

# Odporność prętów z hybrydowych kompozytów FRP na działanie środowiska alkalicznego

Mgr inż. Grzegorz Banasiak, prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Do najczęstszych przyczyn niszczenia konstrukcji betonowych zalicza się korozję zbrojenia w następstwie karbonatacji otuliny betonowej, powtarzające się cykle zamrażania i odmrażania i oddziaływanie chlorków ze środowiska (np. środki do odładzania jezdni). Z tego względu od kilkunastu lat trwają prace nad opracowaniem rozwiązania alternatywnego w stosunku do zbrojenia stalowego [1]. Jednym z takich rozwiązań jest zbrojenie wykonane z kompozytów FRP (*Fibre Reinforced Polymers*). Podstawową zaletą kompozytów FRP, oprócz lepszych właściwości mechanicznych, jest ich odporność chemiczna. Z powodu kontaktu prętów FRP z otuliną betonową szczególnie istotna jest odporność na działanie środowiska alkalicznego [2]. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań tego rodzaju odporności prętów zbrojeniowych wykonanych z hybrydowych (bazaltowo-węglowych) kompozytów FRP.

## 2. Pręty zbrojenie z kompozytów FRP

### 2.1. Ogólna charakterystyka prętów z kompozytów FRP

Pręty zbrojeniowe FRP wytwarzane są z ciągłych włókien, żywic epoksydowych, poliestrowych lub winyloestrowych w procesie pultruzji. W zależności od rodzaju, włókna stanowią do 80% objętości prętów FRP, a co najmniej 20% matryca [3]. W zależności od rodzaju zastosowanego włókna ciąglego rozróżnia się następujące typy kompozytów FRP (tab. 1): z włóknem szklanym GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), węglowym CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), aramidowym (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*) oraz ostatnio bazaltowym BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*). Dodatkowo stosowany jest oplót FRP poprawiający przyczepność prętów do betonu (odpowiednik uźbrowania prętów stalowych). W przeciwieństwie do stali, która jest materiałem

izotropowym, pręty FRP są materiałem anizotropowym. Właściwości prętów FRP w kierunku podłużnym zależą od właściwości włókien, natomiast właściwości w kierunku poprzecznym oraz wytrzymałość na ścinanie uzależnione są od właściwości żywicy (ACI440.1R-06).

Ostatnio coraz większą popularność zyskują pręty FRP z włóknem bazaltowym [5]. Pręty BFRP wykazują wiele istotnych zalet, w porównaniu do zbrojenia stalowego, a także innych kompozytów FRP. Jednakże stosunkowo nieduży moduł sprężystości podłużnej prętów BFRP powoduje nadmierne przekroczenie ugięć i zarysowania w zginanych elementach betonowych nimi zbrojonych. Rozwiązaniem powyższego problemu jest zwiększenie sztywności prętów BFRP przez zastąpienie części włókien bazaltowych włóknami węglowymi.

### 2.2. Kompozyty HFRP

Włókna bazaltowe mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie, ale ich stosunkowo niski moduł sprężystości zazwyczaj powoduje niedobór konstrukcyjnej sztywności. Dodatek włókien CFRP o wysokim module sprężystości ma zapewnić wzmocnienie początkowej sztywności. Wartość modułów została obliczona przy zastosowaniu prawa mieszanin. Moduł sprężystości w kierunku podłużnym można wyznaczyć ze wzoru:

$$E_{11} = E_m V_m + \sum_i E_{11,fi} V_{fi} \quad (1)$$

gdzie:

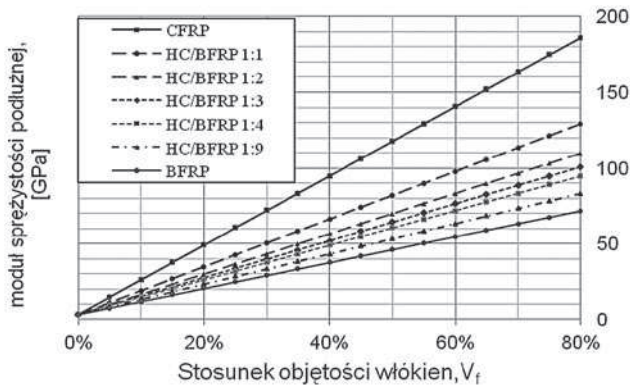
$E_{11,fi}$ ,  $E_m$  – moduły sprężystości, odpowiednio włókien i matrycy,

$V_{fi}$ ,  $V_m$  – udziały objętościowe, odpowiednio włókien i matrycy.

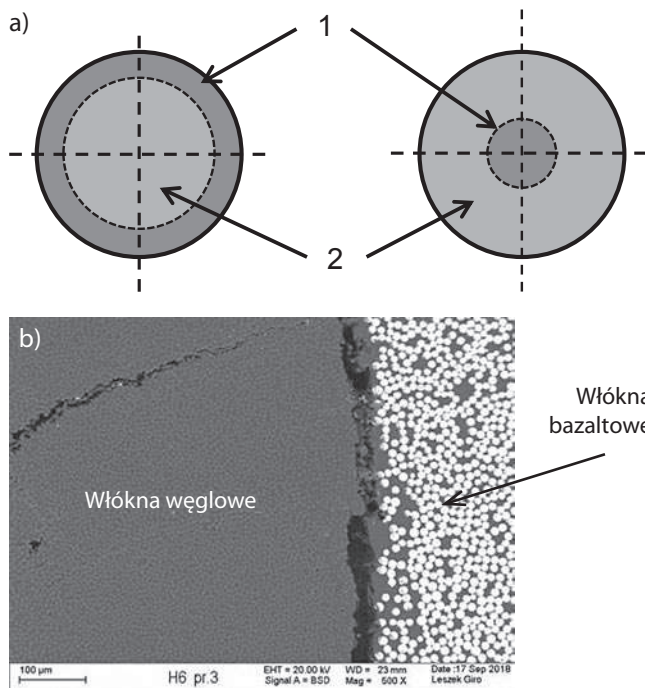
Przy obliczaniu wartości modułu sprężystości oraz wytrzymałości na rozciąganie wykorzystano właściwości mechaniczne handlowo dostępnych rowingów węglowych i bazaltowych.

Tabela 1. Właściwości prętów FRP według [1]

Właściwość	Stal	GFRP	CFRP	AFRP	BRFP
Granica plastyczności, MPa	40–75	N/A	N/A	N/A	N/A
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	483–690	483–1600	600–3690	1720–2540	1035–1650
Moduł sprężystości, GPa	200	35–51	120–580	41–125	25–59
Odształcenie przy zerwaniu,%	6–12	1,2–3,1	0,5–1,7	1,9–4,4	1,6–3,0



**Rys. 1.** Zależność pomiędzy stosunkiem objętości włókien i modułem sprężystości w kierunku podłużnym obliczonym na podstawie reguły mieszanin



**Rys. 2.** Analiza wpływu układu włókien: a) modele układu włókien w przecie HFRP wykorzystane w symulacji metodą MES: 1 – włókna węglowe, 2 – włókna bazaltowe; w każdym elemencie żywica epoksydowa jako matryca, b) widok przekroju pręta HFRP, z włóknami ulokowanymi w środku, po badaniach wytrzymałości na ścinanie (SEM, pow. 500x)

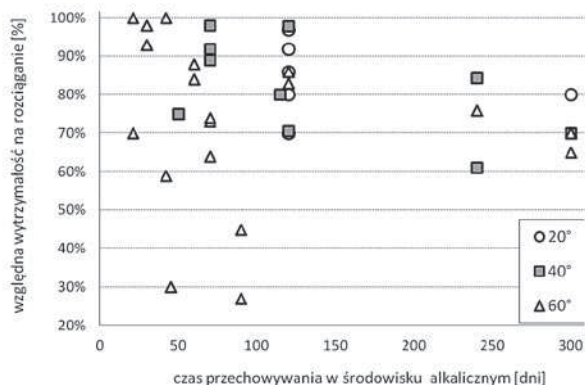
Włókna węglowe charakteryzowały się następującymi właściwościami mechanicznymi: wytrzymałość na zerwanie  $f_f = 5000$  MPa, moduł sprężystości  $E_f = 245$  GPa, odkształcenie graniczne  $\varepsilon_f = 2,1\%$ , a włókna bazaltowe: wytrzymałość na zerwanie  $f_f = 950$  MPa, moduł sprężystości  $E_f = 90$  GPa, odkształcenie graniczne  $\varepsilon_f = 2,8$ . Jako matrycę zastosowano żywicę epoksydową o module sprężystości  $E_m = 3$  GPa. Korzystając z zależności (1), wyznaczono zależność wartości modułu sprężystości w kierunku podłużnym od udziału objętościowego włókien przy różnym stopniu substytucji włókien bazaltowych włóknami węglowymi (rys. 1).

Badania eksperymentalne prowadzone dla prętów HFRP zawierających włókna węglowe i szklane [6] wskazują, że konfiguracja włókien może rzutować na właściwości mechaniczne prętów. Analiza wpływu układu włókien, przeprowadzona przy wykorzystaniu metody MES [7] dla dwóch wariantów ułożenia włókien węglowych, tj. w warstwie powierzchniowej oraz w rdzeniu (rys. 2a), wykazała, że wpływ ten jest stosunkowo niewielki. Co więcej, ze względów technologicznych [4] preferowane jest ułożenie włókien węglowych w rdzeniu (rys. 2b).

### 3. Badania odporności chemicznej prętów FRP

Badania odporności chemicznej prętów zbrojonych były ukierunkowane na ich odporność na działanie środowiska silnie alkalicznego, symulującego oddziaływanie otuliny betonowej na pręt FRP. Zarówno polskie normy, jak i eurokod nie zawierają metod badawczych przewidzianych do badań odporności chemicznej prętów kompozytowych. Za najpowszechniej stosowaną metodę badawczą można uznać metodę opisaną w raporcie Amerykańskiego Instytutu Betonu ACI 440.3R-04. Metoda badania odporności na alkalia, opisana w części B6 wspomnianych wytycznych zawiera 3 procedury badań prowadzonych w temperaturze  $60^\circ\text{C}$ , każda z nich dla zróżnicowanego stopnia obciążenia. Próbkę (po 25 prętów o danym przekroju na procedurę + 5 prętów w grupie kontrolnej) w procedurach A i B zanurzone są w roztworze alkalicznym ( $118,5$  g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $0,9$  g  $\text{NaOH}$ ,  $4,2$  g  $\text{KOH}$  w  $1$  L destylowanej wody, pH od  $12,6$  do  $13$ , zbiornik z roztworem szczelnie zakryty). W procedurze B pręty są dodatkowo obciążone do uzyskania odkształcenia na poziomie  $2\%$ . W procedurze C próbki są obciążone jak w procedurze B, ale badane pręty są zabetonowane w próbkach walcowych o średnicy  $150$  mm i wysokości  $200$  mm. Po upływie okresu  $1, 2, 3, 4, 6$  miesięcy przechowywania w roztworze oznacza się zmianę masy i wytrzymałość (a właściwie spadek wytrzymałości) na rozciąganie. Na początku, w trakcie i na końcu badania, zapisuje się wartości pH roztworu alkalicznego, temperaturę i wygląd zewnętrzny badanych prętów (kolor, powierzchnia, kształt, przekrój pod mikroskopem).

Opisana wyżej metoda rekomendowana w 440.3R-04 jest długotrwała (czas badań dla jednej partii to min.  $200$  dni), skomplikowana (jednoczesne zanurzenie, rozciąganie i ogrzewanie próbki do temp.  $60^\circ\text{C}$  przez pół roku) i bardzo droga. Prawdopodobnie dlatego w literaturze zdecydowanie częściej można znaleźć opisy badań odporności chemicznej prętów kompozytowych przy zastosowaniu metod uproszczonych. Przykładowe wyniki badań odporności prętów FRP z włóknem szklanym poddane oddziaływaniu środowiska alkalicznego opracowane na podstawie danych literaturowych [8–11] zestawiono na rysunku 3. Badania wytrzymałości na rozciąganie, modułu elastyczności i przyczepności prętów do betonu wskazują na istotny



**Rys. 3.** Względna wytrzymałość na rozciąganie prętów kompozytowych z włóknem szklanym (GFRP) poddanych oddziaływaniu środowiska silnie alkalicznego w temperaturze 20, 40 i 60°C na podstawie danych literaturowych [8–11]

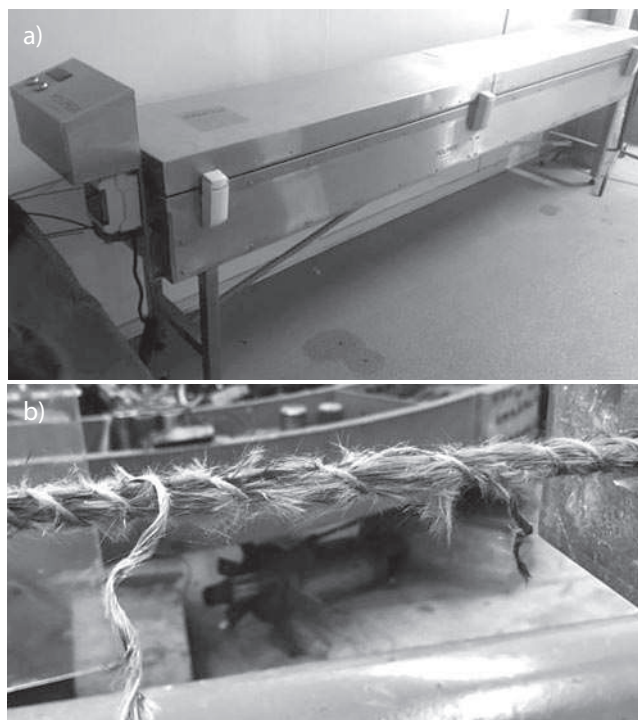
wpływ temperatury roztworu alkalicznego, w której przechowywane są próbki przed oznaczeniem wytrzymałości na rozciąganie.

#### 4. Badania odporności prętów BFRP, HFRP i nHFRP na działanie alkaliów

Przedmiotem badań były pręty bazaltowe BFRP oraz hybrydowe (bazaltowo-węglowe) HFRP o średnicy  $\varnothing 10$ , w których matrycę stanowiła żywica epoksydowa:

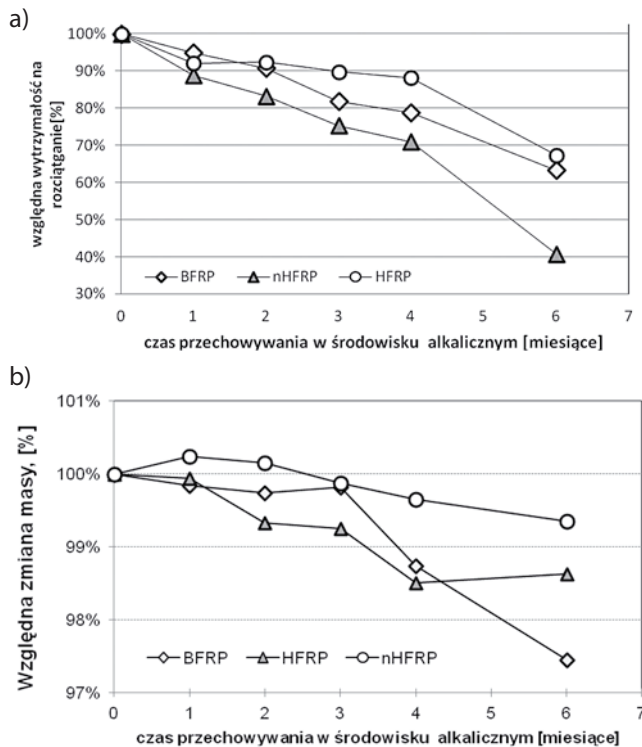
- BFRP: włókna bazaltowe 100%,
- HFRP: włókna bazaltowe B=75%, włókna węglowe C=25%,
- nHFRP: włókna bazaltowe B=75%, włókna węglowe C=25%, żywica epoksydowa modyfikowana dodatkiem nanokrzemionki (3% objętościowo).

Badania odporności na działanie środowiska alkalicznego przeprowadzono zgodnie z procedurą A. Do badań przygotowano próbki prętów o długości 1420 mm (po 25 próbek każdego rodzaju prętów). Przed badaniem próbki zważono, a półmetrowe odcinki na każdym końcu zabezpieczono folią termokurczliwą w celu oddzielenia odcinków przeznaczonych do zakotwienia od czynnika agresywnego. Następnie próbki zostały umieszczone w wannie temperaturowej (rys. 4a) zawierającej przygotowany roztwór o silnym odczynie alkalicznym ( $\text{pH} > 12$ ). Próbki prętów były przetrzymane w roztworze przez 1, 2, 3, 4 i 6 miesięcy w temperaturze 60°C. Po upływie kolejnych okresów badawczych próbki były wyjmowane z wanny, osuszane, ważone, a następnie półmetrowe odcinki na końcach były utwierdzane w stalowych rurach o średnicy w zaprawie wysokiej wytrzymałości. Po związaniu zaprawy próbki były umieszczane w maszynie wytrzymałościowej (rys. 4b) i badana była maksymalna siła przenoszona przez pręt. Zerwanie najczęściej dotyczyło włókien/oplotu, rzadziej zrywany zostawał cały przekrój pręta (rys. 4b). Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie oraz ubytku masy po przetrzymywaniu prętów zgodnie z ACI440



**Rys. 4.** Badanie próbek: a) wanna temperaturowa, w której przetrzymywane były próbki prętów HFRP przed oznaczeniem wytrzymałości na rozciąganie, b) widok pręta nHFRP po rozciąganiu

– procedurą A zostały przedstawione na rysunkach 5. Każdy punkt reprezentuje średnią z pomiarów 5 próbek. Wszystkie rodzaje próbek (BFRP, HFRP oraz nHFRP) wykazywały właściwości sprężyste aż do gwałtownego zerwania. Największe spadki wytrzymałości odnotowano dla prętów w nanokrzemionką – nHFRP, a najmniejsze dla prętów hybrydowych HFRP. Pręty BFRP wykazywały spadek wytrzymałości po 5 punktów procentowych na miesiąc w pierwszym okresie oraz po ok. 10 punktów procentowych po następnych okresach przetrzymywania w roztworze. Po 6 miesiącach przetrzymywania w roztworze wytrzymałość prętów na rozciąganie wynosiła odpowiednio 60% i 65% w przypadku prętów BFRP i HFRP wytrzymałości próbek referencyjnych (rys. 5a), co należy uznać za wynik bardzo dobry w świetle wyników badań uzyskanych dla prętów GFRP (por. rys. 3). Najniższą względną wytrzymałością na rozciąganie – 40% wytrzymałości próbek referencyjnych – charakteryzowały się pręty nHFRP (z matrycą modyfikowaną nanokrzemionką), w przypadku których obserwowano najmniejszy spadek masy (rys. 5b). Porównując zmiany względnej wytrzymałości na rozciąganie ze zmianami i masy prętów, można stwierdzić, że przyczyną gorszego zachowania się prętów nHFRP była nieskuteczna modyfikacja nanokrzemionką, a w szczególności niezapewnienie równomiernego rozkładu cząstek nanokrzemionki w objętości matrycy i brak jednorodności jej mikrostruktury. To może tłumaczyć obserwowany przyrost masy prętów nHFRP już po 1 miesiącu ich przechowywania w roztworze alkalicznym.



**Rys. 5.** Względna zmiana wytrzymałości na rozciąganie (a), względna zmiana masy prętów BFRP, HFRP i nHFRP po ich przechowywaniu w roztworze alkalicznym w temperaturze 60°C (b) [procedura A wg ACI 440]

## 5. Podsumowanie

W ciągu ostatnich lat dokonano znaczącego postępu, związanego z wykorzystaniem kompozytów FRP w konstrukcjach betonowych, w tym jako zbrojenia alternatywnego do zbrojenia stalowego. Pręty zbrojeniowe BFRP wykazują wiele istotnych zalet, w porównaniu do zbrojenia stalowego, a także innych kompozytów FRP. Dotychczasowe wyniki projektu, realizowanego przez konsorcjum Politechniki Warszawskiej, Politechniki Białostockiej oraz partnera przemysłowego Polprek SA potwierdzają, że rozwiązaniem powyższego problemu jest zwiększenie sztywności prętów BFRP przez zastąpienie części włókien bazaltowych przez włókna węglowe. Modyfikacja składu prętów nie wpłynęła niekorzystnie na ich odporność na działanie środowiska alkalicznego. Badania odporności przeprowadzone zgodnie

z wytycznymi ACI 440 (procedura A) wykazały, że najmniejszy spadek wytrzymałości na rozciąganie charakteryzował pręty HFRP, uzasadniając w ten sposób korzyści z częściowej substytucji włókien bazaltowych włóknami węglowymi. Jednocześnie nie potwierdzono korzystnego wpływu nanokrzemionki, przede wszystkim z powodu technologicznych problemów z uzyskaniem równomiernego rozkładu nanokrzemionki w objętości matrycy epoksydowej.

**Podziękowania:** artykuł powstał w ramach projektu pt. „Innowacyjne hybrydowe zbrojenie kompozytowe FRP do konstrukcji infrastrukturalnych o podwyższonej trwałości”; Programu Badań Stosowanych NCBR: PBS3/A2/20/2015.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Szmigiera E., Urbański M., Garbacz A., Dziś i jutro prefabrykacji z zastosowaniem kompozytów FRP, Monografia: Budownictwo prefabrykowane w Polsce – stan i perspektywy, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2016
- [2] ACI Committee 440: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars 440.1R-06, American Concrete Institute, 2006
- [3] Siwowski T., Mosty z kompozytów FRP. Kształtowanie, analiza, badania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2018
- [4] Garbacz A., Szmigiera E., Urbański M., Protchenko K., Kubas M., O badaniach hybrydowego zbrojenia FRP do konstrukcji infrastrukturalnych z betonu, Inżynieria i budownictwo 8/2017
- [5] 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, Elsevier, 57, 2013
- [6] FRP reinforcement in RC structures. Technical report, fib Bulletin 40/2007
- [7] Protchenko K., Dobosz J., Urbański M., Garbacz A., Wpływ substytucji włókien bazaltowych przez włókna węglowe na właściwości mechaniczne prętów B/CFRP (HFRP), JCEEA; Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture; Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, tom XXXIII, zeszyt 63, 1/1/2016
- [8] Jong-Pil Won, Su-Jin Lee, Yoon-Jung Kim, Chang-Il Jang, Sang-Woo Lee, The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-positivity relationship of GFRP rebar, Composites: Part B, 39/2008
- [9] Jong-Pil Won, Yi-Na Yoon, Byung-Tak Hong, Tei-Joon Choi, Su-Jin Lee, Durability characteristics of nano-GFRP composite reinforcing bars for concrete structures in moist and alkaline environments, Composite Structures, 94/2012
- [10] Yi Chen, Julio F. Davalos, Indrajit Ray, Hyeong-Yeol Kim, Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures, Composite Structures, 78/2007
- [11] Abbasi A., Hogg P. J., Temperature and environmental effects on glass fibre rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete, Composites: Part B, 36/2005

Konferencja Nowych Technologii  
BIMaction  
11-12 maja 2019 r.  
Politechnika Wrocławska



<http://www.bimaction.pwr.edu.pl/>