

Właściwości i zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych

Mgr inż. Aleksandra Rduch, mgr inż. Łukasz Rduch,
dr hab. inż., prof. Pol. Śl. Ryszard Walentyński, Politechnika Śląska

1. Wprowadzenie

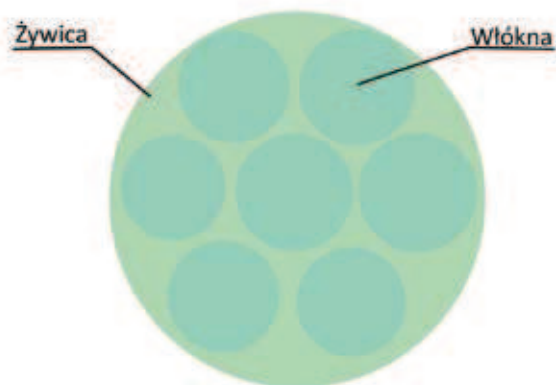
Postęp w technologii materiałów jest bardzo szybki w każdej dziedzinie techniki, również w budownictwie. Przykładem materiału dynamicznie rozwijającego się w ostatnim czasie są pręty kompozytowe do zbrojenia elementów betonowych. Pręty kompozytowe mają nie tylko bardzo wysoką wytrzymałość, ale dzięki stosowaniu różnych rodzajów włókien i żywic mogą mieć różne właściwości dostosowane do konkretnych potrzeb. Rozwój technologii wykonywania kompozytów oraz ich coraz większe rozpowszechnienie w różnych dziedzinach techniki powoduje spadek cen ich wytwarzania. W coraz szerszym zakresie są stosowane również w budownictwie mostowym, drogowym, a także kubaturowym, zwłaszcza przemysłowym.

2. Czym są pręty kompozytowe

Słowo kompozyt pochodzi od łacińskiego „compono”, co znaczy składać lub „compositio”, co znaczy złożenie. Kompozyt to materiał złożony z co najmniej dwóch składników o różnych właściwościach, których połączenie daje nowe, pożądane właściwości. Kompozyty polimerowe wywodzą się z przemysłu obronnego, lotniczego i kosmicznego. 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. Pręty kompozytowe polimerowe (ang. *Fiber Reinforced Polymer*, *FRP*) składają się z ciągłych włókien osadzonych w żywicy polimerowej głównie termoutwardzalnej (poliesterowej, epoksydowej, winyloesterowej) bądź termoplastycznej (PEEK, PPS, PSUL) [1].

Pręty są najczęściej produkowane w procesie pultruzji, czyli prasowania ciągłego. Polega to na przeciąganiu ciągłych włókien impregnowanych żywicą przez formy nadające prętom odpowiednią średnicę, ewentualnie nawinięcie uzwojenia stanowiącego zębowanie prętów i utwardzenie żywicy w wysokiej temperaturze. Włókna zajmują ok. 80% objętości pręta, żywica ok. 20% [3].

Włókna mają na celu zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości oraz sztywności kompozytu, natomiast żywica odpowiada za połączenie włókien z zachowaniem odpowiedniej odległości pomiędzy nimi, zabezpieczenie ich powierzchni



Rys. 1. Schemat budowy pręta kompozytowego

przed uszkodzeniem mechanicznymi i chemicznymi oraz przekazywanie na nie naprężeń [1]. Najczęściej stosuje się włókna szklane (z ang. *Glass Fiber Reinforced Polymer* – GFRP), węglowe (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – CFRP), bazaltowe (*Basalt Fiber Reinforced Polymer* – BFRP) lub aramidowe (*Aramid Fiber Reinforced Polymer* – AFRP). W celu poprawienia przyczepności zbrojenia do betonu stosuje się uzębrowanie przez nawinięcie splotu włókien lub wyżłobienie uzębrowania albo pokrycie powierzchni piaskiem [1]. Udoskonalanie właściwości mechanicznych zbrojenia z FRP oraz uprzemysłowienie produkcji spowodowało, że w ostatnim dziesięcioleciu 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. Pierwsze próby zastosowania zbrojenia kompozytowego w budownictwie miało miejsce w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych w USA, ZSRR, Japonii i Kanadzie.

3. Właściwości prętów kompozytowych

Właściwości mechaniczne i fizyczne prętów FRP różnią się znacznie od właściwości prętów stalowych i zależą głównie od typów matrycy i włókien, jak również ich udziału objętościowego.

3.1. Właściwości mechaniczne prętów kompozytowych
Najważniejszą cechą prętów kompozytowych dających

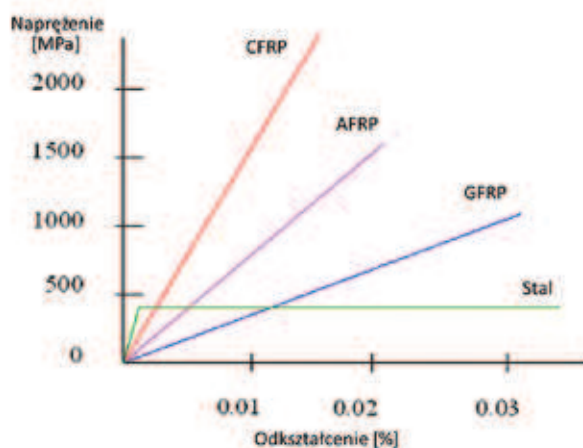
Tabela 1. Wady i zalety prętów kompozytowych

Zalety zbrojenia FRP	Wady zbrojenia FRP
Wysoka wytrzymałość na rozciąganie	Brak uplastycznienia przed kruchym zerwaniem
Odporność korozyjna	Niska odporność na alkalia (GFRP i AFRP)
Obojętność elektromagnetyczna	Niski moduł sprężystości (zależny od typu włókien)
Niski ciężar własny	Niska wytrzymałość na obciążenia długotrwałe i wielokrotnie zmienne
Bardzo niska przewodność cieplna i elektryczna (GFRP i AFRP)	Pręty FRP mają inny współczynnik rozszerzalności termicznej niż beton
Niska przewodność elektromagnetyczna (AFRP, GFRP)	Brak możliwości spawania i gięcia prętów na placu budowy (dla żywicy termoutwardzalnej)
Wysoka wytrzymałość zmęczeniowa (tylko CFRP)	Niska odporność na wysokie temperatury (pożar)
Łatwość cięcia	Niska wytrzymałość na ściskanie i ścinanie w porównaniu z wytrzymałością na rozciąganie
Cena porównywalna ze stalą (GFRP)	Wysoka cena (poza GFRP)

im przewagę nad stalowymi jest ich wysoka wytrzymałość na rozciąganie. Wynosi zależnie od zastosowanych włókien dla prętów na bazie włókien szklanych (GFRP) do ok. 1600 MPa, bazaltowych (BFRP) ok. 1100 MPa, aramidowych (AFRP) do ok. 2500 MPa, węglowych (CFRP) nawet do 3700 MPa. Dla pojedynczych włókien wytrzymałość jest jeszcze wyższa, dla włókien węglowych do ok. 3700 MPa, dla aramidowych do ok. 3800 MPa, dla szklanych do ok. 4500 MPa, dla bazaltowych do ok. 4800 MPa. Poważną wadą prętów kompozytowych jest brak uplastycznienia przed zerwaniem, wykres zależności naprężenie-odkształcenie jest prawie idealnie liniowy zarówno dla prętów, jak i dla pojedynczych włókien. Skutkuje to gwałtownym niesygnalizowanym zerwaniem w momencie wyczerpania nośności. Z tego powodu zbrojenie FRP nie jest zalecane dla elementów, gdzie wymagana jest redystrybucja momentów. Zaleca się projektowanie elementów tak, aby zniszczenie następowało przez zmiażdżenie strefy ścisanej, a nie przez zerwanie prętów, przeciążenie elementu byłoby sygnalizowane zarysowaniem betonu i nadmiernymi ugięciami [3].

Pręty kompozytowe są materiałami anizotropowymi, tzn. mają różne właściwości w różnych kierunkach. Wytrzymałość prętów kompozytowych na ściskanie i ścinanie jest kilkakrotnie mniejsza od wytrzymałości na rozciąganie, np. dla prętów GFRP o wytrzymałości na rozciąganie 1100 MPa wytrzymałość na ściskanie wynosi 350 MPa, na ścinanie 150 MPa.

Moduł sprężystości podłużnej dla rozciągania jest niższy niż dla stali dla prętów AFRP, GFRP i BFRP, natomiast dla CFRP może być nawet dwukrotnie wyższy, wynosi od 120 do 580 GPa. Dla stali wynosi 200 GPa. Moduł sprężystości podłużnej dla ściskania jest mniejszy niż



Rys. 3. Wykres zależności naprężenie-odkształcenie dla rozciąganych prętów zbrojonych kompozytowych [8]

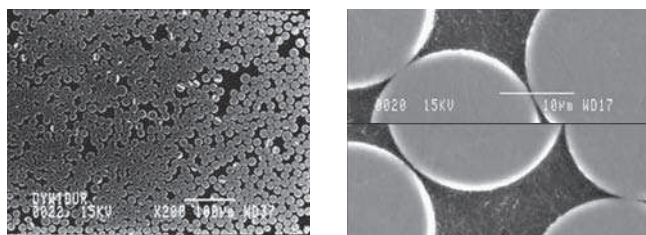
moduł sprężystości dla rozciągania. Większość wytycznych do projektowania prętów FRP sugeruje nie polegać na wytrzymałości i sztywności dostarczanej przez ścisane pręty FRP.

Pręty FRP są podatne na zjawisk pełzania, które polega na stopniowym zmniejszaniu wytrzymałości przy długotrwałych obciążeniach. Włókna węglowe są najmniej podatne na pełzanie, włókna aramidowe są umiarkowanie wrażliwe, natomiast włókna szklane są podatne najbardziej. Zjawisko to jest w dużym stopniu zależne od czynników środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność [3].

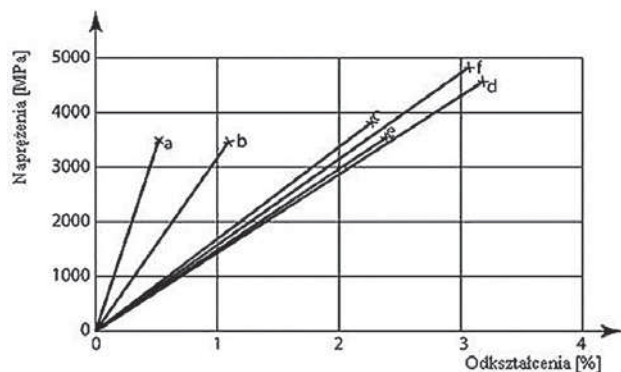
Wysoką wytrzymałością zmęczeniową charakteryzują się pręty CFRP. Pozostałe mają niską odporność na obciążenia wielokrotnie zmienne. W przecie poddanym działaniu obciążenia wielokrotnie zmiennego na styku włókna z żywicą powstają mikropełnięcia osłabiające pręt [3].

3.2. Właściwości fizyczne prętów kompozytowych

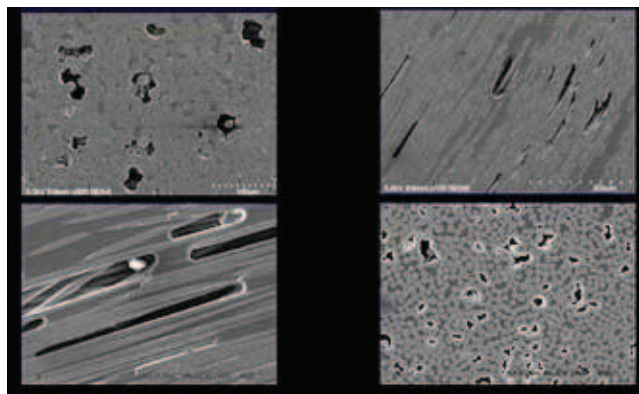
Na pogorszenie współpracy prętów kompozytowych z betonem ma wpływ różnica pomiędzy współczynnikami rozszerzalności termicznej dla prętów i betonu. W przypadku stali współczynnik ten jest zbliżony i wynosi $11,7 [\times 10^{-6} / ^\circ C]$. Współczynnik podłużnej rozszerzalności termicznej jest zdominowany przez właściwości włókna i jest mniejszy niż dla betonu, a nawet ujemny, podczas gdy rozszerzalność



Rys. 2. Zdjęcie mikroskopowe przekroju pręta kompozytowego w dwóch zakresach powiększenia [3]



Rys. 4. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla rozciąganych włókien: a) grafitowych, b) węglowych, c) aramidowych (Kevlar 49), d) S-glass, e) E-glass, f) bazaltowych [1]



Rys. 5. Zdjęcie mikroskopowe mikropęknięć w przecie poddanym działaniu obciążenia wielokrotnie zmiennego [3]

Tabela 2. Właściwości mechaniczne prętów kompozytowych [6]

	Stal	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP
Granica plastyczności [MPa]	270–550	–	–	–	–
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	483–690	483–1600	600–3690	1720–2540	1100
Moduł Younga dla rozciągania [GPa]	200	35–51	120–580	41–125	70
Odształcenie dla granicy plastyczności [%]	0,14–0,25	–	–	–	–
Odształcenie przy zerwaniu [%]	6,0–12,0	1,2–3,1	0,5–1,7	1,9–4,4	2,2

poprzeczna jest zdominowana przez żywicę i współczynnik jest większy niż dla betonu. Większy współczynnik rozszerzalności poprzecznej może powodować powstawanie dodatkowych naprężeń obwodowych generujących rysy promieniowe, co szczególnie w prętach ścisanych może niekorzystnie wpływać na przyczepność betonu do prętów.

Żywica prętów kompozytowych traci swoje właściwości przy temperaturze powyżej 65–120°C zależnie od rodzaju żywicy, pręt traci przyczepność do betonu. Jest to temperatura znacznie niższa niż panująca w trakcie pożaru. Nie zaleca się stosowania ich do elementów, które mogą być narażone na oddziaływanie pożaru [4].

Pręty GFRP oraz AFRP charakteryzują się niskim przewodnictwem cieplnym i elektromagnetycznym. W zasadzie wszystkie pręty kompozytowe są obojętne elektromagnetycznie.

Włókna szklane i aramidowe charakteryzują się niską trwałością w środowisku zasadowym, a takie występuje w betonie. Badania wpływu alkaliów wykonanych przez Kastsuki i Uomoto (1995) przy ich przyspieszonej penetracji wykazały, że po 120 dniach narażenia na działanie



Rys. 6. Zasięg penetracji alkaliów w przecie kompozytowym [4]

1-molowego roztworu NaOH nastąpiła redukcja nośności do 72% dla prętów GFRP, dla prętów AFRP nośność spadła o 5% [4].

Odporność na alkalia można zwiększyć przez stosowanie odpowiedniego składu żywic, co jednak znacząco podnosi koszt wykonania prętów. Wytwórcy prętów w Japonii rozwinęli nowy typ zbrojenia hybrydowego, który jest kombinacją włókien GFRP i AFRP. Ta kombinacja jest korzystna ze względu na to, że pręty AFRP mają wysoką odporność na działania alkaliów, podczas gdy włókna GFRP są najtańsze spośród wszystkich włókien. Te pręty hybrydowe znane pod nazwą AGFRP zawierają 23% włókien aramidowych i 42% włókien szklanych. Włókna szklane są zbrojeniem głównym, podczas gdy aramidowe włókna służą do ochrony włókien szklanych przed alkaliom. Badania przeprowadzone na tych prętach, narażonych na działanie 1-molowego roztworu NaOH, po 120 dniach wykazały pomijalnie małą redukcję nośności, podczas gdy nośność prętów z włókien szklanych spadła do ok. 70% [4]. Pręty wszystkich rodzajów są odporne na czynniki agresywnie działające na stal zbrojeniową, takie jak chlorki z wody morskiej, środki odladzające, ciecze żrące. Pręty kompozytowe mają niską odporność na działanie promieniowania UV, jednak otulina betonowa jest wystarczającym zabezpieczeniem na takie oddziaływanie.

3.3. Właściwości techniczne prętów kompozytowych
Matrycę prętów FRP wykonuje się głównie z żywicy termoutwardzalnej. Wadą takiej żywicy jest brak możliwości kształtowania odgięć prętów po utwardzeniu żywicy. Pręty gięte czy strzemiona muszą być kształtowane już na etapie produkcji pręta przed utwardzeniem żywicy. Niemożliwe

Tabela 3. Właściwości fizyczne prętów kompozytowych [6]

	Stal	GFRP	CFRP	AFRP
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 równoległym do włókien	11,7	6 do 10	-2 do 0	-6 do -2
W kierunku prostopadłym do włókien	11,7	21 do 23	23 do 32	60 do 80

jest również łączenie takich prętów przez spawanie czy zgrzewanie. Wady te można wyeliminować poprzez zastosowanie żywicy termoplastycznej, pręty na bazie takiej żywicy mogą być wyginane oraz zgrzewane długo po opuszczeniu linii produkcyjnej. Jednak do tej pory są one rzadko stosowane [7].

Wykonywanie siatek prefabrykowanych na bazie żywicy termoutwardzalnej jest możliwe przez splecenie włókien poszczególnych prętów przed utwardzeniem żywicy. Rozwiązanie takie jest skomplikowane technologicznie, ale jest już możliwe do wykonania.

Zaletą FRP jest łatwość cięcia prętów oraz niski ciężar, co ułatwia wykonanie zbrojenia na budowie, zmniejsza koszty transportu i ułożenia zbrojenia. Pręty o mniejszych średnicach, ale dzięki wysokiej wytrzymałości mogą być wykorzystane jako nośne, można transportować w kręgach i na budowie docinać na wymiar. Brak jest wtedy odpadów prętów, mniejsze jest zużycie prętów na zakładzie, których może być mniej.

Proces produkcji prętów kompozytowych jest mniej energochłonny niż prętów stalowych, są więc materiałem bardziej ekologicznym. Kompozyty są również trzykrotnie lżejsze od stali, a dzięki ich większej wytrzymałości stosuje się ich mniej niż analogicznych elementów stalowych. To powoduje dalsze zmniejszenie zużycia energii na transport i montaż elementów. Surowce do produkcji prętów kompozytowych mogą być pozyskiwane na terenie Polski, np. bazalt, w odróżnieniu od prętów stalowych wytwarzanych z importowanej rudy żelaza.

Poważną wadą większości rodzajów prętów kompozytowych jest ich wysoka cena w porównaniu do prętów stalowych. Jedynie pręty na bazie włókien szklanych zaczynają być cenowo porównywalne ze stalą, są dzięki temu najczęściej stosowane, pomimo iż inne rodzaje prętów mają lepsze właściwości. Przykładowo zbrojenie posadzki przemysłowej o powierzchni ok. 1400m² i gr. 20 cm z prętów stalowych wyceniono na ok. 52 tys. zł., natomiast z prętów kompozytowych GFRP na ok. 37 tys. zł. Zbrojenie stalowe mogło być układane w postaci siatek, dzięki czemu koszt wykonania jest w tym przypadku niższy niż układanie pojedynczych prętów kompozytowych. Przy uwzględnieniu kosztów wykonania, cena zbrojenia stalowego jest porównywalna ze zbrojeniem kompozytowym.

Brak jest również standaryzacji materiału, pręty przed zastosowaniem należałoby każdorazowo badać.

4. Zastosowanie prętów kompozytowych

Właściwości prętów kompozytowych determinują ich zastosowanie. Główną zaletą prętów kompozytowych jest ich wysoka wytrzymałość na rozciąganie. Stosuje się je jako ciężka sprężające do sprężania elementów betonowych. Jedną z poważniejszych wad prętów FRP jest ich niska odporność na wysokie temperatury. Coraz powszechniej stosuje się je do zbrojenia fundamentów, pali i posadzek przemysłowych, gdzie wpływ pożaru jest pomijalny. Wykonuje się z nich również kotwy do gruntu. Ze względu na odporność na działanie soli z wody morskiej prętami kompozytowymi zbroi się elementy nabrzeży i pomostów morskich. Dzięki odporności na ciecz agresywnie działające na stal nadają się do budowy zbiorników przemysłowych lub oczyszczalni ścieków. Pręty kompozytowe dzięki obojętności elektromagnetycznej można stosować do budowy obiektów, od których wymaga się braku zakłóceń pola magnetycznego, takich jak wieże telewizyjne lub pomieszczenia radiolokacyjne w szpitalach albo do budowy stacji transformatorowych.

5. Podsumowanie

Stosowanie prętów kompozytowych staje się powoli ekonomicznie uzasadnione. Nowe rozwiązania technologiczne oraz rozwój materiałów powinny umożliwić wyeliminowanie wad prętów oraz otworzyć nowe możliwości stosowania prętów kompozytowych o różnych właściwościach dostosowanych do konkretnych potrzeb. W niedalekiej przyszłości stosowanie zbrojenia kompozytowego może w znacznej mierze zastąpić stosowanie zbrojenia stalowego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Szumigała M., Pawłowski D., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, Przegląd budowlany 3/2014, str. 47–50
- [2] Drzazga M., Kamiński M., Pręty zbrojeniowe FRP jako główne zbrojenie zginanych elementów betonowych – przegląd zaleceń i efektywność projektowania, Przegląd budowlany 3/2015, str. 22–28
- [3] Nanni A., De Luca A., Zadeh H. J., Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, Taylor & Francis Group, LLC, 2014
- [4] Vikrant M. Sc., Bhise S., Strength degradation of GFRP bars, M.Sc Thesis, wrzesień 2002 www.aslanfrp.com
- [5] Bank L. C., Design of FRP reinforced and strengthened concrete, CRC Press 2008, edited by Edward G. Nawy
- [6] Mossakowski P., Pręty z kompozytów polimerowych z włókna- mi do zbrojenia betonowych konstrukcji inżynierskich, Drogi i Mosty 1/2006, str. 35–52
- [7] Kocaoz S., Samaranyake V.A., Nanni A., Elsevier, marzec 2005
- [8] Fico R., Limit states design of concrete structures reinforced with FRP bars, PH.D. Thesis, 2008, www.fedoa.unina.it