkcji wydłużenia prętów BFRP.

Tab. 2. Wyniki badania parametrów wytrzymałościowych prętów z włóknem bazaltowym

Nr	E	f_u	A_g	A_{gr}
	GPa	MPa	%	%
1	32,76	901	0,7	4,1
2	32,5	888	0,8	4,2
3	34,58	879	1,1	4,6
4	34,97	851	0,9	3,3
5	35,75	892	0,4	4,1
6	39,13	866	0,7	4,2
μ	34,95	879,5	0,77	4,08
σ	2,41	18,36	0,23	0,43
$\nu(COV)$	0,0689	0,0208	0,3049	0,1043



Rys. 3. Przykładowe zależności naprężenie-wydłużenie prętów BFRP

W odróżnieniu od stali materiały kompozytowe charakteryzują się brakiem zakresu plastycznego, ich stan poprzedzający zniszczenie nie jest sygnalizowany, a zniszczenie następuje nagle, po przekroczeniu odkształceń granicznych. Rysunek 4 przedstawia pręt GFRP po wyczerpaniu nośności, natomiast rysunek 5 pręt BFRP.



Rys. 4. Pręt GFRP po próbie rozciągania osiowego



Rys. 5. Pręt BFRP po badaniach wytrzymałościowych

W tabeli 3 zaprezentowano wyniki obliczeń gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie f_{fu}^* oraz modułu sprężystości E_f według standardów ACI 440.1R (2006) oraz CSA S807 (2010). W przypadku gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie podejście zaproponowane w normie ACI 440.1R daje wyniki mniejsze niż obliczenia według CSA S807. Jednocześnie norma ACI 440.1R umożliwia przyjęcie do obliczeń większej wartości modułu sprężystości. Z uwagi na wartość współczynnika zmienności wyników badania

przekraczający 5% zarówno dla prętów GFRP, jak i BFRP moduł sprężystości wyznaczono zgodnie z warunkiem (5) uwzględniając zmniejszający współczynnik $F_{e\,csa}$.

4. Obliczanie nośności na zginanie elementu zbrojonego prętami FRP

4.1. Opis procedury obliczeniowej

Aktualnie nie ma jasnych wytycznych krajowych opisujących procedury wymiarowania ustrojów zbrojonych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP. Selejda i Brózda (2016) podjęli próbę usystematyzowania wytycznych dotyczących projektowania elementów betonowych zbrojonych prętami polimerowymi. Z uwagi na odmiennosć parametrów mechanicznych w porównaniu do tradycyjnego zbrojenia, głównie podejmowane są próby wprowadzania modyfikacji współczynników w aktualnych normach dotyczących projektowania konstrukcji żelbetowych. Zmiany procedur projektowania uwzględniają dużo większą wytrzymałość na rozciąganie prętów FRP w porównaniu do prętów stalowych oraz liniowo-sprężystą charakterystykę pracy prętów kompozytowych w całkowitym zakresie wytrzymałości. Dostępne zalecenia (ACI, CSA) które podejmują problematykę zbrojenia prętami FRP bazują, między innymi, na rozwiązaniach analitycznych lub na popartych badaniami przeprowadzonymi na próbkach prętów FRP (Baena i in., 2009; Cosenza i in., 1997) równaniach empirycznych.

Jako przykład wymiarowania elementu konstrukcyjnego zbrojonego prętami niemetalicznymi analizowano procedurę według ACI 440.1R (2006). Procedura zakłada, że przy wymiarowaniu zbrojenia FRP w elementach zginanych uwzględnia się założenie tak zwanej idealnej przyczepności na styku prętów kompozytowych z betonem. Obowiązuje hipoteza płaskich przekrojów, zależność σ - ε dla rozciąganych prętów FRP jest liniowa, pomija się wytrzymałość betonu na rozciąganie, a wartość odkształceń granicznych w betonie ε_{cu} wynosi 0,003.

Wytyczne amerykańskie ACI 440.1R (2006) nakazują podejście ze szczególną ostrożnością do parametrów wytrzymałościowych podawanych przez producentów prętów FRP. W celu uwzględnienia długotrwałej ekspozycji prętów na warunki środowiskowe przy obliczaniu wytrzymałości na rozciąganie, należy zastosować redukujący współczynnik CE, którego wartości przytoczono w tabeli 4.

Tab. 3. Gwarantowane wartości parametrów mechanicznych prętów kompozytowych

Rodzaj pręta	f_{fu}^*		E_f	
	ACI	CSA	ACI	CSA
GFRP	612,78 MPa	646,55 MPa	37,81 GPa	31,91 GPa
BFRP	824,42 MPa	838,16 MPa	34,95 GPa	29,64 GPa

Tab. 4. Współczynnik redukujący C_E , zależnych od czynników środowiskowych i typu włókien

Warunki ekspozycji	Rodzaj włókien	Współczynnik C_E
Beton nie narażony na bezpośredni kontakt z czynnikami środowiskowymi	Węglowe	1,0
	Szklane	0,8
	Aramidowe	0,9
Beton narażony na bezpośredni kontakt z czynnikami środowiskowymi	węglowe	0,9
	szklane	0,7
	aramidowe	0,8

Obliczeniową wartość wytrzymałości na rozciąganie oblicza się według wzoru (9).

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (9)$$

gdzie C_E jest współczynnikiem redukującym zależnym od czynników środowiskowych i typu włókien, według tabeli 4.

Nośność na zginanie elementów zbrojonych prętami FRP może być zdeterminowana zmiężdżeniem betonu lub zerwaniem prętów zbrojeniowych. Model zniszczenia można określić porównując rzeczywisty stopień zbrojenia prętami FRP ρ_f ze zrównoważonym stopniem zbrojenia ρ_{fb} , przy którym zmiężdżenie betonu i zerwanie pręta następują jednocześnie.

Zrównoważony stopień zbrojenia prętami kompozytowymi FRP należy określać według wzoru (10).

$$\rho_{fb} = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (10)$$

gdzie: β_1 jest współczynnikiem redukującym zależnym od klasy betonu, ε_{cu} jest granicznym odkształceniem betonu, E_f jest modułem sprężystości prętów FRP, określonym na podstawie prób laboratoryjnych, a f'_c jest wytrzymałością betonu na ściskanie.

Jeżeli rzeczywisty stopień zbrojenia $\rho_f > \rho_{fb}$ zniszczenie elementu zbrojonego jest inicjowane przez zmiężdżenie betonu. Przyjmuje się prostokątny rozkład naprężeń w betonie.

Naprężenia rozciągające w zbrojeniu FRP oblicza się według wzoru:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu} \quad (11)$$

Nośność na zginanie elementu belkowego zbrojonego prętami kompozytowymi FRP opisuje wzór (12):

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (12)$$

Ponieważ pręty FRP nie wykazują zakresu plastycznego, wytyczne ACI 440.1R nakazują stosowanie współczynnika redukującego nośność na zginanie ϕ . Wartość współczynnika określa się w zależności od stopnia zbrojenia zgodnie z zależnością (13) i wynosi

0,65 dla przekrojów niszczonych poprzez zmiężdżenie strefy ściskanej betonu oraz 0,55 w przypadku zerwania prętów FRP.

Współczynnik ϕ można określić w następujący sposób:

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{dla } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{dla } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 & \text{dla } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases} \quad (13)$$

4.2. Obliczenie nośności elementu zbrojonego prętami GFRP i BFRP

Opracowanie ACI 440.1R (2006) dotyczy zbrojenia elementów betonowych prętami z włóknem węglowym, szklanym i aramidowym. Ze względu na brak wytycznych dotyczących wymiarowania elementów prętami z włóknem bazaltowym, do celów obliczeniowych wykorzystano procedurę zaproponowaną w ACI 440.1R. Przyjęto element o przekroju poprzecznym 20×35 cm, wykonany z betonu o $f'_c = 28$ MPa. Pole przekroju zbrojenia wynosiło 6 cm². Przyjęto wysokość użyteczną przekroju $d = 31,4$ cm. Właściwości wytrzymałościowe – według tabeli 3 – prętów GFRP: $f_{fu}^* = 612,78$ MPa, $E_f = 37,81$ GPa; właściwości wytrzymałościowe prętów BFRP: $f_{fu}^* = 824,42$ MPa, $E_f = 34,95$ GPa. Założono, że element betonowy nie będzie miał kontaktu ze środowiskiem agresywnym, stąd dla prętów GFRP przyjęto $C_E = 0,8$. Natomiast, dla prętów BFRP przyjęto $C_E = 0,9$, ze względu na ich potwierdzoną badaniami większą odporność na długotrwałe oddziaływanie warunków środowiska w porównaniu do prętów GFRP (Artemenko, 2003; Elgabbas i in., 2015). Ponadto, wartość C_E zróżnicowano, aby wykazać jej wpływ na obliczeniową nośność elementu belkowego na zginanie.

Porównanie wyników obliczeń zamieszczono w tabelicy 5. Zróżnicowana obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie f_{fu} prętów GFRP i BFRP, jak również moduł sprężystości E_f miały istotny wpływ na wartość zrównoważonego stopnia zbrojenia, który był ponad dwukrotnie większy w przypadku belki zbrojonej prętami z włóknem szklanym. Wartości naprężeń w zbrojeniu rozciągającym różniły się nieznacznie. Pomimo znacząco różnych wartości wytrzymałości obliczeniowych prętów

Tab. 5. Obliczenia nośności na zginanie według ACI 440.1R elementu zbrojonego prętami GFRP i BFRP

Obliczana wielkość	Element zbrojony prętami GFRP	Element zbrojony prętami BFRP
Obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie f_{fu} (9)	$f_{fu} = 490$ MPa	$f_{fu} = 742$ MPa
Rzeczywisty ρ_f i zrównoważony stopień zbrojenia FRP ρ_{fb} (10)	$\rho_f = 0,0096$ $\rho_{fb} = 0,0078$	$\rho_f = 0,0096$ $\rho_{fb} = 0,0038$
Naprężenia w zbrojeniu rozciągającym f_f (11)	$f_f = 435,5$ MPa	$f_f = 460,1$ MPa
Nośność na zginanie M_n (12)	$M_n = 81,7$ kNm	$M_n = 79,0$ kNm
Współczynnik redukcyjny ϕ (13)	$\phi = 0,61$	$\phi = 0,65$
Zredukowana nośność na zginanie ϕM_n	$\phi M_n = 51,5$ kNm	$\phi M_n = 51,35$ kNm

GFRP i BFRP zredukowane nośności na zginanie rozważanych belek, obliczone zgodnie z procedurą ACI 440.1R, nie różniły się.

5. Wnioski

Szerokie stosowanie zbrojenia FRP jako alternatywy dla zbrojenia stalowego w konstrukcjach inżynierskich wymaga ujednoliconego podejścia do wyznaczania parametrów mechanicznych, a także opracowania standaryzowanych procedur obliczeniowych. Jak dotąd nie opracowano krajowych wytycznych stosowania prętów niemetalicznych w konstrukcjach z betonu, a wytyczne ACI 440.1R-06 (ze względu na wartości współczynników bezpieczeństwa), należy uznać za zachowawcze. Obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie prętów FRP jest uzależniona od współczynnika C_E zdefiniowanego warunkami środowiska eksploatacji konstrukcji i rodzajem pręta. Ze względu na parametry wytrzymałościowe, elementy zbrojone różnymi rodzajami prętów istotnie różnią się wartością zrównoważonego stopnia zbrojenia ρ_{fb} . O obliczeniowej wartości nośności na zginanie decydują nie tylko wytrzymałość na rozciąganie prętów i moduł sprężystości, ale również zrównoważony stopień zbrojenia. W rozważanym przypadku stosując pręty GFRP oraz BFRP uzyskano zbliżone wartości nośności elementu zginanego. Dalszy rozwój konstrukcji z zastosowaniem prętów FRP zależy również od ulepszenia właściwości zbrojenia kompozytowego.

Literatura

- ACI 440.1R-06 (2006). Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- ACI 440.3R-04 (2004). A. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. ACI Committee 440. *American Concrete Institute*, USA.
- Altalmas A., El Refai A., Abed F. (2015). Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions. *Construction and Building Materials*, Vol. 81, 162-171.
- Artemenko S.E. (2003). Polymer composite materials made from carbon, basalt and glass fibers. Structure and properties. *Fiber Chemistry*, Vol. 35, 226-229.
- Baena M., Torres L., Turon A., Barris C. (2009). Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pullout test. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, 784-797.
- Banibayat P., Patnaik A. (2014). Variability of mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer bars manufactured by wet-layup method. *Materials and Design*, Vol. 56, 898-906.
- Bank L.C. (2006). Composites for Construction: Structural design with FRP materials. Wyd. 1, *John Willey and Sons LTD*.
- Barris C., Torres L., Mias C., Vilanova I. (2012). Design of FRP reinforced concrete beams for serviceability requirements. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 18, 843-857.
- Branston J, Das S., Kenno S., Taylor C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 124, 878-886.
- Ceroni F., Cosenza E., Manfredi G., Pecce M. (2006). Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, 857-868.
- Chen Y., Davalos J., Ray I., Kim H. (2007). Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures. *Composites and Structures*, Vol. 78, 101-111.
- Cosenza E., Manfredi G., Realforzo R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 1, 40-51.
- CSA-S806-02 (2007). Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. *Canadian Standard Association*, Canada.
- CSA-S807-10 (2010). Specification for fiber-reinforced polymer. *Canadian Standard Association*, Canada.
- Elgabbas F., Ahmed E., Benmokrane B. (2015). Physical and mechanical characteristics of new basalt-FRP bars for reinforcing concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 623-635.
- Fiore V., Di Bella G., Valenza A. (2011). Glass-basalt epoxy hybrid composites for marine applications. *Material Design*, Vol. 32, 2091-2099.
- Li G., Wu J., Ge W. (2015). Effect of loading rate and chemical corrosion on the mechanical properties of large diameter glass/basalt-glass FRP bars. *Construction and Building Materials*, Vol. 93, 1059-1066.
- Park C., Jang C., Lee S., Won J. (2008). Microstructural investigation of long-term degradation mechanisms in GFRP dowel bars for jointed concrete pavement. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 108, 3128-3137.

- Robert M., Cousin P., Benmokrane B. (2009). Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 13, 66-73.
- Selejda J., Brózda K. (2016). Zastosowanie kompozytów w budownictwie zrównoważonym. W: A. Rak, V. Bojchuk, W. Baran (red.). Wybrane zagadnienia inżynierii środowiska w budownictwie. *Wydawnictwo PZITB Oddział Opole*, Opole.
- Sim J., Park C., Moon D. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Journal of Composites B*, Vol. 36, 504-512.
- Sayed Ahmad F., Foret G., Le Roy R. (2011). Bond between carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC): experimental study. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 479-485.
- Urbański M., Łapko A., Garbacz A. (2013). Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*, Vol. 57, 1183-1191.
- Wang X., Wang Z., Wu Z., Cheng F. (2014). Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP rods as shear resistance members, *Construction and Building Materials*, Vol. 73, 781-789.
- Wei B., Cao H., Song S. (2010). Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, 4708-4715.
- Wei B., Cao H., Song S. (2011). Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites: Part A*, Vol. 42, 22-29.
- Zhou J., Chen X., Chen S. (2011). Durability and service life prediction of GFRP bars embedded in concrete under acid environment. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, 4095-4102.

REINFORCING CONCRETE STRUCTURES WITH NON-METALLIC COMPOSITE FRP BARS

Abstract: The paper presents the sorts, properties and designing methods for structures with FRP bars. The methods to determine the guaranteed tensile strength and guaranteed modulus of elasticity according to the guidelines for non-metallic reinforcement ACI 440.1R and CSA-S807 were presented, based on the analysis of strength parameters test results of GFRP bars and BFRP bars. As an example, the procedure of calculating the flexural capacity of structure reinforced with FRP bars according to ACI 440.1R was discussed. The results of the mechanical properties tests of GFRP bars and BFRP bars were used for calculation.