

Badania fizycznych i wytrzymałościowych właściwości kompozytowych prętów zbrojeniowych w świetle norm

Mgr inż. Piotr Szymczak, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Pręty kompozytowe FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) są coraz chętniej stosowane jako zbrojenie betonu. Jest to wynikiem korzystnych właściwości tych prętów: niemal całkowitą odpornością na korozję, brakiem przewodzenia elektrycznego, niezakłócaniem pól elektromagnetycznych oraz niską masą prętów przy systematycznym obniżaniu się ceny produktu [10]. Najczęściej stosowane jest zbrojenie z włóknem szklanym GFRP (*G – Glass*) ze względu na dostępność i relatywnie niską cenę. Wadą zbrojenia kompozytowego GFRP jest przede wszystkim niski moduł sprężystości, wynoszący od 20 do 30% modułu stali, a także brak możliwości zaginania prętów.

Badania prętów kompozytowych są trudniejsze niż w przypadku prętów stalowych. Trzeba stosować specjalne sposoby uchwycenia pręta przy rozciąganiu – ze względu na małą odporność na siły poprzeczne, nie można bowiem umieszczać prętów wprost w szczękach maszyny wytrzymałościowej, przystosowanej do badania. Określane w badaniach właściwości materiałowe przypisuje się nie samemu materiałowi, lecz prętowi o umownej średnicy, nazywanej średnicą nominalną. Wynika to z faktu, iż wytrzymałość zależy od udziału włókien w żywicznej matrycy, a sposób wykończenia powierzchni pręta bywa różny (oplot jednoskrętny, krzyżowy, posypka mineralna). W artykule rozważono zalecenia norm ISO 10406:1 [7], amerykańskiej ACI 440.3R [1], rosyjskiej GOST 31938 [6] oraz włoskiej CNR-DT 203 [5], jako powszechnie stosowanych i obejmujących wszystkie podstawowe badania doświadczalne.

W Polsce nie ma przedmiotowej normy, natomiast można się posługiwać aprobatami technicznymi wydanymi przez Instytut Techniki Budowlanej [4] oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów [2, 3]. Na ich podstawie można dopuścić pręty kompozytowe do zastosowania na terenie Polski.

2. Charakterystyka geometryczna

Nominalną średnicę prętów określa się metodą hydrostatyczną na co najmniej trzech (ISO [7], GOST [6]) lub pięciu próbkach (ACI [1], CNR [5]), dla każdej badanej średnicy. Długość próbki powinna być nie mniejsza niż: 200 mm (ACI [1], CNR [5]), 200 mm i 100 mm odpowiednio dla średnic mniejszych bądź równych 20 mm i większych (ISO [7]) oraz 10 średnic zgodnie z GOST [6]. Nominalne wartości pola przekroju oraz średnicy wyrażają się odpowiednio wzorami:

$$A_f = \frac{\Delta V}{L} \quad (1)$$

$$d_b = 2 \times \sqrt{\frac{A_f}{p}} \quad (2)$$

gdzie:

A_f – nominalne pole przekroju,

ΔV – objętość określona na podstawie ilości wody wypartej przez badaną próbkę, ± 1 ml,

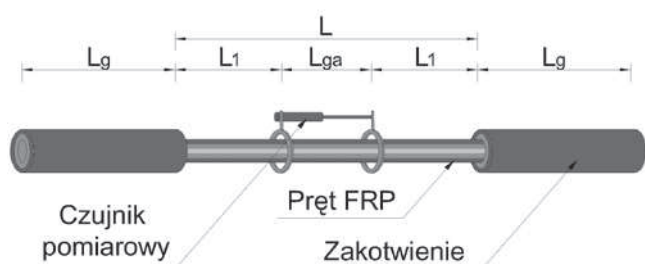
L – średnia długość próbki określona na podstawie trzech pomiarów, uzyskanych w efekcie obracania próbki o 120 stopni, $\pm 0,1$ mm,

d_b – nominalna średnica pręta.

Średnica handlowa jest umowną wartością przypisywaną przez producenta określonej partii wyrobu. Średnice handlowe nawiązują do stosowanych w przypadku prętów stalowych, np. 10, 12, 14, 16 mm. W obliczeniach elementów zbrojonych prętami kompozytowymi należy oczywiście posługiwać się średnicami nominalnymi i odpowiadającymi im wartościami geometrycznymi i wytrzymałościowymi.

3. Doraźna wytrzymałość na rozciąganie

W wyniku badania próbki na rozciąganie określa się: wytrzymałość na rozciąganie f_u , moduł sprężystości podłużnej E_f oraz graniczne odkształcenie pręta w chwili zerwania ε_u . Parametry te ściśle zależą od rodzaju



Rys. 1. Schemat próbki wraz z wymaganiami geometrycznymi

Tabela 1. Zestawienie wymagań dotyczących wymiarów próbek

Norma	d_b	L_g	L_{ga}	L	L_1
	mm	mm	mm	mm	mm
ACI 440:3R [1]	-	(2)	-	$\geq 40d_b$	$\geq 8d_b$
CNR-DT 203 [5]	-	(1)	-	$\geq 100, 40d_b$	$\geq 8d_b$
GOST 31938 [6]	4 – 10	300	-	$\geq 40d_b$	-
	12 – 16	350			
	18 – 22	450			
	24 – 30	500			
ISO 10406:1 [7]	-	(1)	$\geq 100, 8d_b$	$\geq 300, 40d_b$	-

(1) wymaga się zapewnienia odpowiedniej nośności oraz braku poślizgu pręta;

(2) rekomendowane wymiary rurki: długość (300–460 mm), średnica zewnętrzna (38–45 mm), grubość ścianki (4,8 mm) w zależności od średnicy pręta i materiału (GFRP, CFRP); długości te można zmniejszyć w przypadku zapewnienia braku poślizgu próbki w zakotwieniu.

włókien i żywicy zastosowanych w procesie produkcji pręta oraz od proporcji włókien i matrycy żywicznej w stosunku do przekroju pręta.

Ze względu na kruchość materiału, z jakiego wykonane są pręty, próbki osadza się w stalowych rurkach wypełnionych żywicą, mieszanką żywicy z piaskiem lub zaczynem cementowym. Schemat próbki został przedstawiony na rysunku 1.

Wymagane długości odcinków: zakotwienia L_g , bazy pomiarowej czujnika indukcyjnego L_{ga} , badanego odcinka L , oraz odległość bazy pomiarowej od krawędzi zakotwienia L_1 zostały przedstawione w tabeli 1. Oznaczenia stosowane na rysunku 1 i w tabeli 1 ujednolicono, przyjmując za podstawę normę ISO [7].

Próbkę wykonaną zgodnie z opisem rozciąga się w maszynie wytrzymałościowej o zakresie dostosowanym do przewidywanej siły zrywającej. Zniszczenie powinno nastąpić w obrębie badanego odcinka – patrz rysunek 2. Zniszczenie próbki w zakotwieniu może świadczyć o wystąpieniu poprzecznej siły obciążającej pręt,



Rys. 2. Rozwarstwienie włókien na odcinku pomiarowym; widoczny ekstensometr pomiarowy o regulowanej bazie

spowodowanej np. nieosiowym ułożeniem pręta w zakotwieniu.

Wytrzymałość pręta f_u określa się jako stosunek siły niszczącej do nominalnego pola przekroju (3). Moduł sprężystości E_f należy określić z przedziału 20–50% wytrzymałości pręta na rozciąganie (4). Odształcenie graniczne ε_u przy zerwaniu oblicza się według (5), na podstawie dwóch poprzednich wielkości.

$$f_u = \frac{F_u}{A_f} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{(F_2 - F_1)}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \times A_f} \quad (4)$$

$$\varepsilon_u = \frac{F_u}{E_f \times A_f} \quad (5)$$

gdzie:

f_u – wytrzymałość na rozciąganie,

F_u – siła niszcząca próbkę,

A_f – nominalne pole przekroju,

E_f – moduł sprężystości,

F_1, ε_1 – siła oraz odkształcenie odpowiadające naprężeniu równemu 20% wytrzymałości przy rozciąganiu (zerwaniu próbki),

F_2, ε_2 – siła oraz odkształcenie odpowiadające naprężeniu równemu 50% wytrzymałości przy rozciąganiu (zerwaniu próbki),

ε_u – odkształcenie graniczne.

Przykładowe wyniki badań według raportu [9] przedstawiono w tabeli 2. Dotyczą one prętów GFRP o czterech wyraźnie zróżnicowanych średnicach, w każdym przypadku z oplotem krzyżowym.

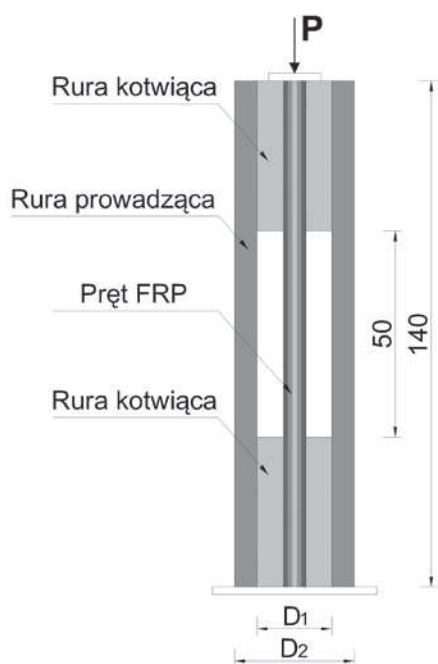
Tabela 2. Wyniki badań pręta GFRP według raportu [9]

d_b	E_f	f_u	ε_u
mm	GPa	MPa	‰
5,05	45,9	1288	28,1
7,63	40,2	1054	26,2
8,55	46,8	1019	21,8
10,83	49,1	1117	23,2

Jak można zauważyć, cechy materiałowe są wyraźnie związane ze średnicą pręta. Zależność wytrzymałości od średnicy nie jest liniowa, ale wykazuje tendencję malejącą wraz ze średnicą pręta. Można to przypisać niejednorodności rozłożenia włókien i żywicy w przekroju, narastającej wraz ze wzrostem średnicy pręta.

4. Doraźna wytrzymałość na ściskanie

Metodę badania prętów FRP na ściskanie opisuje jedynie norma GOST [6]. Sposób badania i wymiary próbki ilustruje rysunek 3. Pręt umieszczony w zakotwieniach musi się przy obciążaniu swobodnie przemieszczać względem zewnętrznej rurki prowadzącej. Jest to zapewnione przez zachowanie określonego na rysunku luzu między rurkami wewnętrznymi i rurką zewnętrzną. Nieuwzględnienie w pozostałych normach wytrzymałości prętów kompozytowych na ściskanie może wynikać z faktu, że w normach projektowych dotyczących zginanych elementów betonowych, zbrojonych prętami kompozytowymi, pomija się zbrojenie umieszczone w strefie ściskanej.



Rys. 3. Schemat badania pręta na ściskanie zgodnie z normą GOST [6]



Rys. 4. Próbką po badaniu na ściskanie wykonanym zgodnie z normą PN-EN 10080 [8]

Wartości wytrzymałości na ściskanie podane w aprobachie [4] uzyskano w inny sposób, stosując metody dotyczące stalowych prętów zbrojeniowych, według PN-EN 10080 [8]. Badania wykonano na próbce o długości pomiarowej odpowiadającej trzem średnicom. Pręty były osadzone w stalowych talerzykach, aby umożliwić rozwarstwienie włókien oraz zmiażdżenie pręta w miejscu przekazywania na pręt siły ściskającej (rys. 4). Wytrzymałość na rozciąganie określa się jako:

$$f_u = \frac{F_u}{A_f} \quad (6)$$

gdzie:

f_u – wytrzymałość na ściskanie,
 F_u – siła niszcząca próbkę na ściskanie,
 A_f – nominalne pole przekroju.

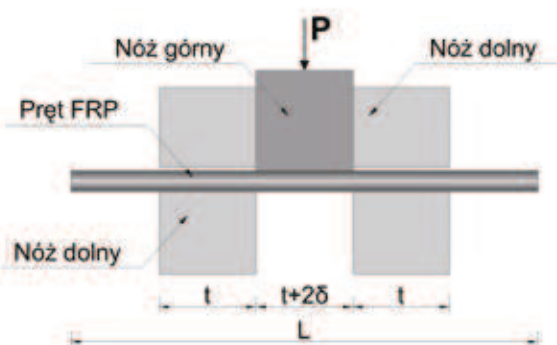
5. Doraźna wytrzymałość pręta na przecięcie

Badanie dotyczy nośności pręta na ścinanie poprzeczne (przecięcie) – ang. *transverse shear strength*. Jest ono ujęte w trzech z analizowanych norm, nie ma go natomiast w normie włoskiej CNR [5]. Badanie polega na przyłożeniu do pręta siły poprzecznej uzyskiwanej dzięki przesuwaniu się noża górnego względem noży dolnych – rysunek 5. Sposób badania pozostaje taki sam we wszystkich normach, jednak rekomendowane wymiary są zróżnicowane – patrz tabela 3. Definiowane są: długość próbki L , grubość noży t , oraz luz umożliwiający przekazanie siły na pręt obciążenia poprzecznego.

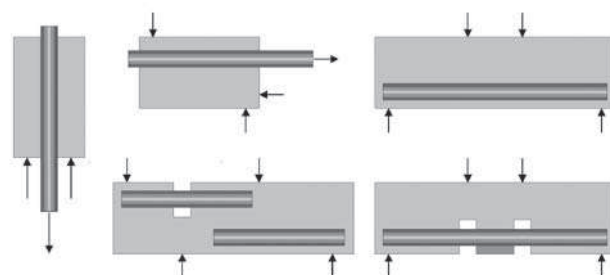
Tabela 3. Zestawienie wymagań dotyczących badania na poprzeczne ścinanie

Norma	t	L
	mm	mm
ACI 440:3R [1]	25,4	300
CNR-DT 203 [5]	–	–
GOST 31938 [6]	(1)	≥ 250
ISO 10406:1 [7]	50	≤ 300

(1) brak informacji dotyczących wymiarów



Rys. 5. Schemat badania pręta na poprzeczne ścinanie



Rys. 6. Różne metody badania przyczepności według ACI [1]

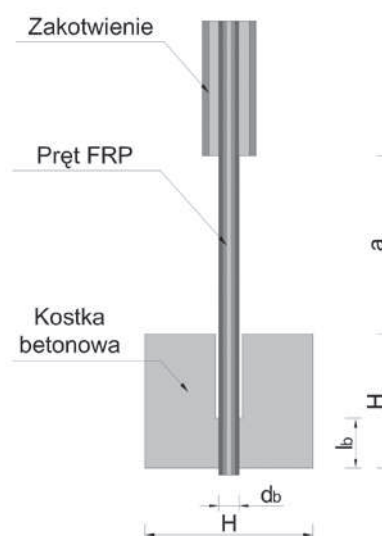
Tabela 4. Wymiary próbki do badania przyczepności metodą pull-out

Norma	d_b	H	l_b	a
	mm	mm	mm	mm
ACI 440:3R [1]	-	200 (1)	$5d_b$	(2)
CNR-DT 203 [5]	-	-	-	-
GOST 31938 [6] (1)	≤ 10	100	$5d_b$	$\geq 40d_b$
	12 – 18	150		
	≥ 20	200		
ISO 10406:1 [7]	< 17	100	$4d_b$	$\geq 300, 40d_b$
	17 – 30	150		

(1) w przypadku zarysowania betonu należy zwiększyć wymiar do 300 mm

(2) określona jest całkowita długość próbki wraz z zakotwieniem równa 1200 mm

(3) wymaga zastosowania spirali stalowej jako zbrojenie kostki betonowej (pręt o średnicy 6 mm w rozstawie co 40 mm)



Rys. 7. Zestawienie wymagań dotyczących badania przyczepności metodą pull-out

Wytrzymałość pręta na ścinanie poprzeczne określa się jako:

$$\tau_s = \frac{F_s}{2 \times A_f} \quad (7)$$

gdzie:

τ_s – wytrzymałość na poprzeczne ścinanie,

F_s – siła niszcząca próbkę,

A_f – nominalne pole przekroju pręta.

6. Przyczepność prętów do betonu

Normy oferują różne sposoby oceny przyczepności betonu do prętów kompozytowych. Najszersza jest pod tym względem norma ACI [1] – ideę dopuszczanych w niej sposobów badania przedstawia rysunek 6. Można wyróżnić dwie podstawowe metody: pull-out, związaną z wrywaniem pręta z betonu oraz „belkową”, nawiązującą do podporowych stref elementów zginanych. W pozostałych normach ISO [7], CNR [5] rekomendowana jest metoda pull-out, natomiast w normie

GOST [6] dopuszczone są obydwie metody. Normowe wymagania dotyczące metody pull-out są przedstawione w tabeli 4 oraz na rysunku 7. Można zauważyć, że wymiary próbek są zbliżone, podobnie jak wymagania sprzętowe.

7. Liczebność prób w badaniach wytrzymałościowych

Wymagana liczba próbek zależy od celu badania i jest ostatecznie ustalana przez jednostkę akredytującą w porozumieniu z producentem – patrz aprobata IBDiM [3]. Minimalną liczbę próbek, określoną w omawianych normach, zestawiono w tabeli 5.

8. Podsumowanie

Na podstawie przeglądu normowych metod badania prętów kompozytowych oraz własnych spostrzeżeń badawczych można sformułować następujące uwagi:

- metody badania prętów FRP są bardziej skomplikowane

Tabela 5. Zestawienie wymagań dotyczących badania na ścinanie

Norma	Rozciąganie	Ściskanie	Ścinanie poprzeczne	Przyczepność
ACI 440.3R [1]	≥ 5	–	≥ 5	≥ 5
CNR-DT 203 [5]	≥ 5	–	–	≥ 5
GOST 31938 [6] (1)	≥ 3	≥ 3	≥ 3	≥ 3
ISO 10406:1 [7]	≥ 5	-	≥ 3	≥ 3

(1) w badaniach okresowych i badaniach typu minimum 6 próbek

niż stosowane w odniesieniu do prętów stalowych, co wynika z kruchości materiałów kompozytowych;

- metody badań stosowane w różnych rejonach świata są właściwie jednakowe, drobne różnice dotyczą głównie wymiarów próbek;
- metody badania prętów GFRP nawiązują do dobrze znanych metod odnoszących się do prętów stalowych, co jest oczywiste przy podobnym przeznaczeniu konstrukcyjnym obu typów wyrobów;
- wymagana minimalna liczba próbek jest niewielka, od 3 do 6 sztuk;

- wyniki odnoszą się zawsze tylko do pręta o określonej średnicy, a nie do materiału kompozytowego. Jest to bardzo ważne przy projektowaniu elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi.

BIBLIOGRAFIA

[1] ACI 440.3R: 2004 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures
 [2] AT/2014-02-3038 Aprobata Techniczna IBDiM Pręty kompozytowe z włókien do zbrojenia betonu, luty 2014
 [3] AT/2015-02-3140/1 Aprobata Techniczna IBDiM Pręty kompozytowe z włókien do zbrojenia betonu, marzec 2016
 [4] AT-15-9516/2015 Aprobata Techniczna ITB Pręty kompozytowe ARMASTEK do zbrojenia betonu, czerwiec 2015
 [5] CNR-DT 203:2006 Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP. Bars
 [6] GOST 31938:2012 Fiber-Reinforced Polymer Bar for Concrete Reinforcement – General Specifications
 [7] ISO 10406-1:2015 Fibre-reinforced polimer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grid
 [8] PN-EN 10080:2007 Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne
 [9] Raport Badania prętów FRP, Katedra Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. POIG.01.01.02-10-106/09-01, marzec 2012
 [10] Szumigała M., Pawłowski D., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, Przegląd Budowlany nr 3/2014, marzec 2014, str. 47-50

**Politechnika
Warszawska**

III Konferencja Naukowa Doktorantów i Młodych Naukowców
MŁODZI DLA TECHNIKI 2017
Płock, 7-8 września 2017 roku



2017
II edycja

Patroni medialni:









Dołącz do najlepszych
www.homezone.pl

Laureaci i edycji projektu:











