

Niemetaliczne zbrojenie FRP w kompozytach betonowych jako alternatywa dla prętów stalowych

dr inż. Paweł Helbrych, dr inż. Jakub Jura, Politechnika Częstochowska

1. Wprowadzenie

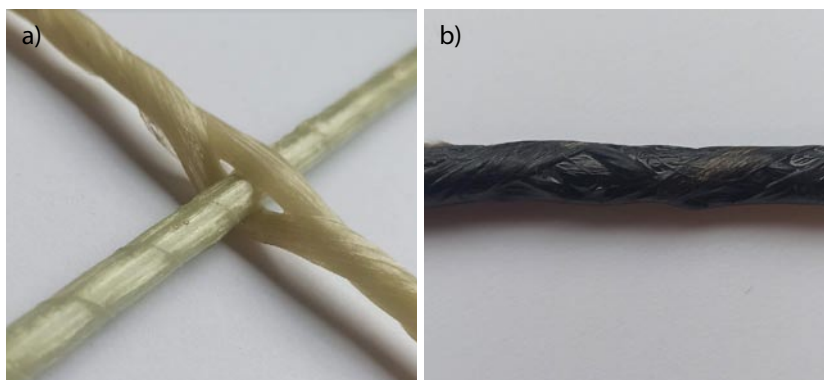
Sformułowanie zbrojenie niemetaliczne określa wszystkie rodzaje zbrojenia betonu wykonanego z innych materiałów niż stal. Równie często zbrojenie niemetaliczne określane jest w branży jako zbrojenie „niekonwencjonalne”. W praktyce jako zbrojenie niemetaliczne stosuje się kompozyty włókniste (FRP – *Fibre Reinforced Polymers*), na szerszą skalę znalazły zastosowanie w budownictwie na początku lat dziewięćdziesiątych poprzedniego stulecia. W pierwszej kolejności – w krajach wysoce rozwiniętych, w szczególności w krajach Europy Zachodniej, jak również w Kanadzie, Japonii czy Stanach Zjednoczonych. Początki wprowadzania kompozytów włóknistych w Polsce to zastosowanie przede wszystkim jako materiały do wzmocnienia konstrukcji w formie nakładek. Nieco później na rynku budowlanym w Polsce pojawiły się pręty kompozytowe do zbrojenia betonu oraz całe elementy konstrukcji. Systemy FRP dzisiaj są traktowane jako podstawowa, domyślna technika wykorzystywana do wzmacniania konstrukcji. Obecnie w wielu miejscach na świecie użytkowane są kompozytowe konstrukcje mostowe, w opracowaniach branżowych można znaleźć koncepcje obiektów wysokościowych czy międzykontynentalnych mostów łączących ze sobą Afrykę i Europę, wykonanych w dużej mierze tylko i wyłącznie z wykorzystaniem niemetalicznych materiałów FRP [1, 2].

2. Rodzaje zbrojenia niemetalicznego FRP

Podstawowym rodzajem zbrojenia niemetalicznego są pręty kompozytowe FRP. Zbrojenie tego typu wykonane jest z ciągłych włókien osadzonych w żywicy polimerowej metodą pultruzji. W procesie produkcji ciągłe włókna są najpierw impregnowane żywicą termoutwardzalną, a następnie kształtowane w założoną formę. Zawartość włókien w prętach to 40–70% objętości [3]. W zależności od rodzaju zastosowanych włókien wyróżnić można cztery najpopularniejsze stosowane pręty FRP:

- pręty GFRP z włókien szklanych (rys. 1a),
- pręty CFRP z włókien węglowych,
- pręty AFRP z włókien aramidowych,
- pręty BFRP z włókien bazaltowych (rys. 1b).

Ze względu na niski koszt produkcji najpopularniejszą są stosowane włókna szklane [4]. Charakteryzują się właściwościami alkalicznymi oraz anizotropowością. Ze względu na właściwości alkaliczne do łączenia z betonem nadają się jedynie włókna AR (*Alkaline Resistant*) odporne na działanie alkaliów. Włókna szklane uznaje się za bardzo dobrze przyczepne do większości żywic, natomiast są podatne na działanie temperatury oraz wilgotność. Włókna węglowe wytwarzane są dwiema podstawowymi metodami – pyrolizy głównie poliakrylonitrylu oraz na bazie smoły węglowej poprzez transfer przez wąską dyszę i stabilizację przez ogrzewanie. Typowe włókno węglowe zbudowane jest niemalże wyłącznie z rozciągniętych struktur węglowych o postaci fibrylarnej. Średnica pojedynczej nitki włókna węglowego jest kilkakrotnie mniejsza niż średnica ludzkiego włosa, a wpływ na końcową średnicę włókna ma wybór metody wytwarzania. W konsekwencji wybór metody wytwarzania znacząco wpływa na właściwości mechaniczne włókna. Uznaje się, że wśród materiałów FRP włókna węglowe charakteryzują się najlepszymi parametrami mechanicznymi. Ponadto są odporne na agresję czynników środowiskowych oraz na wahania temperaturowe. Mogą przewodzić prąd elektryczny [4, 5]. Włókna aramidowe, a także włókna kevlarowe, spośród wszystkich włókien FRP mają najniższą gęstość własną. Charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie rzędu 3000 MPa, co w połączeniu z niską gęstością własną powoduje, że w przypadku tego typu włókien stosunek wytrzymałości do masy jest bardzo korzystny. Włókna aramidowe obecnie produkowane są w procesie



Rys. 1. Pręty na bazie włókien: a) szklanych, b) bazaltowych (opracowanie własne)

Tabela 1. Podstawowe właściwości włókien do produkcji prętów FRP [2, 6, 8]

Typ włókna	Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Odształcenie przy zerwaniu [%]	Współczynnik Poissona
E-Glass	1,75–3,80	72,4	2,4–50	0,22
AR-Glass	1,80–3,50	70–76	2,0–3,0	
Węglowe wysokiej wytrzymałości	2,45–4,80	215–240	1,1–2,0	0,2
Aramid wysokomodułowy	3,50–4,00	115–200	1,8–3,5	0,35

niskotemperaturowej polikondensacji monomerów parafenylenodiaminy oraz chlorku tereftaloilu. Włókna aramidowe charakteryzują się wysoką odpornością na agresywne działanie czynników środowiskowych, ponadto są odporne na podwyższone temperatury. Nie przewodzą prądu elektrycznego, mają cechy izolacji termicznej. Włókna aramidowe narażone na działanie wilgoci oraz na oddziaływanie promieni UV charakteryzują się pogorszonymi właściwościami mechanicznymi [6]. Włókna bazaltowe są pochodzenia naturalnego, są wytwarzane w procesie przetapiania skały bazaltowej. Charakteryzują się nieregularną i chropowatą powierzchnią. W składzie mineralnym tego typu włókien wyróżnić można plagioklaz, piroksen i oliwin. Wytrzymałość na rozciąganie włókien bazaltowych mieści się w przedziale od 2800 do 3200 MPa, natomiast moduł sprężystości – od 85 do 90 GPa. Są odporne na podwyższone temperatury oraz na oddziaływanie środowiska agresywnego chemicznie. Przyjmuje się, że włókna bazaltowe są około trzykrotnie tańsze niż włókna węglowe [7]. Podstawowe właściwości włókien, z których wykonywane są pręty FRP przedstawiono w tabeli 1.

3. Właściwości prętów FRP

Pręty FRP charakteryzują się odpornością na korozję i na działanie agresywnych czynników środowiskowych i chemicznych, w tym na chlorki i kwasy. Ponadto mają wysoką wytrzymałość na rozciąganie. Masa prętów kompozytowych w stosunku do prętów stalowych jest ponad pięciokrotnie niższa w zależności od rodzaju pręta oraz rodzaju użytej żywicy. Odporność na korozję prętów FRP umożliwia zmniejszenie otuliny betonu, natomiast niska oporność ogniowa powoduje konieczność jej zwiększenia, co w ogólnym rozrachunku powoduje, że w stosunku do stali otulina zbrojenia kompozytowego ze względu na klasę odporności ogniowej musi być większa [2, 3, 6]. Porównanie wymagań dotyczących minimalnej otuliny zbrojenia na przykładzie stali zbrojeniowej i prętów FRP z włókna szklanego przedstawiono w tabeli 2.

Ze względu na fakt, że pręty FRP uznawane są za alternatywę dla typowego zbrojenia stalowego, zasadne jest porównanie właściwości obu tych materiałów. Moduł sprężystości prętów FRP jest znacząco niższy niż moduł sprężystości dla stali, pomimo faktu, iż pojedyncze włókno niezależnie od rodzaju ma moduł sprężystości przekraczający wartość 200 GPa. Moduł sprężystości produktu końcowego, tj. wiązki włókien

Tabela 2. Porównanie wymagań dotyczących minimalnej otuliny zbrojenia na przykładzie stali zbrojeniowej i prętów GFRP [2]

Klasa odporności ogniowej	Minimalna otulina STAL	Minimalna otulina GFRP
–	$c_{min}(a1)$ [mm]	c_{min} [mm]
R30	19 (25)	30
R60	39 (45)	50
R90	39 (45)	65
R120	59 (65)	85

zatonionych w matrycy, poprzez obecność żywicy spada. Najwyższy moduł sprężystości mają pręty FRP na bazie włókien węglowych, w zależności od zastosowanych włókien może być dwu- lub nawet trzykrotnie wyższy niż z najpopularniejszych prętów z włókien szklanych GFRP. Jeśli chodzi o cechy materiałowe, to inaczej niż w przypadku stali, gdzie podatność na odkształcenia jest sprężysto-plastyczna, w przypadku prętów FRP podatność na odkształcenia jest liniowo-sprężysta. Pręty kompozytowe nie uplastyczniają się, a co za tym idzie zniszczenie elementów budowlanych wykonanych z tego typu zbrojeniem nie będzie zniszczeniem postępująco-plastycznym, tylko zniszczeniem kruchym, gwałtownym bez ostrzeżenia. Ponadto moduł sprężystości przy tego typu materiałach anizotropowych wyznaczany jest jako procentowy udział włókien w strukturze całego pręta. Ilość włókien w prętach w zależności od średnicy docelowej pręta mieści się w przedziale ok. 40–70% i wraz ze wzrostem średnicy procentowy udział włókien w końcowym produkcie maleje. W związku z tym moduł sprężystości maleje wraz ze wzrostem średnicy produktu docelowego. Praca zbrojenia kompozytowego ma charakter silnie anizotropowy i należy już na etapie projektowania przewidzieć odpowiednie ułożenie prętów w taki sposób, aby pracowało wyłącznie w kierunku naprężeń rozciągających [2, 9]. Właściwości mechaniczne prętów FRP dostępnych obecnie w Polsce w porównaniu do prętów stalowych przedstawia tabela 3.

Kolejnym bardzo ważnym aspektem, który w przypadku prętów stalowych jest pomijany, to przyczepność do betonu. Przyczepność do betonu w przypadku prętów FRP zależy od sposobu wykończenia powierzchni pręta. Obecnie na rynku mamy dostępne pręty z opłotem spiralnym, prostokątnym, dwukierunkowym, krzyżowym, pręty uźbrowane proste, skośne, krzyżowe, pręty z nacinanym uźbrowaniem już po utwardzeniu produktu oraz pręty z posypką kwarcową. W przypadku przeznaczenia prętów FRP jako

Tabela 3. Właściwości mechaniczne prętów FRP dostępnych obecnie w Polsce w porównaniu do prętów stalowych

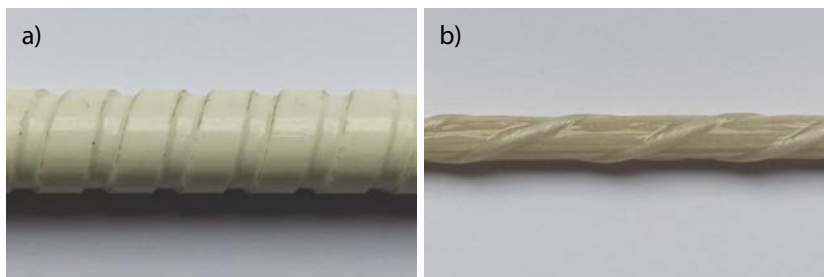
Rodzaj zbrojenia	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [GPa]	Granica plastyczności [MPa]	Odkształcenie przy zerwaniu [%]	Dostępne średnice [mm]
AFRP	1400	60	-	2,3	5–12,5
BFRP	1100–1450	50–80	-	2,2	1–30
GFRP	1000–1250	46–65	-	0,75–2,5	4–40
CFRP	930–2900	98–200	-	0,75–202	
Stal AIIIIN	440–550	200	500	> 7,5	6–80

zbrojenie konstrukcyjne badania przyczepności do betonu wskazują, że jedynie pręty z wykończeniem w postaci posypki kwarcowej oraz z żebrowaniem nacinanym po utwardzeniu produktu nadają się do tego celu [10, 11]. Pręt FRP z włókna szklanego Schöck Combar® z żebrowaniem nacinanym po utwardzeniu żywicy przedstawiono na rysunku 2a, natomiast pręt z włókna szklanego z opłotem spiralnym pokazano na rysunku 2b.

Kolejną cechą różniącą pręty FRP od prętów stalowych jest cecha wynikająca z anizotropowości prętów FRP, tj. rozszerzalność termiczna, która w kierunku poprzecznym i podłużnym jest drastycznie różna. W przypadku włókien węglowych i aramidowych wskaźnik ten jest wręcz ujemny, natomiast w gotowym pręcie, poprzez zastosowanie żywicy, wskaźnik ten jest bliski zeru lub dodatni w niewielkich wartościach. Podczas projektowania elementów betonowych zbrojonymi prętami FRP należy uwzględnić różnice współczynników rozszerzalności termicznej obu materiałów, z jakich wykonane są pręty. Na wydłużenie podłużne pręta wpływ mają przede wszystkim parametry włókien, a na wydłużenie poprzeczne parametry matrycy. Badania dowodzą, że w sytuacji pożaru, w podwyższonej temperaturze do około 430°C, spadek wytrzymałości dochodzi do 30%, a w skrajnych przypadkach przy wyższych temperaturach nawet do 85% [12].

Przyjęta technologia wykonania prętów FRP powoduje problemy w kształtowaniu prętów na budowie. Niemożliwe jest odgięcie prętów podczas prac zbrojarskich, wszystkie odgięcia należy przewidzieć już na etapie produkcji, przed utwardzeniem matrycy. Prętów FRP nie można łączyć ze sobą poprzez zgrzewanie czy spawanie, łączy się je za pomocą tradycyjnych prętów wiązałkowych lub opasek zaciskowych. Wykorzystanie żywic termoplastycznych stanowi pewną alternatywę dla tego typu problemów, jednak jak dotąd rozwiązanie to nie znalazło szerokiego zastosowania w Polsce. Od niedawna obserwuje się próby wytwarzania siatek zbrojeniowych poprzez splecenie wzajemne włókien przed utwardzeniem żywicy.

Rys. 2. Pręt FRP z włókna szklanego Schöck Combar® z żebrowaniem nacinanym po utwardzeniu żywicy(a), pręt FRP z włókna szklanego z opłotem spiralnym (b) (opracowanie własne)

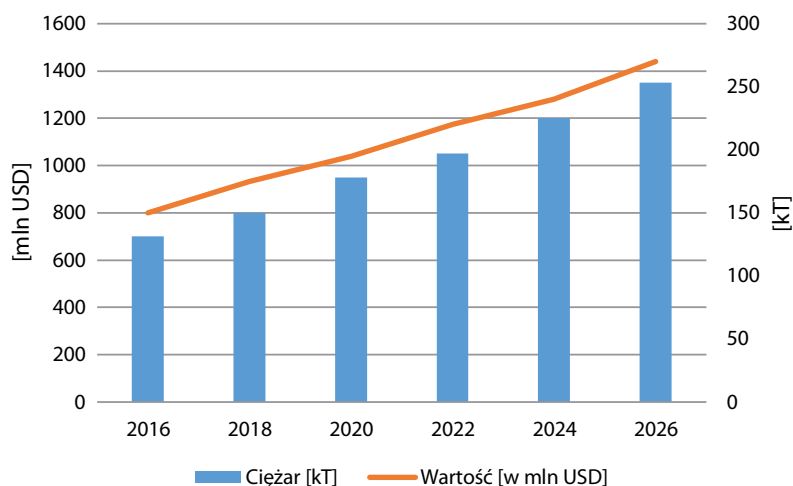


Siatki takie należy wykonywać indywidualnie pod określony wymiar. Pręty o małych średnicach można transportować w kręgach, a niski ciężar powoduje obniżenie kosztów transportu. Pręty FRP można transportować w dużo dłuższych odcinkach niż pręty stalowe, docinać na budowie, co powoduje mniejszą liczbę połączeń na zakład, mniejsze zużycie prętów, a co za tym idzie mniejszą ilość odpadów. Produkcja prętów kompozytowych jest mniej energochłonna w porównaniu do prętów stalowych[1–3].

4. Zastosowanie prętów FRP

Ze względu na swoje właściwości wytrzymałościowe oraz strukturalne pręty FRP w sytuacjach gdy zbrojenie stalowe przestaje być efektywne, może być z powodzeniem wykorzystane. Dotyczy to w szczególności obiektów specjalnych, gdzie wymagana jest obojętność elektromagnetyczna. Może to dotyczyć zarówno obiektów stacji transformatorowych lub specjalistycznych laboratoriów badawczych. Pręty FRP znajdują swoje zastosowanie również w obiektach geotechnicznych w elementach takich jak ściany szczelinowe, w szczególności tam, gdzie planowane jest wykonywanie tunelu za pomocą TBM. Wiercenie otworu w ścianie żelbetowej zbrojonej stalą powoduje dużo szybsze zużycie komponentów wiertniczych, w przypadku zbrojenia prętami FRP wykonanie otworu maszynami typu TBM nie wpływa znacząco na degradację tarczy wiertniczej. W taki sposób wykonywano tunele metra Downtown Line w Singapurze czy Chennau Metro w Indiach. Prętami GFRP zbroi się również z powodzeniem prefabrykowane pale wielkośrednicowe. Prefabrykowane kosze przygotowane z prętów GFRP przez swój niższy w porównaniu do stali ciężar są dużo łatwiejsze w transporcie oraz wbudowaniu. Pręty kompozytowe wykorzystuje się również wszędzie tam, gdzie

Rys. 3. Wartość rynkowa produkcji prętów FRP oraz ilość produkcji wraz z prognozą na najbliższe lata [14]



wymagana jest odporność na oddziaływanie agresywnego środowiska. W Polsce tego typu prętami zazbrojono tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku oraz most w Błazowej nad potokiem Ryjak w ciągu drogi 1411R. Ponadto coraz częściej pręty kompozytowe stosuje się do zbrojenia fundamentów, pali czy posadzek przemysłowych, gdzie wymagana jest wysoka odporność na korozję, wysoka wytrzymałość zmęczeniowa czy objętość elektromagnetyczna [4, 6, 13].

5. Podsumowanie

Pręty FRP są obecne na rynku budowlanym w Polsce w czterech podstawowych rodzajach: z włókien aramidowych (AFPR), włókien węglowych (CFRP), włókien bazaltowych (BFRP) oraz z włókien szklanych (GFRP). Ze względu na czynnik cenowy najpopularniejsze zbrojenie kompozytowe to GFRP. Oprócz niewątpliwych zalet tego typu zbrojenia, jakimi są wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysoka odporność na korozję, odporność na działanie agresywnych warunków środowiskowych, odporność elektromagnetyczna, elektryczna czy elektrostatyczna oraz niska gęstość, pręty FRP cechuje również liniowo-sprężysty charakter pracy w całym zakresie wytrzymałości bez możliwości wystąpienia odkształceń plastycznych. W związku z tym ich zniszczenie następuje w sposób kruchy, nagły i gwałtowny. Niska odporność na działanie wysokich temperatur powinna determinować wykorzystanie tego typu zbrojenia w budowlanych elementach konstrukcyjnych narażonych na oddziaływania termiczne wywołane pożarem, co za tym idzie wykorzystanie prętów FRP do zastosowań wewnętrznych, czyli tam, gdzie muszą być zachowane warunki odporności ogniowej, jest mocno ograniczone i obciążone ryzykiem. W przypadku zastosowań zewnętrznych w obiektach mostowych, zbiornikach, kładkach czy posadzkach takie ryzyko nie występuje. Stosowanie prętów FRP jest obecnie ekonomicznie uzasadnione. Postępujący rozwój materiałów budowlanych i nowe rozwiązania technologiczne powinny w niedalekiej przyszłości pozwolić na wyeliminowanie wad prętów FRP i tym samym otworzyć nowe możliwości ich stosowania. Prognozy i analizy rynkowe przeprowadzone przez Global Market Insights potwierdzają te tezy. Wykres wartości rynkowej produkcji prętów FRP oraz ilość produkcji wraz z prognozą na najbliższe lata przedstawiono na rysunku 3.

Przedstawiony wykres wskazuje na ciągły rozwój tej branży. W 2016 roku wartość rynkowa branży produkcji prętów FRP na świecie wynosiła ok. 800 mln USD, natomiast GMI prognozuje wzrost tej wartości w 2026 roku do kwoty większej

niż 1,4 mld USD. Sytuacja na rynku budowlanym z lat 2018–2022, kiedy to można było zaobserwować problem z dostępnością podstawowych materiałów budowlanych oraz wahań cen materiałów spowodowała większe zainteresowanie inwestorów oraz projektantów prętami FRP, a tym samym większą dynamikę rozwoju branży prętów FRP. Na rozwój branży prętów FRP duży wpływ może mieć przyjęta strategia ochrony środowiska w Unii Europejskiej, produkcja prętów kompozytowych ze względu na jej mniejszą energochłonność w stosunku do produkcji prętów stalowych pozwala na bardziej zrównoważoną gospodarkę surowcami naturalnymi, a tym samym mniejszą emisję CO₂.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Szumigala M., Pawłowski D., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, *Przegląd Budowlany* 3/2014, str. 47–50
- [2] Górski M. et al., Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 2018
- [3] Rduch A. et al., Właściwości i zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych, *Przegląd Budowlany* 11/2017, str. 43–46
- [4] Jarek B., Kubik A., Zastosowanie prętów zbrojeniowych z włókna szklanego (GRFP) w budownictwie, *Przegląd Budowlany* 12/2015, str. 21–26
- [5] Grygo R., Kosior-Kazberuk M., Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* tom 8, 1/2017, str. 21–28
- [6] Szruba M., Kompozyty w budownictwie, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 4/2020
- [7] Kowacki M., Materiały kompozytowe – wynalazek na miarę XXI w., *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 4/2019
- [8] Stolecka M., Kotynia R., Materiały kompozytowe stosowane w budownictwie, *Budownictwo Ogólne i Konstrukcje Drewniane: zeszyt naukowy* 10/2009, str. 39–49
- [9] Waśniewski T. et al., Konsekwencje stosowania prętów kompozytowych FRP jako zbrojenia betonu, *Inżynieria i Budownictwo* 11/2006, str. 591–594
- [10] Nepomuceno E. et al., Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete, *Construction and Building Materials* 287, 2021, str. 123042
- [11] Mesbah H. et al., Evaluation of Bond Strength of FRP Reinforcing Rods in Concrete and FE Modelling, *International Journal of Civil Engineering and Construction Science* 4/2017, str. 21–41
- [12] Hajiloo H. et al., Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures, *Construction and Building Materials* 162, 2018, str. 142–154
- [13] Pawłowski D., Szumigala M., Zastosowanie zbrojenia kompozytowego FRP w konstrukcjach narażonych na agresywne warunki środowiska, *Materiały Budowlane* 11/2016, str. 124–125
- [14] <https://www.gminsights.com/industry-analysis/fiber-reinforced-polymer-frp-rebars-market>