

# Nowy proekologiczny materiał Polytech

prof. dr hab. inż. Janusz Juraszek, dr inż. Hubert Walusiak, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

## 1. Wprowadzenie

System prefabrykacji Polytech bazuje na elementach wielkopłytowych. Wymiary paneli ściennych zależą od kształtu i wielkości budynku z uwzględnieniem maksymalnej wagi poszczególnych elementów do 1200–1300 kg/szt. Finalne gabaryty paneli ustalane są na podstawie siatki modularnej 70x70 cm.

System umożliwia wykonanie budynku o dowolnym kształcie przy zastosowaniu dodatkowych niestandardowych paneli redukcyjnych umożliwiających uzyskanie niemodularnych wymiarów. Projektowane panele mają wysokość 2,8 m, na których spoczywa wieniec żelbetowy z płytą stropową w górnej lub dolnej strefie wieńca. Odpowiednie połączenie płyty stropowej z wieńcem zwiększa możliwość kształtowania wysokości kondygnacji. Panele zewnętrzne wykonywane są jako ściana dwuwarstwowa.

Elementem nośnym i jednocześnie izolacyjnym jest panel z modyfikowanej zaprawy Polytech. Grubość części nośnej wynosi 28–30 cm. Dodatkowo w panelach ściennych główną izolację termiczną stanowi polistyren ekspandowany (EPS) o grubości 17 cm. Docelowa grubość paneli po wyprodukowaniu na linii produkcyjnej wynosi 45 cm. Panele łączone są ze sobą za pomocą profilowanych w trakcie prefabrykacji zamków. Zamki po złożeniu ze sobą tworzą szalunek tracony dla żelbetowych słupów w kształcie sześciokąta. W panelach podczas prefabrykacji zostaje umieszczona siatka, która jest połączona z kotwami wypuszczonymi z zamków w modelowym szalunku traconym słupa i tworzy trwałe połączenie. Podczas produkcji panele zewnętrzne nie są wykańczane, pozostaje konieczność wykonania warstwy zewnętrznej z siatki zatopionej w zaprawie klejowo-szpachlowej oraz wykończenie powierzchni wewnętrznych. Wykonane panele sezonuje się na terenie zakładu lub po przewiezieniu na plac budowy. Gotowe elementy są przechowywane do momentu uzyskania zakładanej wytrzymałości. Montaż odbywa się przy użyciu żurawi wieżowych szybko montujących lub za pomocą innego sprzętu dźwigowego (rys. 1).

Budowa rozpoczyna się od pierwszej kondygnacji na uformowanym i wyprofilowanym zamku na tradycyjnym fundamencie, który umożliwia ułożenie w jednej linii paneli. Słupy łącznikowe pomiędzy płytami posadawione są na ścianie fundamentowej, umożliwiając przenoszenie obciążeń z wieńca na fundament. Więźba dachowa opiera się na tradycyjnym żelbetowym wieńcu wspartym na słupach żelbetowych

i panelach Polytech [4, 5]. Właściwości czujników światłowodowych z siatką Bragga umożliwiają monitorowanie różnego typu rozwiązania konstrukcyjno-budowlane. Zaletą czujników FBG jest możliwość pomiaru w wielu punktach przy zastosowaniu odpowiedniej konfiguracji urządzeń rejestrujących dane. Sensory FBG do badania odkształceń o standardowych długościach 1–10 mm charakteryzują się czułością i rozdzielczością rzędu 1 µm. Mogą one pracować w zakresach temperatur przekraczających typowe warunki środowiskowe. Czujniki optyczne w niektórych zastosowaniach są alternatywą dla elektrooporowych. Ponieważ zamiast przewodów elektrycznych stosuje się światłowody, to sensory FBG są elektrycznie bierne, a więc odporne na zakłócenia wynikające z pola elektromagnetycznego, które może wywoływać zakłócenia w czujnikach elektrycznych [1, 2, 3].

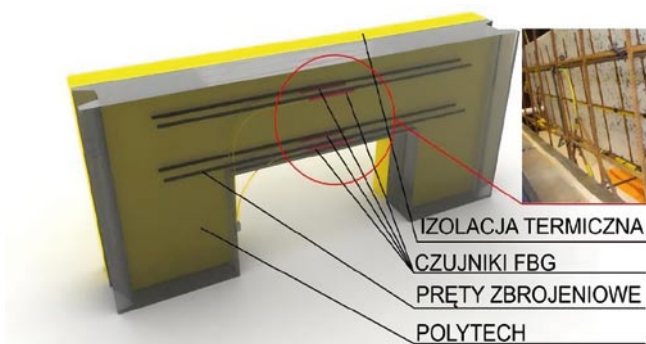
W pracy przedstawiono wyniki badań wybranego elementu budynku mieszkalnego w postaci prefabrykowanego nadproża wykonanego z materiału Polytech zamontowanego w analizowanym budynku, jak również podczas testów laboratoryjnych. Materiał zawiera modyfikowaną zaprawę cementową (40%) i polistyren ekspandowany (60%) pochodzący z recyklingu.

## 2. Monitorowanie fragmentu ściany prefabrykowanej z nadprożem

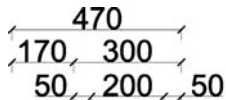
Panel ścienny z nadprożem ma długość wynoszącą 2700 mm, przy wysokości 1150 mm i szerokości 300 mm (rys. 3). Nadproże jest wzmocnione zbrojeniem wykonanym w formie siatki prętów stalowych, o średnicy 6 mm, w rozstawie co 140 mm. Nadproże na etapie jego produkcji zostało wyposażone w zatopione we wnętrzu światłowody z czujnikami FBG, umożliwiające



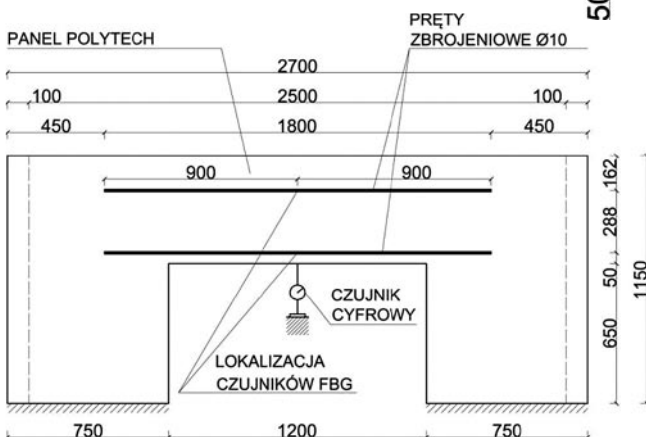
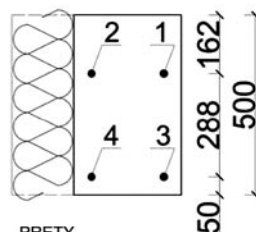
Rys. 1. Montaż przy użyciu żurawia wieżowego



Rys. 2. Obiekt badań – prefabrykowane nadproże, wykonane z materiału Polytech – model 3D



Rys. 3. Prefabrykowane nadproże, wykonane z materiału Polytech – lokalizacja prętów zbrojeniowych (przekrój, wymiarowanie w cm)



Rys. 4. Obiekt badań – prefabrykowane nadproże, wykonane z materiału Polytech – elewacja frontowa

dokonywanie pomiarów odkształcenia [3]. Dwie pary światłowodów, oznaczane jako: para 1–2, oraz para 3–4 przedstawione na rysunku 5 zamontowano do czterech prętów zbrojeniowych  $\varnothing 10$  o długości 1800 mm. Czujniki FBG umieszczono na środku długości prętów (rys. 2, 3, 4).

Przeprowadzono badania polegające na weryfikacji parametrów wytrzymałościowych prefabrykowanego nadproża z materiału Polytech. Polegały one na oddziaływaniu na prefabrykowane nadproże urządzeniem wyposażonym w cylinder hydrauliczny jednostronnego działania. Nadproże umieszczane było wewnątrz ramy urządzenia w sposób, który umożliwiał ściskanie jego górnej powierzchni. Średnica zewnętrzna cylindra wynosiła 85 mm. Powierzchnia stałowej podkładki, umieszczona pomiędzy dolną powierzchnią cylindra opuszczanego na nadproże a górną powierzchnią nadproża, wynosiła: 1800 cm<sup>2</sup> (wymiary 60x30 cm). Zdjęcie stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Obiekt badań na stanowisku badawczo-pomiarowym (urządzenie ściskające)

Nadproże obciążano, przykładając od 10 do 70 barów. Wartość siły ściskającej ustalono, biorąc pod uwagę powierzchnię tłoka ściskającego, będącego elementem wykorzystanej do eksperymentu prasy (33,2 cm<sup>2</sup>/3320 mm<sup>2</sup>) [4].

Badania polegały na obciążaniu nadproża i pomiarze odkształceń za pomocą czujników światłowodowych FBG oraz ugięcia czujnikiem cyfrowym przemieszczeń.

Plan badań obejmował trzy eksperymenty. Pierwszy eksperyment (test nr 1 i test nr 2) dotyczył pary światłowodów 1 i 2 umieszczonych w górnej części nadproża. Badanie polegało na stopniowym obciążaniu nadproża do wartości siły  $F = 13,28$  kN, a następnie odciążaniu z jednoczesnym pomiarem odkształcenia oraz ugięcia.

• **Eksperyment nr 1** – I para światłowodów (czujniki FBG na prętach nr 1 i 2).

Test nr 1: podczas prób obciążeniowych nadproża zaobserwowano, że dla największej wartości siły obciążenia  $F_{max} = 13,28$  kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi  $\epsilon = 97,22$   $\mu$ Strain. Po odciążeniu badane nadproże nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło  $\epsilon_{trw} = 12,2$   $\mu$ Strain. Natomiast pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń przedstawione na rysunku 7 wykazują dla największej wartości siły ugięcie  $f = 0,46$  mm. Podczas procesu odciążania dla siły 9,96 kN czujnik zarejestrował większe ugięcie  $f = 0,50$  mm spowodowane opóźnioną reakcją materiału. Po całkowitym odciążeniu wartość ugięcia nie powróciła do stanu początkowego ( $f = 0$  mm), lecz zatrzymała się na poziomie  $f = 0,2$  mm.

Test nr 2: kolejna próba obciążeniowa nadproża wykazała, że dla ponownie przyłożonej największej wartości siły obciążenia  $F_{max} = 13,28$  kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosiło  $\epsilon = 102,20$   $\mu$ Strain. Po odciążeniu badane nadproże nadal nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło  $\epsilon_{trw} = 14,70$   $\mu$ Strain i uległo zwiększeniu o 2,5  $\mu$ Strain. Pomiary ugięć za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń (przedstawione na rysunku 7) wykazały dla największej wartości siły ugięcie  $f = 0,41$  mm. Po odciążeniu wartość ugięcia nie powróciła do stanu

początkowego ( $f = 0$  mm), lecz zatrzymała się na poziomie  $f = 0,09$  mm. Ugięcie uległo zwiększeniu o 0,07 mm.

Test nr 2 w eksperymencie nr 1 był powtórzeniem testu nr 1. Przeprowadzono go w celu wyznaczenia niepewności pomiaru za pomocą czujnika cyfrowego ugięć i czujników FBG. Niepewność pomiaru za pomocą czujnika zegarowego przemieszczeń wyniosła 28%, natomiast przy zastosowaniu czujnika FBG tylko 4,8%. Wyniki pomiarów wykazały, iż zastosowanie czujników FBG zostało uzasadnione.

Przeprowadzone testy nr 1 i nr 2 w eksperymencie nr 1 pozytywnie wpłynęły na jakość otrzymanych wyników badań uzyskanych podczas pomiaru cyfrowym czujnikiem przemieszczeń.

Eksperyment nr 2 polegał na pomiarach odkształceń dolnego pasa nadproża czujnikami FBG umieszczonymi na prętach nr 3 i 4. Pas dolny badanego elementu jest bardziej narażony na odkształcenia, z tego powodu dalsze testy koncentrowały się na dolnej strefie prefabrykatu.

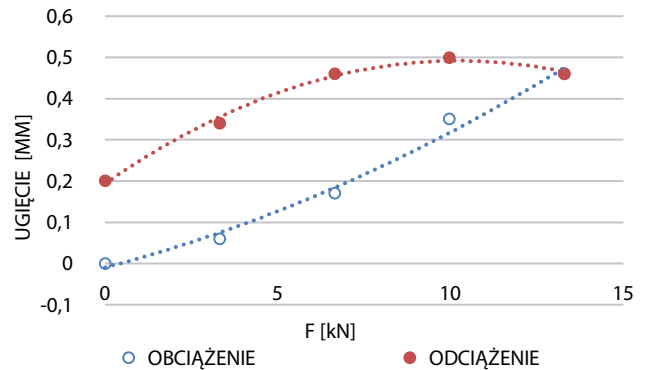
• **Eksperyment nr 2** – II para światłowodów (czujniki FBG na prętach nr 3 i 4).

Test nr 1: w czasie prób obciążeniowych nadproża stwierdzono, że dla największej wartości siły obciążenia  $F_{max} = 13,28$  kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi  $\epsilon = 62,40$   $\mu$ Strain. Po odciążeniu badane nadproże ponownie nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło  $\epsilon_{trw} = 7,70$   $\mu$ Strain. Wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń, przedstawione na rysunku 8 wykazują dla największej wartości siły ugięcie  $f = 0,37$  mm. Po odciążeniu wartość ugięcia nie powróciła do stanu początkowego ( $f = 0$  mm), zatrzymując się na poziomie  $f = 0,07$  mm. Wynik pomiarów przeprowadzonych czujnikiem cyfrowym był zbliżony do wartości odczytanych podczas eksperymentu nr 1.

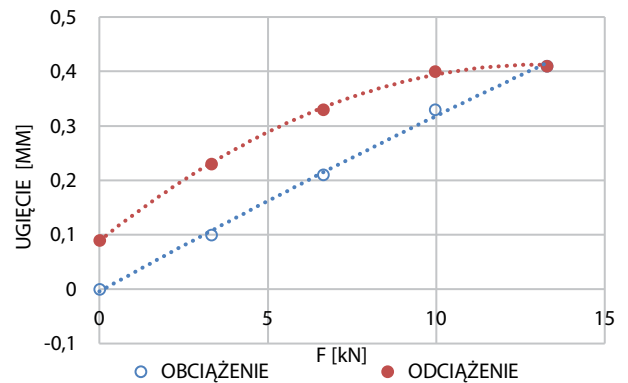
Test nr 2: następne próby obciążeniowe nadproża określają, że dla największej wartości siły obciążenia  $F_{max} = 13,28$  kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi  $\epsilon = 68,80$   $\mu$ Strain. Po odciążeniu badane nadproże nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło  $\epsilon_{trw} = 9,90$   $\mu$ Strain. Równocześnie wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń, przedstawione na rysunku 9, wykazują dla największej wartości siły ugięcie ponownie na poziomie  $f = 0,37$  mm. Po odciążeniu wartość ugięcia nie powróciła do stanu początkowego ( $f = 0$  mm), zatrzymując się na poziomie  $f = 0,06$  mm.

• **Eksperyment nr 3** – II para światłowodów (czujniki FBG na prętach nr 3 i 4).

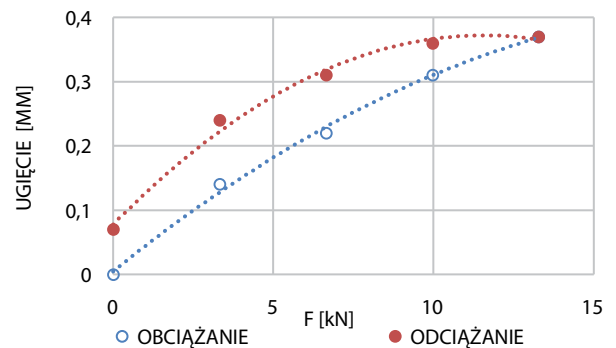
Wykonując ponownie próby obciążeniowe odnotowano, że dla największej wartości siły obciążenia  $F_{max} = 122,84$  kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi  $\epsilon = 310,80$   $\mu$ Strain. Badane nadproże uległo uszkodzeniu i po odciążeniu nie powróciło do punktu początkowego,



Rys. 6. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniami czujnika cyfrowego – eksperyment nr 1, test nr 1



Rys. 7. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniami czujnika cyfrowego – eksperyment nr 1, test nr 2

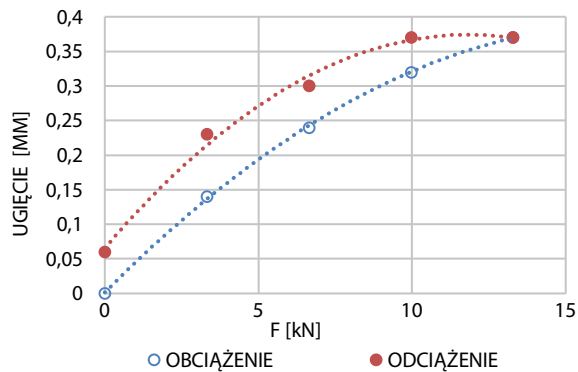


Rys. 8. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniami czujnika cyfrowego – eksperyment nr 2, test nr 1

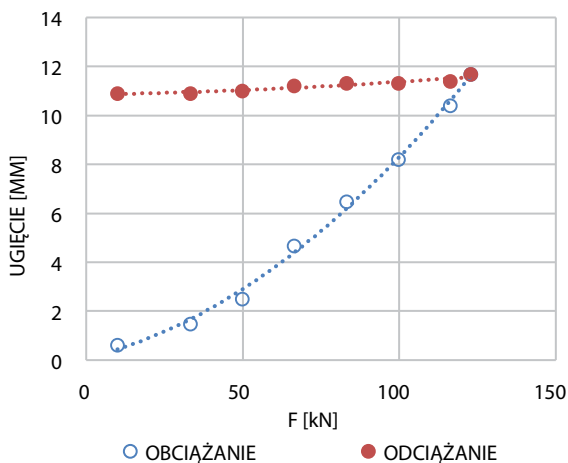
a odkształcenie trwałe wyniosło  $\epsilon_{trw} = 191,30$   $\mu$ Strain. Wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń (przedstawione na rysunku 10) wykazują dla największej wartości siły ugięcie  $f = 11,67$  mm. Po odciążeniu wartość ugięcia nie powróciła do stanu początkowego ze względu na uszkodzenie badanego elementu ( $f = 0$  mm), zatrzymując się na poziomie  $f = 10,90$  mm.

### 3. Wyniki badań

Końcowym efektem badań było zniszczenie nadproża przy ciśnieniu prasy rzędu 350–370 barów. Wystąpiły wówczas liczne pęknięcia w okolicy lewego narożnika badanego



**Rys. 9.** Zależność pomiędzy siłą ścisającą a wskazaniami czujnika cyfrowego – eksperyment nr 2, test nr 2



**Rys. 10.** Zależność pomiędzy siłą ścisającą a wskazaniami czujnika cyfrowego – eksperyment nr 3

nadproża. Skalę tych zniszczeń oraz ostateczny wygląd badanego elementu przedstawiono na rysunku 11, które zostały wykonane natychmiast po zakończeniu badania. Sprawdzone także histerezę dla czujnika cyfrowego przemieszczeń, która wyniosła 641%, a dla czujnika FBG 9%.

Przeprowadzono również pomiary odkształceń nadproża za pomocą optycznego systemu Aramis. System Aramis umożliwia rejestrację procesu rozwarcia rys



**Rys. 11.** Badany element po zniszczeniu w rezultacie przyłożenia obciążenia

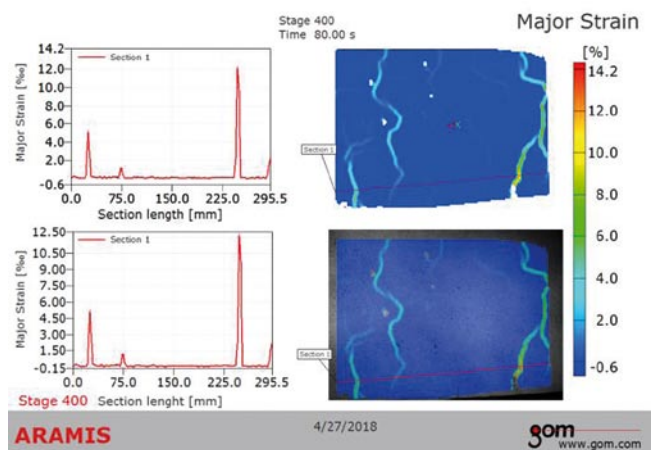
w wyniku przyłożonego obciążenia. Zarejestrowano największą wartość rozwarcia rysy wynoszącą 11,99‰ dla siły  $F = 122840$  N. Raport z systemu Aramis (rys. 12) przedstawia rozkład zmian wartości rozwarcia rys wzdłuż długości analizowanego obszaru oraz wartości odkształceń głównych wynoszących 2%.

#### 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono badania wybranego elementu domu mieszkalnego w postaci prefabrykowanego nadproża. Do przeprowadzenia testów nadproża wykonanego w systemie Polytex wykorzystano specjalistyczny sprzęt – prasę wyposażoną w oprzyrządowanie pomiarowe. Dzięki temu na każdym etapie prowadzonego eksperymentu można było precyzyjnie określić siłę oddziałującą na nadproże (od 9960 N w początkowej fazie eksperymentu do 122,840 kN w momencie ostatecznej destrukcji, jakiej w rezultacie przeprowadzonego eksperymentu uległ badany element). W nadprożu, które zostało poddane badaniom na etapie prefabrykacji, umieszczono światłowody z siatkami Bragga, do których podłączono interrogator optyczny. Przedstawiony materiał wykorzystujący odpadowy granulat EPS daje możliwość ograniczenia zużycia surowców mineralnych, a zastosowana technika monitorowania umożliwia wyznaczenie odkształceń w istotnych elementach budynku wykonanego z tego materiału.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Juraszek J., Hoisting machine brake linkage strain analysis, Archives of Mining Science tom 63, 3/2018, str. 583–597
- [2] Juraszek J., Strain and force measurement in wire guide, Archives of Mining Sciences tom 63, 3/2018, str. 21–334;
- [3] Juraszek J., The influence of the spatial structure of carbon fibers on the strength properties of a carbon composite, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 2019
- [4] Juraszek J., Residual Magnetic Field for Identification of Damage in Steel Wire Rope. Archives of Mining Science AMS tom 64, 1/2019, str. 79–92
- [5] Juraszek J., Residual Magnetic Field Non-destructive Testing of Gantry Cranes Materials 2019, 12(4), 564 Special Issue Non-destructive Testing of Materials in Civil Engineering, <https://doi.org/10.3390/ma12040564>



**Rys. 12.** Raport z systemu Aramis – rozwarcie rys badanego nadproża z materiału Polytex