



# Badanie wytrzymałości na rozciąganie prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych z siatek zbrojeniowych prefabrykowanych

Mgr inż. Aleksandra Rduch, mgr inż. Łukasz Rduch, mgr inż. Michał Pitas, mgr inż. Mieczysław Kot, inż. Tomasz Hahn, tech. Karol Konopka, dr inż. Robert Cybulski, dr hab. inż. Ryszard Walentyński, prof. PŚ., Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

Pręty kompozytowe znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie. Mają nie tylko bardzo wysoką wytrzymałość, ale dzięki stosowaniu różnych rodzajów włókien i żywic mogą mieć różne właściwości dostosowane do konkretnych potrzeb. Pręty na bazie włókien szklanych mają ponadto cenę porównywalną z prętami stalowymi. Mają jednak też kilka wad, jedną z głównych jest brak możliwości łączenia prętów przez spawanie lub zgrzewanie w siatki zbrojeniowe na skalę przemysłową a więc prefabrykację siatek zbrojeniowych. Rozwiązaniem tego problemu jest wytwarzanie siatek zbrojeniowych przez łączenie włókien przed utwardzeniem żywicy. Jeden z polskich przedsiębiorców opracował

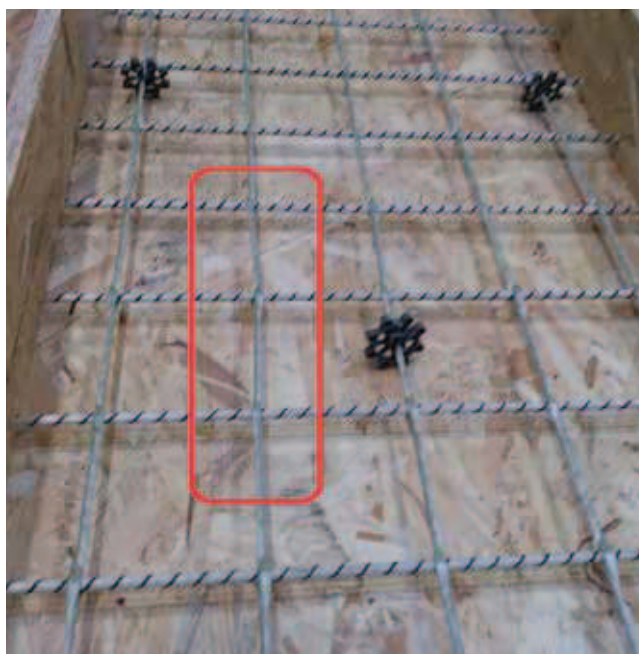


**Rys. 1.** Badane siatki w dwóch zakresach powiększenia

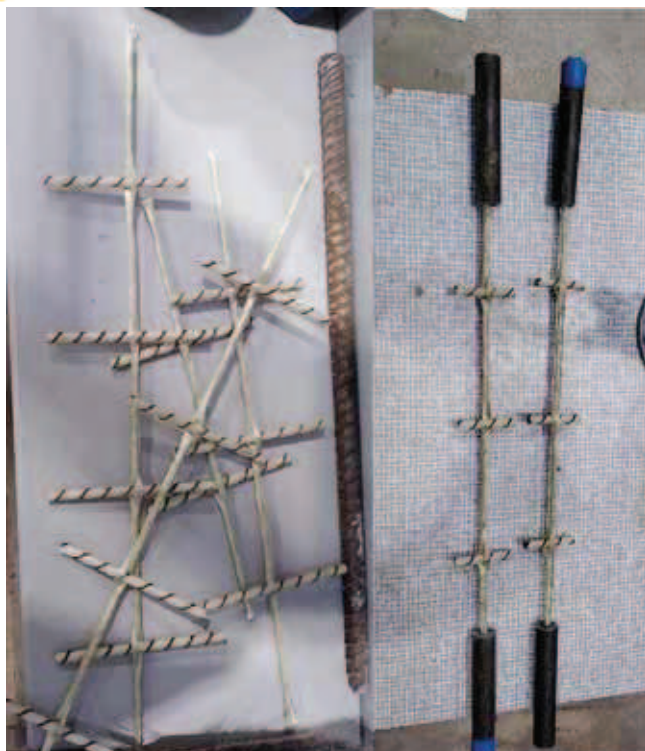
i opatentował sposób wytwarzania takich siatek na skalę przemysłową. Artykuł przedstawia badanie prętów takich siatek na rozciąganie oraz wyniki tych badań.

## 2. Próbkki do badań

Do badań dostarczono siatki o wymiarach  $1 \times 2,4$  m. W krótszym kierunku zastosowano standardowe pręty kompozytowe na bazie włókien szklanych o średnicy 6 mm w rozstawie co 10 cm, prostopadłe wykonano pręty „splatane” z włókien szklanych oplatających pręty prostopadłe, wykonanych przed utwardzeniem żywicy o średnicy nominalnej 5 mm w rozstawie co 10 cm. Z siatek wycięto próbki do badań obejmujące jeden pręt „splatany” oraz trzy pręty prostopadłe. Długość takiej próbki wynosiła 40 cm. Na końcach prętów osadzono uchwyty do zamocowania w szczękach maszyny wytrzymałościowej.



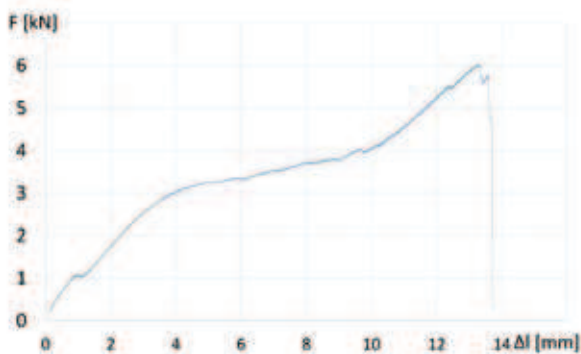
**Rys. 2.** Przykładowy fragment siatki do wycięcia



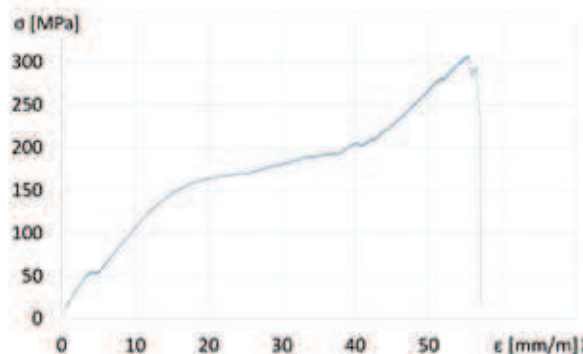
**Rys. 3.** Wycięte pręty z siatki przed zamocowaniem uchwytów i po ich umocowaniu



**Rys. 4.** Pręt poddany rozciąganiu po zerwaniu



**Rys. 5.** Wykres zależności siła – wydłużenie dla próbki nr 1



**Rys. 6.** Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla próbki nr 1

### 3. Badanie wstępne

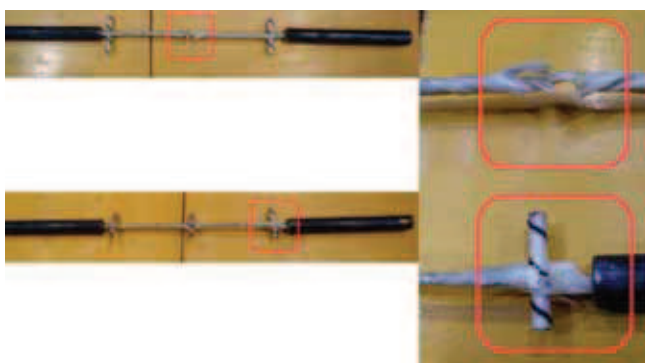
Wycięte pręty zamocowano w szczękach maszyny wytrzymałościowej ZD100 i poddano próbie rozciągania, przykładając siłę aż do momentu zniszczenia. Pręty podczas przykładania siły zaczęły się odkręcać, w trakcie zmniejszania działającej siły skręcały się z powrotem. Sąsiednie pręty poprzeczne obróciły się względem siebie na przemian w lewo i prawo o ponad 360°.

W opisany powyżej sposób rozciągnięto do zerwania jedną próbkę, oznaczono ją jako „1”. Otrzymano przedstawione w dalszej części zależności siła – wydłużenie oraz po przeliczeniu naprężenie – odkształcenie. Maksymalna siła rozciągająca przy zerwaniu wyniosła 6,06 kN, odpowiadające tej sile naprężenie wyniosło 307,1 MPa. Maksymalne wydłużenie przy zerwaniu wyniosło 13,3 mm.

Przebieg wykresu jest mocno nieliniowy, wydłużenia narastały gwałtownie po przekroczeniu naprężeń ok. 150 MPa, po przekroczeniu 200 MPa narastały znowu wyraźnie wolniej. Moduł Younga obliczony dla fazy po przekroczeniu 200 MPa wynosi 8,13 GPa. Maksymalna wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu wyniosła 303 MPa. Dla porównania wytrzymałość klasycznych prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych wytwarzanych w procesie pultruzji wynosi ok. 1200 MPa, a granica plastyczności prętów stalowych klasy AIIIIN wynosi ok. 600 MPa. Tak niska wytrzymałość na rozciąganie dyskwalifikowałaby te pręty do zastąpienia prętów stalowych. W analogiczny sposób rozciągnięto drugą próbkę, wyniki były analogiczne.



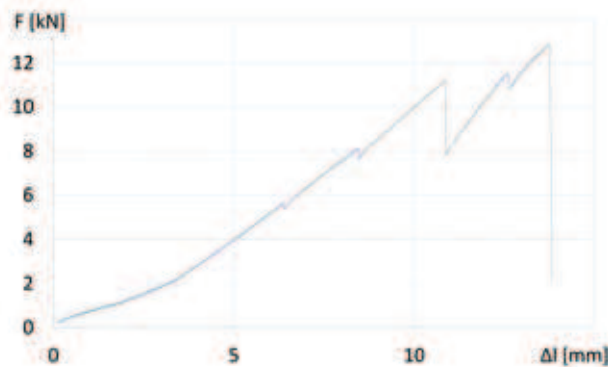
**Rys. 7.** Po lewej – szczęki po pomalowaniu na żółto, po prawej – pręt zamocowany w szczękach w maszynie wytrzymałościowej przed pomalowaniem szczęk



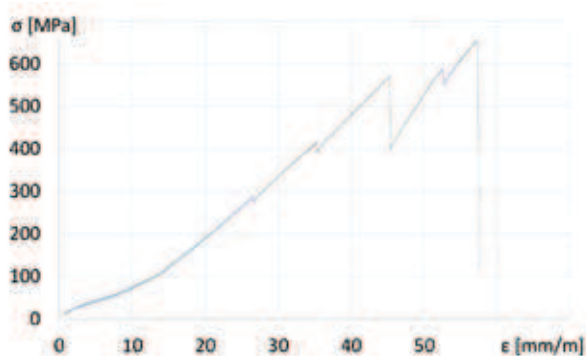
**Rys. 8.** Przykładowe pręty po zerwaniu z zaznaczonym miejscem zerwania

#### 4. Badania prętów z zablokowaną możliwością obrotu

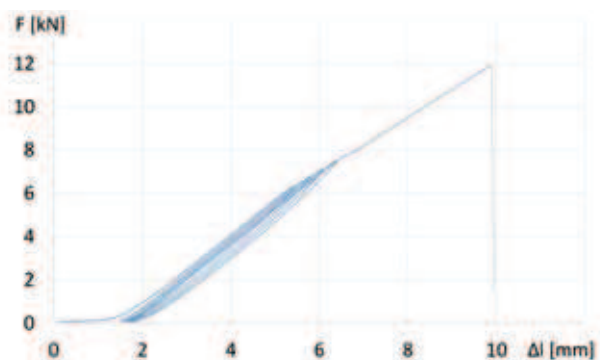
Poprzednio przedstawione wyniki otrzymano przy dużych obrotach prętów. W rzeczywistej konstrukcji pręty są fragmentami zabetonowanych siatek, a więc tak duży obrót prętów nie jest możliwy. Należało opracować sposób rozciągania prętów z zablokowaną możliwością obrotu pręta. Najbardziej zbliżonym do rzeczywistości badaniem byłoby rozciąganie zabetonowanej siatki, jednak byłoby to trudne technicznie do wykonania. Zaprojektowano i wykonano rodzaj szczęk chwytających rozciągane pręty, które przytrzymują pręty prostopadłe do pręta rozciąganego i uniemożliwiają jego obrót. Zgodnie z przewidywaniami szczęki zabezpieczyły pręty przed obrotem, co znacząco wpłynęło na ich nośność. Próbkę nr 2 rozciągnięto aż do zerwania. W próbce nr 3 wartość siły zwiększano etapami, najpierw do 1 kN po czym zmniejszono prawie do zera, kolejno do 2 kN i znów odciążono, i tak aż do osiągnięcia wartości siły niszczącej uzyskanej w próbce nr 1. Potem zwiększano wartość siły aż do zniszczenia próbki. W kolejnych



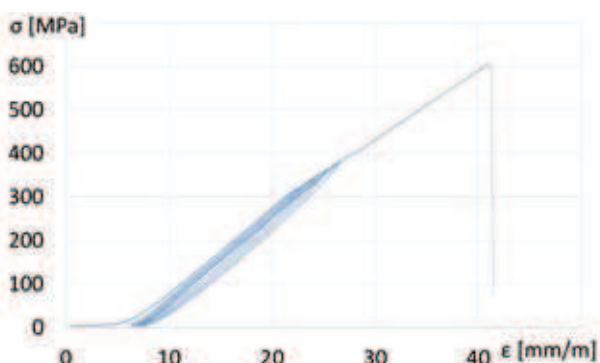
**Rys. 9.** Wykres zależności siła – wydłużenie dla próbki nr 2



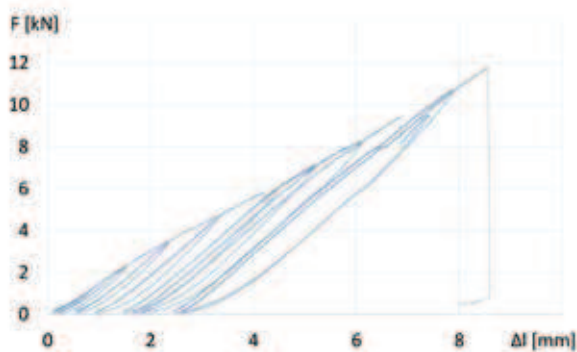
**Rys. 10.** Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla próbki nr 2



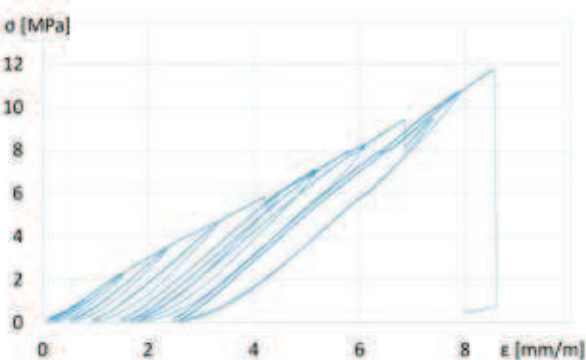
**Rys. 11.** Wykres zależności siła – wydłużenie dla próbki nr 3



**Rys. 12.** Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla próbki nr 3



**Rys. 13.** Wykres zależności siła – wydłużenie dla próbki nr 4



**Rys. 14.** Wykres zależności naprężenie – odkształcenie dla próbki nr 4

próbkach zwiększano wartość siły po 10% wartości niszczącej z badania próbki nr 3. W taki sposób przebadano 6 próbek. Pręty pękały zawsze w miejscu krzyżowania się prętów, jednak nie zawsze w miejscu tego samego pręta – środkowego lub skrajnego.

Wykresy zależności siła – wydłużenie oraz naprężenie – odkształcenie dla próbek nr 2, 3 i 4 przedstawiono na rysunkach 9–14. Wykresy dla kolejnych próbek były analogiczne do próbki nr 4.

Średnia wytrzymałość na rozciąganie wyniosła 604,2 MPa, co jest porównywalne z granicą plastyczności prętów stalowych klasy AIIIIN, jednak dalej jest o połowę niższa niż dla prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych wytwarzanych w procesie pultruzji. Dwukrotnie niższa wytrzymałość prętów ze swobodą obrotu może być spowodowana nierównomiernym wzrostem naprężeń w poszczególnych włóknach w trakcie wzrostu siły rozciągającej oraz kąta obrotu. Część włókien szybciej osiąga graniczne wartości naprężeń i ulega zerwaniu, siły wewnętrzne rozdystrybuują się na pozostałe włókna, jednak jest ich już zbyt mało, żeby te siły przenieść, przy mniejszej ilości włókien naprężenia są w nich większe przy takiej samej sile rozciągającej. Moduł Younga jest znacznie niższy niż dla stali, wynosi średnio 23,0 GPa, stal ma moduł na poziomie 200 GPa, a klasyczne pręty kompozytowe na poziomie 50 GPa. Maksymalne wartości siły rozciągającej przy zniszczeniu, maksymalne

**Tabela 1.** Wartości maksymalnych sił i naprężeń oraz modułu Younga dla poszczególnych próbek

Nr próbki	Siła [kN]	Naprężenie [MPa]	E [GPa]
1	5,96	303,83	–
2	12,85	654,88	–
3	11,91	606,84	–
4	11,78	600,08	24,42
5	11,60	591,25	25,26
6	11,25	573,13	23,95
7	10,76	548,26	20,29
8	11,76	599,27	22,33
9	13,40	682,72	21,61

naprężenia oraz moduł Younga dla ostatniego cyklu obciążenia w próbkach obciążanych cyklicznie przedstawiono w tabeli 1.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych wyciętych z siatek do zbrojenia betonu. Wytrzymałość tych prętów jest porównywalna z granicą plastyczności prętów stalowych klasy AIIIIN, jednak jest o połowę niższa niż dla prętów kompozytowych na bazie włókien szklanych wytwarzanych w procesie pultruzji. Pręty wytwarzane przez splot włókien nie mają „półki plastycznej”, podobnie jak w przypadku klasycznych prętów kompozytowych zerwanie następuje w sposób gwałtowny. Moduł Younga jest dziesięciokrotnie niższy niż dla stali zbrojeniowej i dwukrotnie niższy niż dla klasycznych prętów kompozytowych.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Castro F., Protasio & Carino N., Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars, Journal of Composites for Construction – J COMPOS CONSTR. 2. 10.1061/(ASCE)1090-0268, 2:1(17), 1998
- [2] Khan Q. S., Sheikh M., Neaz & Hadi M. N. S., Tension and compression testing of fibre reinforced polymer (FRP) bars, In Z. Wu, G. Wu & X. Wang (Eds.), Joint Conference of the 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12) & the 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures, str. 1–6, 2015
- [3] Ji-Hyun Hwang, Dong-Woo Seo, Ki-Tae Park, Young-Jun You, Experimental Study on the Mechanical Properties of FRP Bars by Hybridizing with Steel Wires, Engineering 6/2014, str. 365–373
- [4] Kocaoz S., Samaranayake V. A., Nanni A., Tensile characterization of glass FRP bars, Composites, część B 36, str. 127–134, 2005
- [5] Szymczak P., Badania fizycznych i wytrzymałościowych właściwości kompozytowych prętów zbrojeniowych w świetle norm, Przegląd budowlany 6/2017, str. 51–55
- [6] Grygo R, Kosior-Kazberuk M., Zbrojenie konstrukcji betonowych niemetalicznymi prętami kompozytowymi FRP, Civil and Environmental Engineering/Budownictwo i Inżynieria Środowiska 8/2017, str. 23–30