

dr hab inż. Janusz Juraszek, prof. ATH<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0003-3771-2776

dr inż. Hubert Walusiak<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-9745-9592

# Badania eksperymentalne modułu Younga belek ze styrobetonu z zawartością 60% regranulatu EPS zbrojonych ekologicznym materiałem odpadowym

*Experimental research of the Young's modulus of polystyrene concrete beams with 60% of EPS regranulate reinforced with ecological waste material*

DOI: 10.15199/33.2022.11.03

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań belek wykonanych ze styrobetonu zawierającego 60% regranulatu EPS (polistyren ekspandowany), który został wzmocniony ekologicznym surowcem w postaci odpowiednio przygotowanej wełny owczej. Przeprowadzono próby zginania 3-punktowego w celu wyznaczenia odkształcalności badanych elementów. Nowością jest zastosowanie specjalnie dedykowanych światłowodowych czujników odkształceń z siatką Bragga (*Fiber Bragg Grating – FBG*), które umożliwiły precyzyjne wyznaczenie wartości modułu Younga trzech rodzajów próbek wykonanych ze styrobetonu. Wprowadzenie zaprawy cementowej wraz włóknami wełny owczej w dolnej warstwie próbki styrobetonowej zwiększyło o 18,9% wartość modułu Younga w porównaniu z próbką bez wełny. Wykorzystanie włókien wełny odpadowej umożliwia skuteczne zagospodarowanie odpadów oraz zmniejszenie zużycia kruszywa naturalnego w mieszance.

**Słowa kluczowe:** budownictwo; styrobeton; wełna owcza; recykling; Fiber Bragg Grating FBG.

**Abstract.** The article presents the results of tests of beams made of polystyrene concrete containing 60% regranulate EPS (expanded polystyrene), which has been reinforced with ecological raw material in the form of properly prepared sheep wool. 3-point bending tests were carried out, and in order to determine the deformability of the tested elements, a new measurement method was used with the use of fiber-optic deformation sensors with a Bragg mesh (*Fiber Bragg Grating – FBG*). The aim of the research was to determine the value of Young's modulus for 3 variants of samples made of polystyrene concrete. The introduction of a cement mortar in the lower layer of polystyrene in the sample with sheep wool fibers increased the value of Young's modulus by 18.9% in relation to the sample without wool. The use of waste wool fibers enables effective waste management and reduction of the consumption of natural aggregate in the mix.

**Keywords:** construction; polystyrene concrete; sheep wool; recycled; Fiber Bragg Grating FBG.

Zwiększanie zawartości odpadowego granulatu styropianowego w styrobetonie zwiększa jego izolacyjność termiczną, ale jednocześnie pogarsza właściwości wytrzymałościowe. Jest to szczególnie istotne w przypadku elementów pracujących na zginanie. Na fotografii 1 przedstawiono budynek modelowy zrealizowany z wykorzystaniem elementów prefabrykowanych ze styrobetonu. Newralgicznymi miejscami są nadproża, których dolne warstwy są rozciągane. Zaproponowano wzmocnienie próbki wykonanej ze styrobetonu ekologicznym surowcem w postaci odpowiednio



**Fot. 1. Jednorodzinny budynek mieszkalny, wzniesiony z prefabrykatów ze styrobetonu**  
Photo 1. Single-family house made with the use of precast EPS concrete units

przygotowanych włókien wełny owczej. Obecnie w wielu rejonach świata wełna owcza musi być utylizowana, ponieważ spore jej ilości nie znajdują zastosowania, a tym samym staje się ona odpadem. Tematyka zastosowania wełny odpadowej we wzmocnieniu zapraw cementowych była prezentowana w wielu

publikacjach. Dotyczyła ona poprawy termoizolacyjności [1], właściwości mechanicznych [2], korelacji między właściwościami mechanicznymi, termicznymi i chemicznymi [3] oraz odporności ogniowej [4]. Ekologiczne i ekonomiczne trendy w budownictwie skłoniły do dalszych poszukiwań wykorzystania wełny np. do wzmocnienia kompozytu betonowego za pomocą odpadowych włókien owczych o długości 1, 6, i 20 mm [5], natomiast nie stosowano ich do tej pory do wzmocnienia styrobetonu. W artykule zaproponowano wzmocnienie belki wykonanej ze styrobetonu przez dodanie wełny w strefie między dolnym pasem z zaprawy cementowej a częścią ze styrobetonu. Jako graniczną wartość przyjęto proporcje składników na poziomie 60% granulatu

<sup>1)</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna w Białymstoku-Białej, Wydział Inżynierii Materiałowej, Budownictwa i Środowiska

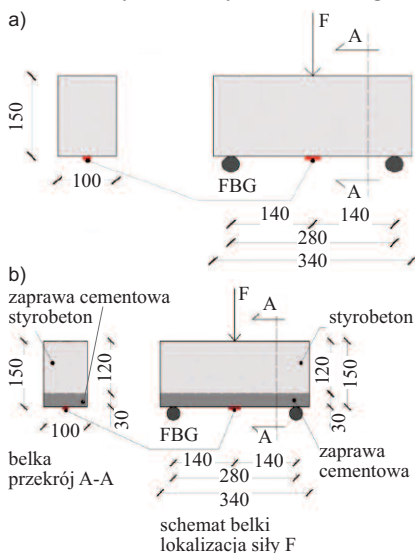
<sup>\*</sup> Adres do korespondencji: jjuraszek@ath.bielsko.pl

EPS pochodzącego z recyklingu i 40% modyfikowanej zaprawy cementowej.

Klasyczne metody wyznaczania modułu Younga ze względu na dużą odkształcalność próbek ze styrobetonu na podporach nie były możliwe do zastosowania. Do wyznaczenia rzeczywistych wartości odkształceń użyto specjalnie zaprojektowanych czujników światłowodowych z siatkami Bragga. Umożliwiają one bezpośrednie wyznaczenie odkształceń w dolnym pasie belki. Metodykę badań odkształceń konstrukcji wsporczych linii wysokiego napięcia za pomocą czujników światłowodowych opisano w [6], natomiast metodykę badań odkształceń lin w [7].

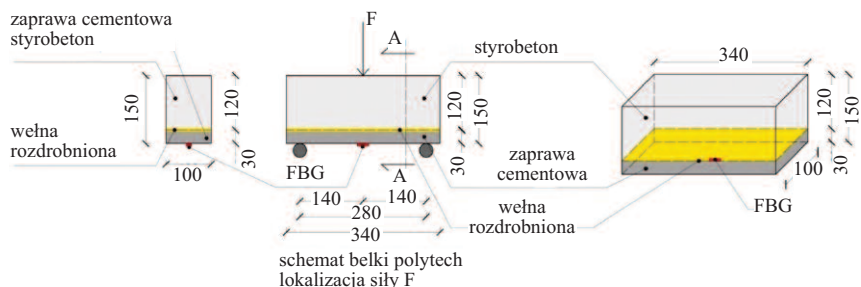
## Badania

Badano próbki prostopadłościowe o wymiarach 340 mm (długość) x 100 mm (szerokość) x 150 mm (wysokość) wykonane ze styrobetonu W1 (rysunek 1a); próbki ze styrobetonu z pasem zaprawy cementowej o grubości 30 mm w dolnej części próbki W2 (rysunek 1b) oraz próbki z pasem zaprawy cementowej wzmocnionej rozproszoną wełną W3 (rysunek 2 i fotografia 2). Próbki zbrojono wełną odpadową pozyskaną w wyniku strzyżenia owiec gór-



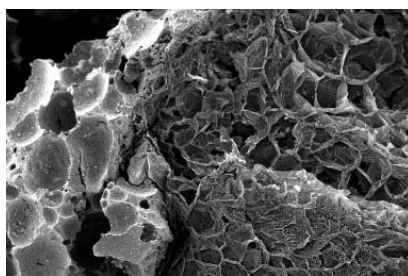
**Rys. 1. Schemat obciążenia belki: a) ze styrobetonu i lokalizacja czujnika FBG; b) ze styrobetonu wzmocnionej zaprawą cementową w dolnej części; lokalizacja czujnika FBG**

*Fig. 1. Diagram illustrating the beam loading: a) of the EPS concrete and the FBG sensor location; b) of the EPS concrete reinforced with cement mortar in the lower part; the FBG sensor location*



**Rys. 2. Schemat obciążenia belki ze styrobetonu wzmocnionej w dolnej strefie zaprawą cementową i rozdrobnioną wełną owczą oraz lokalizacja czujnika FBG**

*Fig. 2. Loading of the EPS concrete beam reinforced with cement mortar and shredded sheep wool in the lower part, and the FBG sensor location*



**Fot. 2. Próbka styrobetonowa pod mikroskopem skaningowym JEOL JSM-5500LV**  
*Photo 2. Polystyrene concrete sample taken with the JEOL JSM-5500LV scanning microscope*

skich, którą podawano do ciągu pralniczego składającego się z kilku wanien napełnionych wodą z dodatkiem środków piorących i płuczących, a następnie suszono. Wełna powstała w wyniku procesu zgrzeblenia. Średnia długość włókien zmierzonych suwmiarką noniuszową wynosiła 16,5 mm przy odchyleniu standardowym 8,15 i współczynniku zmienności 49,5% oraz dokładności pomiaru suwmiarką  $\pm 0,1$  mm, a określona pod mikroskopem (lanometr)  $20 \pm 5$   $\mu\text{m}$ . Udział objętościowy włókien wełnianych wynosił 5%. W przypadku każdego wariantu próbek przygotowano trzydzieści belek.

Badania wytrzymałościowe w postaci próby 3-punktowego zginania przeprowadzono za pomocą uniwersalnej maszyny GALDABINI Quasar 50 o klasie dokładności 0,5. Określono siłę zginającą zakresu liniowego  $F_c$  oraz największą wartość siły zginającej  $F_{\text{max}}$ , jaką przeniosła próbka. Rozstaw podpór w próbie 3-punktowego zginania wynosił 280 mm. Odkształcenia wyznaczano za pomocą czujników światłowodowych FBG zamocowanych w środku długości dolnego pasa belki. Baza pomiarowa czujnika wynosiła 5 mm. Zastosowano naciąg wstępny czujnika światłowodowego

na poziomie 500  $\mu\text{strain}$ . Dokładność pomiarowa układu wynosiła  $\pm 1,5$   $\mu\text{strain}$ . System pomiaru odkształceń składa się z interogatora optycznego S-line 800D, rejestratora, czujników SG-01 (FBG) oraz przewodu światłowodowego ze złączkami FC/APC.

Istota pomiaru polega na wyznaczeniu zmiany długości fali rozpraszającej się na siatce Bragga w zależności od odkształcenia badanego elementu. Na podstawie odkształceń określono średnią wartość modułu Younga próbki. Przeprowadzono również badania próbek z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL JSM-5500LV, po zamocowaniu ich do podstawek za pomocą krążków węglowych i napylenia złota w napylarce jonowej JEOL JFC-1200. Obraz próbki styrobetonowej przedstawiono na fotografii 2.

## Wyniki badań

Próbki ze styrobetonu przeniosły obciążenie  $4,55 \div 4,61$  kN, próbki ze styrobetonu wzmocnione zaprawą cementową w dolnej strefie obciążenie  $4,83 \div 6,15$  kN, a ze styrobetonu zawierające w dolnej strefie zaprawę cementową i rozdrobnioną wełnę obciążenie  $8,72 \div 10,06$  kN. Średnia wartość siły odpowiadającej liniowemu zakresowi zależności między siłą a odkształceniem przy liczności próbek 30 szt. w przypadku wariantu W1 wyniosła 3,08 kN przy odchyleniu standardowym 0,29 kN i błędzie standardowym 0,053, wariantu W2 – 4,83 kN przy odchyleniu standardowym 0,37 kN i błędzie 0,067, natomiast wariantu W3 – 8,72 kN przy odchyleniu standardowym 0,45 kN i błędzie 0,082. Wskazuje to, że dodatek wełny w warstwie zaprawy istotnie zwiększa wartość siły odpowiadającej

liniowemu zakresowi zależności między siłą a odkształceniem. Analizując największą średnią wartość siły zginającej przy liczebności próbek 30 w każdym wariancie, największa siła zginająca dla wariantu W1 wyniosła 4,61 kN przy odchyleniu standardowym 0,41 kN, dla wariantu W2 – 6,15 kN przy odchyleniu standardowym 0,38 kN, a wariantu W3 – 10,06 kN przy odchyleniu standardowym 0,5 kN. Wskazuje to na istotne zwiększenie wartości największej siły zginającej w przypadku próbki wzmocnionej wełną. Efekt zwiększenia nośności występuje w przypadku testu zginania 3-punktowego.

Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabeli. Zawierają one także wartości naprężeń, odkształceń oraz modułu Younga E wyznaczone na podstawie pomiaru odkształceń. Odnosząc się do prac Chen B., Fang C [8] dotyczących badań właściwości wytrzymałościowych styrobetonów, zawierały się one w przedziale od 0,4 do 1,3 MPa przy współczynniku zmienności  $6,7 \div 10,3\%$ . Pozytywny wpływ dodatku wełnianego kurzu garbarskiego o średniej długości włókien 14,3 mm na wytrzymałość betonu przedstawiono w pracach R. Alyousef. Wyznaczona doświadczalnie średnia wartość modułu E próbek ze styrobetonu o zawartości 60% EPS wynosiła 3733 MPa i świadczy o znacznej ich odkształcalności. Dodanie warstwy zaprawy w dolnej części próbki w istotny sposób poprawia odporność na odkształcenie wyrażoną wzrostem wartości modułu E do 7320 MPa. Można zauważyć znaczny wzrost średniej wartości  $F_e$  o ok. 183% w przypadku próbki wzmocnionej w pasie dolnym

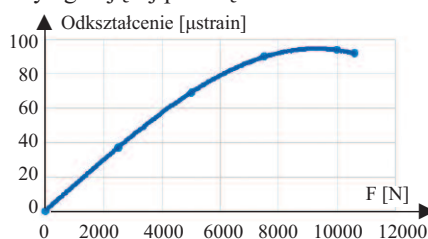
**Średnie wartości wytrzymałości na zginanie  $F_{max}$  i  $F_e$  siły odpowiadającej zakresowi proporcjonalności (liniowa zależność między obciążeniem a odkształceniem)**

Mean values of bending strength  $F_{max}$  and  $F_e$  corresponding to the range of proportionality (linear relation between load and strain)

Charakterystyka	Próbka		
	1	2	3
Średnia wartość $F_e$ [kN]	3,08	4,83	8,72
Największa wartość $F_{max}$ [kN]	4,61	6,15	10,06
Naprężenie $\sigma_e$ [MPa]	0,57	0,91	1,63
Największe naprężenie $\sigma_{max}$ [MPa]	0,81	1,14	1,87
Odształcenie [ $\mu$ strain]	100	102	93
Średni moduł Younga [MPa]	3733	7320	9032
Współczynnik zmienności modułu E [%]	11,6	7,2	6,71

zaprawą cementową z włóknami wełny w odniesieniu do wartości próbki bez wzmocnienia.

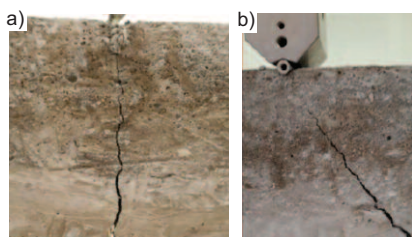
Na rysunku 3 przedstawiono wartość wyznaczonego doświadczalnie odkształcenia w zależności od wartości siły zginającej próbkę W3.



**Rys. 3. Wartość wyznaczonego doświadczalnie odkształcenia w zależności od wartości siły zginającej próbkę W3**

Fig. 3. The value of experimentally determined deformation depending on the value of the bending force of the sample W3

Przeprowadzono również analizę pęknięcia próbek. Zaobserwowano, że belki bez wełny (W1) ulegały uszkodzeniu, które było prostopadłe do dolnej płaszczyzny próbki zginanej (fotografia 3a). W przypadku próbek ze wzmocnieniem w postaci wełny w dolnej strefie rysy przebiegały pod kątem ok. 45° (fotografia 3b). Może to wskazywać na istotne znaczenie największych naprężeń stycznych, które występują pod kątem 45° do osi próbki.



**Fot. 3. Kierunek uszkodzenia belek ze styrobetonu: a) bez dodatku rozdrobnionej wełny owczej w dolnej strefie belki; b) zawierających rozdrobnioną wełnę owczą w dolnej strefie belki**

Photo 3. Direction of damage to polystyrene concrete beams without the addition of shredded sheep wool in the lower zone of the beam (a); damage direction of polystyrene concrete beams containing shredded sheep wool in the lower zone of the beam (b)

**Wnioski**

Wyznaczono rzeczywistą wartość modułu Younga trzech rodzajów próbek wykonanych ze styrobetonu. Zastosowano innowacyjną technikę bazującą na czujnikach światłowodowych FBG. Określone wartości modułu Younga są

niezbędne do prowadzenia symulacji numerycznych MES. Największą wytrzymałość w strefie rozciąganej próbki wynoszącą średnio 1,87 MPa i moduł Younga 9032 MPa osiągnięto w przypadku zastosowania rozdrobnionej wełny owczej ułożonej na podkładzie z zaprawy cementowej. Ma to istotne znaczenie w przypadku elementów budynku pracujących na zginanie, takich jak nadproża. Zastosowanie techniki światłowodowej umożliwiło wyznaczenie rzeczywistych wartości odkształceń występujących w pasie dolnym belki. Metoda ta nie jest wrażliwa na odkształcanie się materiału próbki na podporach. Dodanie rozdrobnionej wełny umożliwiło zwiększenie o 64% wytrzymałości na zginanie badanych elementów. Warto również zwrócić uwagę, że zastosowanie naturalnego materiału w postaci wełny pomoże zagospodarować ekologiczny surowiec, który do tej pory nie jest wykorzystywany.

Fotografie: H. Walusiak

**Literatura**

[1] Cardinale T, Arleo, G, Bernardo F, Feo A, De Fazio. P. Thermal and mechanical characterization of panels made by cement mortar and sheep's wool fibres. Energy Procedia. 2017; 140: 159 – 169.  
 [2] Cardinale T, Sposato C, Alba MB, Feo A, Grandizio F, Lista GF, Montesano G, De Fazio P. Energy and mechanical characterization of composite materials for building with recycled PVC. TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science. 2019; 63 (2-4): 129 – 135.  
 [3] Bouagga T, Harizi T, Sakli F, Zoccola M. Correlation between the mechanical behavior and chemical, physical and thermal characteristics of wool: a study on Tunisian wool. Journal of Natural Fibers. 2020; 17 (1): 28 – 40.  
 [4] Piña RC, Vidales BA, Serrano SR, del Río MM, Atanes SE. Analysis of fire resistance of cement mortars with mineral wool from recycling. Construction and Building Materials. 2020; 265, art. no. 120349.  
 [5] Fiore V, Di Bella G, Valenza A. Effect of Sheep Wool Fibers on Thermal Insulation and Mechanical Properties of Cement-Based Composites. Journal of Natural Fibers. 2020; 17 (10): 1532 – 1543.  
 [6] Juraszek J. Fiber Bragg Sensors on Strain Analysis of Power Transmission Lines. Materials. 2020; https://doi.org/10.3390/ma13071559.  
 [7] Juraszek J. Strain and Force Measurement in Wire Guide. Archives of Mining Sciences. 2018; 63: 321-334.  
 [8] Chen B, Liu J. Mechanical properties of EPS lightweight concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials. 2011; 164 (4): 173 – 180.

Badania opisane w tym artykule były prowadzone w ramach współpracy z firmą Akces BK Sp. z o.o.

Przyjęto do druku: 28.10.2022 r.