

**UNIwersYTET
TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
W BYDGOSZCZY**

**WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, ARCHITEKTURY
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA**



PRACA DOKTORSKA

**Monitorowanie odkształceń wybranych węzłów
konstrukcyjnych budynku wykonanego w systemie
Polytech za pomocą światłowodów
z siatkami Bragga**

mgr inż. Hubert Walusiak

promotor: prof. ATH dr hab. inż. Janusz Juraszek

Bydgoszcz 2019

SPIS TREŚCI

SKOROWIDZ NAZW I SYMBOLI	6
SŁOWO WSTĘPNE.....	7
1. WPROWADZENIE.....	9
2. ANALIZA LITERATUROWA TEMATU PRACY.....	12
2.1 METODY POMIAROWE – POMIARY ODKSZTAŁCEŃ	12
2.1.1 TENSOMETRY STRUNOWE	12
2.1.2 TENSOMETRY ELEKTROOPOROWE	13
2.1.3 CZUJNIKI ŚWIATŁOWODOWE.....	14
2.1.4 CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA WIARYGODNOŚĆ POMIARÓW	16
2.2 ŚWIATŁOWODY OPTYCZNE	18
2.2.1 ZASTOSOWANIE ŚWIATŁOWODÓW OPTYCZNYCH.....	18
2.2.2 MONITORING ZA POMOCĄ ŚWIATŁOWODÓW Z SIATKAMI BRAGGA	20
2.3 PRAKTYCZNE PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ CZUJNIKÓW Z SIATKĄ BRAGGA	23
3. TEZA I CEL PRACY	39
3.1 SFORMUŁOWANIE TEZY PRACY	39
3.2 CEL PRACY	40
4. ZAKRES PRACY I PLAN BADAŃ	41

5. METODYKA BADAŃ	43
5.1 NORMY I STANDARDY OBOWIĄZUJĄCE W DZIEDZINIE BADAŃ CZUJNIKAMI ŚWIATŁOWODOWYMI.....	44
6. MATERIAŁ „POLYTECH” – BADANY BUDYNEK ZREALIZOWANY W SYSTEMIE „POLYTECH”.....	45
6.1 MATERIAŁ „POLYTECH”	45
6.2 ZASTOSOWANIE MODYFIKOWANEJ ZAPRAWY NA BAZIE EPS W SYSTEMIE PREFABRYKACJI „POLYTECH”	46
7. BADANIA LABORATORYJNE.....	54
7.1 MATERIAŁ „POLYTECH” – PRÓBA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE.....	54
7.2 PRÓBA ZGINANIA BELEK Z MATERIAŁU „POLYTECH”	64
7.2.1 ZGINANIE – BELKA Z CZUJNIKIEM FBG UMIESZCZONYM WEWNĄTRZ PRÓBKII „BSW”	64
7.2.2 ZGINANIE – BELKA Z MATERIAŁU „POLYTECH” Z CZUJNIKIEM FBG UMIESZCZONYM CENTRALNIE NA DOLNEJ POWIERZCHNI PRÓBKII „BSZ”	85
7.3 PREFABRYKOWANE NADPROŻE „POLYTECH” Z CZUJNIKAMI FBG – BADANIA LABORATORYJNE.....	114
7.4 PREFABRYKOWANA ŚCIANA Z NADPROŻEM W SYSTEMIE „POLYTECH” ZAMONTOWANA W BUDYNKU MODELOWYM	132
7.5 SŁUP ŻELBETOWY JAKO ŁĄCZNIK ŚCIAN PREFABRYKOWANYCH W SYSTEMIE „POLYTECH”	142

7.6 STROP ZESPOLONY ŻELBETOWY W SYSTEMIE „POLYTECH”	152
7.7 ŚCIANA PREFABRYKOWANA W SYSTEMIE „POLYTECH”	159
8. WALIDACJA	167
9. WNIOSKI.....	178
10. LITERATURA	191
11. STRESZCZENIE	
11.1 STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM	
11.2 STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM	

SKOROWIDZ NAZW I SYMBOLI

- FBG – czujnik światłowodowy z siatką Bragga z ang. Fiber Bragg Grating
(siatka jednomodowa naniesiona na światłowodowe włókno)
siatka Bragga – okresowa zmiana współczynnika załamania rdzenia światłowodu
- CFBG – czujniki światłowodowe ze zmiennie okresowymi siatkami Bragga
- OFS – czujnik światłowodowy który wykorzystuje światłowód jako element pomiarowy z ang. Optical Fiber Sensors
- μ Strain – jednostka odkształcenia 10^{-6} (mikrostrain)
- KRF – laser ekscymerowy (z ang. Krypton Fluoride Laser)
multipleksacja – budowa rozległej sieci, złożonej z dziesiątków czujników umieszczonych w pojedynczym włóknie światłowodowym
- FRP – polimer zbrojony włóknami z ang. Fiber Reinforced Polymer
- ekstensometr – przyrząd do pomiaru wydłużeń
- nm – nanometr (10^{-9})
- mJ – milidżul
- Θ – teta (miara kąta płaskiego)
- dB – decybel
- OTDR – optyczny reflektometr z ang. optical time-domain reflectometer
fluktuacja – przypadkowa zmiana
- POF – światłowody polimerowe z ang. Polymer optical fibre
- PMMA POF – światłowody skokowe
- GOF – światłowody szklane
- tensometr – czujnik, służący do pomiaru odkształceń
- piezometr – urządzenie do pomiaru poziomu wód gruntowych
- inklinometr – rodzaj przyrządu, służącego do określania kąta wychylenia
- kolimator – przyrząd przetwarzający padające światło lub strumień cząstek w równoległą wiązkę

SŁOWO WSTĘPNE

Obecnie na całym świecie obserwujemy bardzo szybki postęp technologiczny, a także gwałtowny wzrost populacji ludzkiej. Oba te czynniki mają bezpośredni wpływ na konieczność rozwoju budownictwa. Tworzenie coraz bardziej innowacyjnych i coraz większych konstrukcji jest procesem trudnym i niezwykle czasochłonnym. Wielkość tworzonych budowli jednoznacznie przekłada się na konieczność stosowania coraz bardziej rygorystycznych wymagań wytrzymałościowych, a co za tym idzie, standardów bezpieczeństwa. Jednocześnie niezmiernie istotne jest, aby długotrwała oraz nadmierna eksploatacja obiektów nie doprowadziła do ich uszkodzenia, a nawet katastrofy budowlanej. Przestrzeganie wszystkich wymienionych czynników spowodowało gwałtowny postęp w dziedzinie metod analizy stanu konstrukcji. Poszukiwanie jak najdokładniejszych sposobów monitoringu pozwoliło na powstanie pręźnie rozwijającej się techniki wykorzystującej czujniki ze światłowodami optycznymi.

Sensory te cechują się:

- niewielkim rozmiarem,
- odpornością na pola elektromagnetyczne (na ich pracę nie mają wpływu zakłócenia wynikające z pracy silników, telefonów komórkowych, nadajników radiowych czy wyładowań atmosferycznych),
- odpornością na promieniowanie jonizujące,
- możliwością przesyłania danych na duże odległości,
- możliwością umieszczenia analizatora sygnału w miejscu bezpiecznym, oddalonym od obszaru pomiaru.

Szereg tych zalet pozwala na wykorzystanie czujników w wielu dziedzinach. Warto podkreślić, iż światłowody optyczne mogą monitorować konstrukcje nie tylko w sposób rozłożony przestrzennie, ale również punktowo. Co więcej, monitorowany obszar może sięgać od kilku centymetrów do kilkudziesięciu kilometrów.

Tworzenie innowacyjnych materiałów i skomplikowanych konstrukcji jest procesem trudnym i pracochłonnym. Nowoczesne budowle dużej i małej skali, oraz materiały stosowane do ich wznoszenia, muszą spełniać coraz bardziej restrykcyjne wymagania wytrzymałościowe i odpowiednie standardy bezpieczeństwa. Uzyskanie dokładnych wyników z zakresu monitoringu konstrukcji umożliwia zastosowanie techniki wykorzystującej światłowody optyczne z czujnikami. Przedmiotowe badania obejmą system prefabrykacji budynków „POLYTECH”, który jest nowo opracowaną metodą budowy. Nowy materiał „POLYTECH”, który został zastosowany w systemie prefabrykacji składa się w 60% z granulatu EPS pochodzącego z recyklingu i w 40% z odpowiednio modyfikowanej zaprawy. Ze względu na zastosowanie innowacyjnej receptury i rozwiązań, eksperymentalny obiekt poddany został pomiarom, które miały wykazać jakie właściwości posiada budynek zrealizowany w wyżej wymienionym systemie.

1. WPROWADZENIE

W niniejszej pracy doktorskiej zaprezentowano eksperymentalną metodę monitoringu elementów konstrukcji budynku przy użyciu światłowodów z siatką Bragga. Celem wywodu jest również przybliżenie dokładnej zasady ich działania na podstawie przeprowadzonych badań. Ze względu na obszerność zagadnień związanych z tematyką światłowodów optycznych, zawartość dysertacji skupia się na najbardziej kluczowych kwestiach. Uzyskane wyniki oraz płynące z nich wnioski mogą stanowić użyteczną bazę danych, szczególnie istotną dla projektantów i producentów elementów prefabrykowanych w systemie „POLYTECH”. Prezentowana niżej rozprawa jest wynikiem kilkuletniej pracy, podczas której prowadzono szereg badań eksperymentalnych i analiz przedmiotowego systemu prefabrykacji elementów budynku.

Analizę stanu wiedzy na ten temat (rozdział drugi) podzielono na trzy części.

Pierwsza z nich (podrozdział 2.1) dotyczy metod pomiarowych i charakterystyki sensorów światłowodowych oraz ich zalet, a także związanych z nimi problemów eksploatacyjnych. Podrozdział 2.2 został w całości poświęcony światłowodom optycznym i charakterystyce czujników z siatką Bragga (czujniki FBG). Określono ich zastosowanie w pomiarach odkształceń, którym ulegają elementy konstrukcji budowlanych. Opisano również genezę powstania siatek Bragga, czyli strukturę, którą stworzono podczas prowadzonych badań światłowodu w warunkach promieniowania lasera argonowego z zakresu widzialnego. W podrozdziale 2.3 zostały opisane wybrane, praktyczne przykłady zastosowań czujników z FBG w różnych gałęziach przemysłu, a w szczególności w budownictwie.

Cel i tezę pracy określono w rozdziale trzecim, a plan badań przedstawiono w czwartym. Rozdział piąty został poświęcony metodyce badań, a podrozdział 5.1 informuje o normie i standardach obowiązujących w dziedzinie badań czujnikami światłowodowymi. W rozdziale szóstym skoncentrowano się na

materiale „POLYTECH”, a w podrozdziałach opisano zastosowanie modyfikowanej zaprawy na bazie polistyrenu ekspandowanego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”.

Część badawczą rozpoczyna rozdział siódmy. Podrozdział 7.1 zawiera dane dotyczące wytrzymałości na ściskanie materiału „POLYTECH”. Kolejną część 7.2.1 opisuje badanie belki z czujnikiem FBG (światłowodowym z siatką Bragga) umieszczonym wewnątrz próbki. W następnym podrozdziale (7.2.2) znajdują się informacje na temat kolejnego etapu badań belki z materiału „POLYTECH”, posiadającej czujnik FBG, który został umieszczony w centralnej części na dolnej powierzchni próbki. Analiza prefabrykowanego nadproża systemowego, przeznaczonego do badań na terenie zakładu prefabrykacji, została przedstawiona w podrozdziale 7.3. Monitoring prefabrykowanej ściany z nadprożem i czujnikami FBG, która została zamontowana w budynku modelowym, opisano w podrozdziale 7.4. Następnym elementem objętym monitoringiem światłowodami z siatką Bragga był słup żelbetowy, który stanowi łącznik ścian systemowych. Poszczególne etapy i wyniki badań przedmiotowego słupa opisano w podrozdziale 7.5. Istotnym elementem konstrukcyjnym w badanym budynku modelowym jest strop zespolony – zapis przeprowadzonych badań zawiera podrozdział 7.6, a wyniki analiz umożliwiły potwierdzenie zakładanej wytrzymałości tego fragmentu konstrukcji. Ważnym elementem całego systemu prefabrykacji są ściany. Badanie panelu ściennego z zastosowaniem czujnika FBG, przystosowanego do przeprowadzania pomiarów na zewnątrz badanego elementu, opisano w podrozdziale 7.7. Podczas testów czujnik FBG wykazał charakterystyczne właściwości ściany i wieńca żelbetowego.

Przeprowadzono również walidację (rozdział ósmy) elementu w postaci nadproża systemowego. Uzyskano ją przy użyciu precyzyjnego urządzenia pomiarowego – „ARAMIS”.

Ze względu na rozległy i wielowątkowy charakter niniejszej pracy, każdy z rozdziałów kończy się krótkim podsumowaniem spostrzeżeń oraz wniosków wynikających z przeprowadzonych analiz.

Rozdział dziewiąty stanowi syntetyczne podsumowanie całości dysertacji.

Rezultaty z przeprowadzonych badań stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy na temat systemu prefabrykacji „POLYTECH”. Jednocześnie posiadają one wymiar praktyczny, gdyż mogą przyczynić się do modyfikacji poszczególnych elementów konstrukcyjnych budynku. Wprowadzona innowacyjna metoda monitoringu oparta na czujnikach FBG ułatwi stałą kontrolę stanu konstrukcji i umożliwi projektowanie nowych rozwiązań systemowych.

2. ANALIZA LITERATUROWA TEMATU PRACY

2.1 METODY POMIAROWE – POMIARY ODKSZTAŁCEŃ

Pomiary odkształceń pozwalają uzyskać informacje o zmianach w konkretnych miejscach. Jak pokazuje praktyka, są one jednak trudniejsze w interpretacji, a co za tym idzie, prawidłowa ocena tych wyników następuje pewnych trudności. Podobnie jak w przypadku przemieszczeń, w systemach monitoringu konstrukcji budowlanych stosunkowo często mamy do czynienia z pomiarami odkształceń. Założyć można, że do pomiaru odkształceń mogą być wykorzystywane tensometry mechaniczne, elektrooporowe, piezoelektryczne, strunowe, czujniki magnetosprężyste i światłowodowe, przy czym nie wszystkie te rozwiązania są stosowane w systemach monitoringu [6], [10].

2.1.1 Tensometry strunowe

Jednym z najbardziej popularnych i najczęściej stosowanych w monitoringu konstrukcji rozwiązań są tensometry strunowe, w których podstawowym elementem pomiarowym jest napięta struna. Odkształcenia/naprężenia określone są na podstawie częstotliwości drgań, a pomiar polega na chwilowym wzbudzeniu do drgań struny i zbadaniu częstotliwości jej drgań ustalonych.

Tensometry tego typu często stosowane są do prowadzenia wieloletnich badań w automatycznych systemach monitorowania. Czujniki te umożliwiają przeprowadzenie pomiaru z rozdzielczością rzędu 1 μm i dokładnością do 1 promila zakresu pomiarowego, a mogą być wykorzystywane w temperaturach od -20°C do $+80^{\circ}\text{C}$. Zamknięcie czujników w obudowie sprawia, że są one niewrażliwe na działanie zakłóceń i warunków zewnętrznych. Zwykle układ pomiarowy jest wyposażony również w czujnik temperatury, mający na celu kompensację odkształceń termicznych w badanym elemencie konstrukcji.

Tensometry strunowe, oprócz licznych zalet, nie są pozbawione wad. Mają relatywnie duże rozmiary, co w przypadku montażu wewnątrz konstrukcji (np. żelbetowej) powoduje znaczące zakłócenie rozkładu odkształcenia i naprężenia wokół czujnika. Ponadto są one oddalone od powierzchni monitorowanego elementu konstrukcji o około 1-2 cm. Zasilanie elektryczne czujników i doprowadzenie/odbiór sygnału wiąże się z koniecznością okablowania. Pomimo tego sensory te są z powodzeniem stosowane do długotrwałego monitoringu odkształceń w konstrukcjach, zarówno stalowych, jak i żelbetowych [11].

2.1.2 Tensometry elektrooporowe

Kolejna grupa czujników wykorzystywanych do pomiaru odkształceń w systemach monitoringu to tensometry elektrooporowe, w których wykorzystywane jest zjawisko zmiany oporu elektrycznego drutu na skutek zmiany jego długości. Tensometry takie charakteryzują się dużą dokładnością, a co za tym idzie, możliwością pomiaru bardzo małych odkształceń. W analizie z obciążonego elementu uczestniczy cały tensometr zespolony klejem z badanym materiałem. Miejsce naklejenia tensometru musi więc być dokładnie oczyszczone, tak aby możliwe było uzyskanie właściwego zespolenia z badanym elementem. Stosowane są trzy typy tensometrów elektrooporowych: wężykowe, kratowe i foliowe.

Tensometry wężykowe wykonane są z odpowiednio ukształtowanego jednego kawałka drutu, pokrytego obustronnie bardzo cienkim papierem lub folią. Z kolei tensometry kratowe składają się z szeregu pojedynczych odcinków drutów połączonych ze sobą w obwód taśmą o większym przekroju. Jest ona wykonana z materiału o małej oporności właściwej. Natomiast tensometry foliowe wykonuje się z folii metalowej o grubości 2,5-25 μm , podobnie jak obwody drukowane. Siatkę otrzymuje się metodą fotochemiczną, bezpośrednio po naklejeniu folii na podkładkę nośną.

Obok ww. tensometrów występują także tensometry półprzewodnikowe. Tensometria elektrooporowa nadaje się do stosowania przy obciążeniach statycznych i dynamicznych oraz do elementów znajdujących się w ruchu. Tensometria elektrooporowa ma szereg zalet, które decydują o jej szerokim zastosowaniu.

Tensometry elektrooporowe są czułe, a bezpośrednie przekazywanie odkształceń na drut oporowy eliminuje błędy niedokładności wynikające np. z poślizgów mogących występować w innych rozwiązaniach. Wrażliwość na wilgoć i zmiany temperatury mogą być w znacznym stopniu wyeliminowane właściwą kompensacją. Najbardziej rozpowszechnione są tensometry elektrooporowe wykonane ze stopów miedzi i niklu (konstantan), niklu i chromu (chromonikiel albo karma) lub platyny i wolframu, jak również niklu i żelaza. Tensometry oporowe są stosunkowo często stosowanym typem czujników – można znaleźć przykłady zastosowania takich tensometrów do pomiarów w okresie nawet 10–20 lat. W takich aplikacjach niezwykle ważny jest sposób mocowania tensometrów do konstrukcji, ich obudowa oraz połączenia przewodów zasilająco-sygnałowych. Znaczna część tensometrów ulega awarii w dłuższym okresie właśnie z tych względów [12], [14], [15].

2.1.3 Czujniki światłowodowe

Kolejną grupę czujników służących do pomiaru odkształceń stanowią czujniki światłowodowe, w których podstawowym elementem jest standardowy światłowód – cienkie włókno szklane przepuszczające światło w jego rdzeniu. Na tej technologii bazują rozwiązania, takie jak: interferometry Fabry’ego-Perota (FP), siatki Bragga (FBG) i czujniki, oparte na optycznych technikach rozpraszania Rayleigha, Ramana i Brillouina.

Interferometr Fabry’ego-Perota składa się z dwóch równoległych luster oddzielonych szczeliną. Wiązki światła w czujniku interferują między tymi

lustrami, tworząc serię pików w wychodzącym widmie optycznym. W wyniku odkształcenia światłowodu zmienia się odległość między lustrami, a w konsekwencji także odstęp między pikami wynikowego widma spektralnego. Dlatego też wszelkie zmiany w rozwarości szczeliny między powierzchniami lusterek modulują sygnał wyjściowy światła. Monitorowanie zmian wyjściowych prążków interferencyjnych dostarcza więc informacji o wielkości szczeliny umieszczonej w głowicy czujnika, a w konsekwencji także jego deformacji podłużnej. Czujniki tego typu są stosowane np. do pomiaru sił naciągu lin. Siatka Bragga to krótki segment światłowodu, który dzięki wykonanej w rdzeniu światłowodu strukturze z okresową/skokową zmianą współczynnika załamania światła, odbija tylko światło o określonej długości fali – inne jej długości są przepuszczane. Siatka Bragga (FBG) jest obecnie jednym z najszerszej stosowanych urządzeń optycznych, w których zmiany temperatury albo odkształcenie światłowodu skutkują zmianą jego cech optycznych. Ponieważ czujniki FBG reagują zarówno na odkształcenie, jak i temperaturę, to do pomiaru temperatury, w celu kompensacji pomiarów odkształceń, stosuje się drugi światłowód, nieprzytwierdzony do konstrukcji. Czujniki optyczne w niektórych zastosowaniach są alternatywą dla tych elektrooporowych. Ponieważ zamiast przewodów elektrycznych (miedzianych) stosuje się światłowody szklane, to sensory FBG są elektrycznie bierne, a więc odporne na zakłócenia wynikające z pola elektromagnetycznego, które może wywoływać zakłócenia w czujnikach elektrycznych. W przeciwieństwie do systemów elektrycznych, każdy kanał optyczny może przesyłać dane z wielu sensorów FBG, co przyczynia się do zmniejszenia całego systemu pomiarowego. Czujniki FGB do badania odkształceń o standardowych długościach 1-10mm charakteryzują się czułością i rozdzielczością rzędu 1 μm . Mogą one pracować w zakresach temperatur przekraczających typowe warunki środowiskowe [17], [18].

2.1.4 Czynniki wpływające na wiarygodność pomiarów

Wykorzystywanie pomiarów odkształceń w systemach monitoringu wiąże się z pewnymi zagadnieniami dotyczącymi wiarygodności tych badań. Pierwsza kwestia to dobór odpowiedniego elementu konstrukcji i miejsca pomiaru. Ponieważ czujniki odkształceń muszą być bardzo dokładnie połączone z monitorowanymi częściami, nie wszystkie rodzaje elementów/powierzchni nadają się do takiej metody pomiaru. Problem może się pojawić np. w przypadku lin czy też elementów z powłokami ochronnymi, których ze względów technicznych i gwarancyjnych nie można naruszyć. W takich przypadkach pozostaje stosowanie obejm, które nie gwarantują trwałości i stabilności mocowania.

Druga kwestia to precyzja wskazań samych czujników. Z doświadczeń związanych z badaniami laboratoryjnymi wynika, że np. tensometry elektrooporowe nie zachowują stabilności w dłuższych okresach. Kolejna kwestia to usytuowanie czujnika w konkretnym miejscu monitorowanego przekroju [19]. Większość stosowanych w konstrukcjach stalowych przekrojów ma złożone kształty i znaczne wymiary, a jednocześnie występują w nich złożone układy sił wewnętrznych: siły podłużne, momenty zginające w różnych płaszczyznach, momenty skręcające, siły poprzeczne. To z kolei skutkuje trudnym do mierzenia, złożonym stanem naprężeń. Ponadto część sił wewnętrznych, w szczególności momenty skręcające i drugorzędne momenty zginające, jest wywołana trudnym do przewidzenia i uwzględnienia zachowaniem się elementów, jak np. skręcanie dźwigarów, nierównomierne obciążenie sąsiadujących części, nierównomierny wpływ temperatury, imperfekcje itp. Siły te wpływają na naprężenia w przekrojach, a jednocześnie są praktycznie niemożliwe do ustalenia, co oznacza, że ich wpływ na wynik pomiarów odkształceń jest także praktycznie niemożliwy do określenia. Dodatkowo, może pojawić się kwestia lokalnych sił wewnętrznych,

wynikających np. z użytkowania obiektu i punktowych podwieszeń do konstrukcji. Na to wszystko nakłada się jeszcze kwestia pewnej, od 1 do 2 centymetrowej odległości od monitorowanej powierzchni czujników strunowych, często stosowanych w systemach monitoringu [20]. Doświadczenia wskazują, że w przypadku czujników odkształceń niezwykle ważny jest wybór miejsca przekroju, w którym są one mocowane – niewłaściwe usytuowanie czujników może skutkować błędnymi i niewiarygodnymi wynikami.

Doświadczenia bazujące na pomiarach odkształceń dotyczących systemów monitoringu wskazują, że występują problemy z interpretacją wyników pomiarów i ich wiarygodnością. W przypadku badań odkształceń za pomocą czujników istotne znaczenie ma też temperatura. Tu jednak problem jest częściowo rozwiązany przez producentów sensorów – w przypadku najczęściej stosowanych rozwiązań, stosowane są wbudowane kompensacje temperatury. Czujniki odkształceń muszą być bardzo dokładnie połączone z monitorowanymi elementami, bowiem nie wszystkie rodzaje elementów/powierzchni nadają się do takiej metody pomiaru. Zagadnieniem, które nadal pozostaje do wyjaśnienia, jest kwestia niejednorodności modułu sprężystości podłużnej różnych stali – uwzględnienie wpływu tego czynnika na wyniki pomiarów wymaga praktycznego przeprowadzenia obciążeń próbnych i kalibracji czujników. Istnieje jeszcze kwestia niejednorodności współczynnika rozszerzalności termicznej, którego wartość zależy od wielu czynników – najważniejsze z nich to różnice w składzie chemicznym oraz temperatura, przy której realizowany jest pomiar [21]. Wpływ tej niejednorodności na wyniki pomiarów jest znaczący w przypadku konstrukcji o silnych ograniczeniach swobody odkształceń. Szczególnie narażony jest on na znaczne zmiany temperatury – w przypadku typowych konstrukcji budowlanych, ramowych i kratownicowych jest on praktycznie pomijalny.

2.2. ŚWIATŁOWODY OPTYCZNE

2.2.1 ZASTOSOWANIE ŚWIATŁOWODÓW OPTYCZNYCH

Technologie światłowodowe zrewolucjonizowały wiele obszarów naszego życia. Dzięki tym cienkim, szklanym włóknom możemy przesyłać bardzo duże ilości danych na znaczne odległości. Światłowody są przy tym odporne na zakłócenia elektromagnetyczne i na wiele bodźców fizycznych, dlatego też są tak często wykorzystywane w telekomunikacji. Wyjątkowe właściwości światłowodów sprawiają, że możemy z nich tworzyć także specjalistyczne sensory. Wypalając na nich tzw. siatki Bragga można sprawić, że włókna te zaczynają odbijać światło o wybranej długości fali, a pozostałe przepuszczać. Na tym opiera się zasada działania sensorów FBG. Czujniki te mogą mierzyć m.in. załamanie światła, poziom cieczy, zasolenie, stężenie cukru i innych roztworów. Ich właściwości można też wykorzystywać do pomiaru oddziaływań fizycznych, np. naprężenia. Co także ważne, siatka Bragga zajmuje ok. 1 cm długości światłowodu. Czujniki oparte na wykorzystaniu takich włókien mogą być zatem niewielkie. Sensory FBG są też odporne na niskie temperatury i mechaniczne uszkodzenia. Mogą działać w środowisku wodnym, z agresywnymi zanieczyszczeniami oraz w wielu innych, także nieprzyjaznych miejscach [23]. Dzięki nim można monitorować warunki panujące w każdym zakładzie produkcyjnym oraz w czasie transportu gotowych produktów lub surowców.

Wytwarzanie sensorów z światłowodową siatką Bragga nie jest jednak łatwe. Wymaga specjalistycznej wiedzy, umiejętności i wysokiej klasy sprzętu. Budowa światłowodu opiera się na konstrukcji optycznej, która przenosi falę elektromagnetyczną za pomocą drogi wielokrotnych odbić. Sensor ten składa się z dwóch podstawowych elementów. Pierwszym jest włókno światłowodowe składające się z rdzenia, którego średnica waha się, w zależności od światłowodu, w przedziale od 5 do 50 mikrometrów. W większości przypadków materiałem

wykorzystanym do jego wytworzenia jest szkło kwarcowe. Drugi istotny element to płaszcz o średnicy mierzącej maksymalnie do 125 mikrometrów [35]. Płaszcz wykonany jest z materiału o niższym współczynniku załamania światła niż materiał rdzenia. Całość obudowana jest pokryciem, które składa się z jednej lub dwóch warstw wykonanych z elastycznego materiału. Łączna średnica może sięgać nawet do 250 mikrometrów. Zadaniem pokrycia jest ochrona płaszcza i rdzenia przed jakimikolwiek uszkodzeniami, w tym mikropęknięciami [4] [5].

Dwoma podstawowymi rodzajami czujników wykorzystywanych obecnie do monitoringu są czujniki wykorzystujące reflektometry Brillouina, a także światłowody z siatką Bragga.

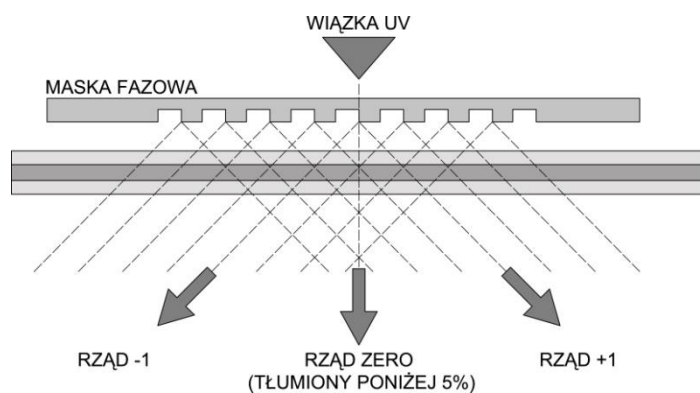
Sensory Brillouina wykorzystywane są przy pomiarach temperatur i odkształceń na całej ich długości, a czujniki z siatką Bragga stosuje się do pomiaru odkształceń *quasi-rozłożonych* [7].

2.2.2 MONITORING ZA POMOCĄ ŚWIATŁOWODÓW Z SIATKAMI BRAGGA

Siatka Bragga wykonywana jest na rdzeniu włókna optycznego wskutek oświetlenia go światłem ultrafioletowym pochodzącym z laserów ekcymentrowych: ArF (*argon fluoride laser*) o długości fali 193nm lub KrF (*krypton fluoride laser*) o długości fali 248nm, oraz energiach impulsu rzędu 100 mJ. Ich główną zaletą jest powodowanie dużych miejscowych zmian współczynnika załamania. Dodatkowo są one bardzo wydajne, potrafią szybko nanosić siatki na włókno. Ich wadą jest jednak mała spójność wiązki. Istnieje jednak alternatywne rozwiązanie w postaci lasera argonowego o długości fali 244 nm. Jego największymi zaletami jest uzyskiwanie doskonałej spójności wiązki światła oraz duża stabilność w długich okresach czasu. Niestety, jest on o wiele mniej wydajny i nadaje się jedynie do małych serii produkcyjnych lub prac badawczych. Główną wadą tego lasera jest bowiem jego niewielka moc w ultrafiolecie [1] [2].

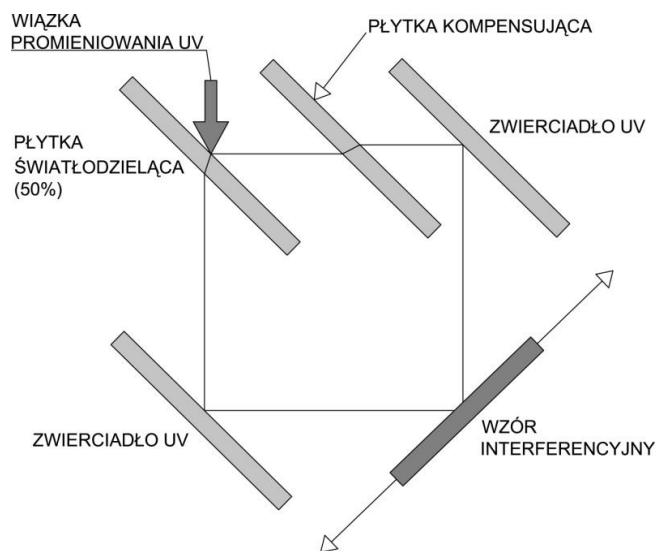
Siatka Bragga ma strukturę periodyczną, która jest okresową zmianą współczynnika załamania światła. Do wywołania takiej struktury potrzebne jest dodatkowe naświetlenie wiązką światła o periodycznie zmiennym natężeniu wzdłuż włókna, co można uzyskać poprzez wykorzystanie trzech metod.

Pierwszą z nich jest tzw. maska fazowa (rys. 2.1) będąca specjalną siatką dyfrakcyjną wykonaną na szklanej płytce. Przez nią właśnie przepuszczane jest światło lasera, które powoduje powstanie siatki. Maską tą jest swego rodzaju stemplem, umożliwiającym wielokrotne wykonanie siatki o identycznych parametrach [36]. Dla każdej innej długości fali jest potrzebna inna nowa maska.



Rys. 2.1. Maska fazowa

Drugim sposobem jest wykorzystanie techniki interferometrycznej (rys. 2.2). W technice tej wiązka lasera dzielona jest na pół, a następnie odbija się od zwierciadeł tworząc periodyczny układ prążków interferencyjnych w rdzeniu światłowodu. Zmiana położenia i obrót zwierciadeł pozwalają na zmianę okresu siatki. Metoda ta pozwala nam na uzyskanie siatek o dowolnych długościach fal.



Rys. 2.2. Technika interferometryczna

Trzecią, a zarazem najrzadziej stosowaną metodą, jest punktowe nanoszenie siatek prążek po prążku. Potrzebne są jednak do tego niezwykle

precyzyjne stoliki przesuwne. Sposób ten pozwala nam uzyskać siatki o dowolnym natężeniu, rozkładzie czy odległości prążków [1], [43].

Powstała siatka może mieć długość od 1 mm do nawet kilku centymetrów i działać jak filtr. Jej kolejne prążki odbijają jedynie światło o określonej częstotliwości fali, takiej samej jak siatka, a pozostałe światło zostaje całkowicie przepuszczone [7], [49].

Obecnie, rozróżnia się wiele rodzajów siatek Bragga, z czego najczęściej stosowanymi są:

- siatki jednorodne - FBG (*z ang. fiber Bragg gratings*),
- siatki długookresowe - LPG (*z ang. Long Period Gratings*),
- siatki ukośne - TFBG (*z ang. titled fiber Bragg gratings*),
- siatki z chirpem - CFBG (*z ang. chirped fiber Bragg gratings*).

Ze względu na swoje unikalne właściwości filtrujące oraz łatwość łączenia ich z torami transmisyjnymi, światłowody z siatka Bragga mają bardzo wiele zastosowań i stają się coraz bardziej popularne.

Jako przykłady zastosowania należy wyróżnić:

- eksperymentalna analiza odkształceń i badania wytrzymałości,
- konstrukcje żelbetowe,
- testowanie w lotnictwie,
- testowanie w przemyśle motoryzacyjnym,
- testowanie w kolejnictwie,
- geotechnologia,
- monitorowanie zboczy,
- wyznaczanie statycznych stanów obciążeń,
- wyznaczanie dynamicznych stanów obciążeń,
- monitoring odkształceń w rurociągach,
- monitoring w fazie budowy konstrukcji,
- monitoring istniejących konstrukcji w czasie ich użytkowania [50].

2.3 PRAKTYCZNE PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ CZUJNIKÓW Z SIATKĄ BRAGGA

Obecnie stosuje się i analizuje wiele systemów monitorowania stanu technicznego różnego typu obiektów, aby sprawdzić niezawodność konkretnych rozwiązań na poszczególnych etapach ich użytkowania. W niniejszym przeglądzie przedstawiono osiągnięcia w dziedzinie czujników opracowanych w celu kontroli istotnych parametrów badanych elementów. Wieloletnie badania włókien światłowodowych umożliwiły opracowanie i wdrożenie do produkcji specjalistycznych czujników na bazie światłowodów z siatkami Bragga do określonych zastosowań. Przykładowo czujnik typu SmartFBG zbudowany jest z jednomodowego światłowodu, można montować go na powierzchniach lub wtapiać w kompozyt. Pracujący czujnik odbija wiązkę światła o długości fali wprost proporcjonalną do zmian temperatury i odkształceń na światłowodzie – informacje o tej zmianie odczytywane są za pomocą interrogatora. Czujnik SmartFBG jest odporny na interferencje wywołane przez zakłócenia elektrostatyczne lub źródła częstotliwości radiowych. Czujniki tego rodzaju można łączyć ze sobą w dowolnej ilości. W ten sposób można utworzyć siatkę czujników monitorującą duże struktury. Dodatkowo może być wykorzystywany w charakterze rdzenia dla bardziej zaawansowanych technologicznie czujników [51].

Inny typ sensora o nazwie SmartPatch jest umieszczony w polimerowej, elastycznej łątce. Można go używać wielokrotnie i montować przy pomocy kleju na zasadniczo każdej powierzchni. Stosowany jest głównie do monitoringu masztów, kadłubów statków, turbin wiatrowych oraz konstrukcji betonowych. Podobnie jak poprzedni model jest odporny na interferencje i umożliwia utworzenie siatki czujników np. w formie rozety. Ponadto, jak każdy czujnik światłowodowy z siatką Bragga, nie wymaga kalibracji [52].

Do monitorowania stalowych konstrukcji opracowano sensor o nazwie

SmartWeld. Czujniki tego rodzaju umieszczane są w cienkich, metalowych płytach, dzięki czemu możliwe jest przyspawanie ich. Do konstrukcji tych zaliczamy między innymi mosty, obiekty budowlane ze stali, kratownice, a także szeroki zakres urządzeń górniczych, wiertniczych. Wykorzystuje się je więc wszędzie tam, gdzie metalowa konstrukcja musi pracować w trudnych warunkach środowiskowych. Przyspawanie zapewnia długotrwałe i odporne na deformacje połączenie czujnika z powierzchnią. Sensory są stabilne, odporne na interferencje i nie wymagają zewnętrznego zasilania. Ich obudowa wykonana jest z hermetycznej, nierdzewnej stali, dzięki czemu mogą być z powodzeniem wykorzystywane w najtrudniejszych warunkach środowiskowych.

Charakteryzują się ponadto wysoką odpornością zmęczeniową [6], [53]. Naukowcom z Akademii Techniczno-Humanistycznej udało się opracować innowacyjny system monitorowania konstrukcji mostowych bazujący na czujnikach światłowodowych. W badaniach zastosowano sensory światłowodowe FBG, które zamocowano do wieszaków mostowych. Pomiaru odkształcenia tych elementów dokonywano podczas próbnego obciążenia statycznego mostu. Uzyskane wartości odkształceń zamieniono w wartości sił osiowych w badanych elementach [3], [58].

Czujniki skonstruowane na bazie włókien światłowodowych znalazły zastosowanie w robotyce wykorzystywanej do konstrukcji mechanizmów chwytu. Użycie robotów w różnych środowiskach pracy zależy w dużej mierze od ich możliwości czuciowych. O potrzebach w tej dziedzinie świadczą różne warunki pracy, jakie roboty mogą napotkać w przemyśle, w przestrzeni kosmicznej, pod powierzchnią oceanu i w innych środowiskach. Nowoczesne czujniki światłowodowe błyskawicznie wykrywają zagrożenia biologiczne i chemiczne lub sygnalizują uszkodzenie materiałów konstrukcyjnych. O ich wyjątkowych właściwościach decydują powłoki nanowarstwy. W ostatnich latach znacznie wzrosło zapotrzebowanie na czujniki umożliwiające wczesne wykrywanie zagrożeń cywilizacyjnych pochodzenia biologicznego,

chemicznego oraz takich, które szybko wykryją uszkodzenia materiałów konstrukcyjnych i budowlanych. Światłowody są nie tylko lekkie, kompaktowe i bezpieczne dla użytkownika. Oprócz tego transmisja światła w światłowodzie jest niewrażliwa na zakłócające pola elektromagnetyczne, co jest szczególnie istotne w środowisku przemysłowym. Z kolei czujniki światłowodowe można z powodzeniem stosować w trudnodostępnych miejscach, gdzie panuje wysoka temperatura lub ciśnienie. Do zalet należy dodać również zdolność do ciągłej, jakościowej i ilościowej, analizy zmian wielu parametrów otoczenia, wysoką czułość oraz długookresową niezawodność [54].

Obecnie na Politechnice Warszawskiej prowadzone są badania, których celem jest opracowanie zarówno odpowiedniej technologii wytwarzania warstw na potrzeby niezawodnych czujników światłowodowych, jak i samych konstrukcji tych czujników. Warstwy, którymi pokrywane są czujniki światłowodowe, pozwalają zainicjować lub podwyższyć czułość na wybrany czynnik, a także obniżyć wpływ innych czynników na uzyskiwany sygnał pomiarowy. Są one zazwyczaj bardzo cienkie, ich grubość sięga kilkudziesięciu nanometrów. Niektóre z nich mają porowatą strukturę, która pozwala na wnikanie molekuł mniejszych niż pory, również osiągające rozmiary nanometrów. Nanowarstwy mogą sprzyjać przyłączaniu się do czujnika białek, wirusów czy bakterii. Dzięki temu czujnik może zidentyfikować pojawiające się w danym miejscu szkodliwe dla człowieka czynniki pochodzenia biologicznego. Nanowarstwy mogą także modyfikować odpowiedź czujników światłowodowych wbudowanych w materiały konstrukcyjne. Deformacja takich materiałów, bądź w skrajnym przypadku ich uszkodzenie, powoduje zmianę naprężenia lub ugięcia czujnika, która silnie wpływa na jego sygnał wyjściowy. Dzięki temu czujnik szybko informuje o nawet najdrobniejszych pęknięciach, które pojawiają się w monitorowanej konstrukcji [57].

W pierwszej dekadzie XXI w. prowadzono badania laboratoryjne, których celem było opracowanie nowej technologii pomiarowej, opartej o czujniki

światłowodowe. Przeprowadzone badania w zakresie wykorzystania światłowodów w pomiarach inżynierskich koncentrowały swoją uwagę na czynnikach, takich jak: zapewnienie odpowiedniej przyczepności w celu wiarygodnego przeniesienia odkształceń z elementu konstrukcyjnego na włókno pomiarowe, możliwości identyfikowania uszkodzeń konstrukcji (np. zarysowań), kompensacji termicznej uzyskiwanych wyników, zabezpieczenia mechanicznego czujników i wielu innych [26].

Pionierem współczesnych systemów monitoringu budowli był inteligentny czujnik, zwany prętem FRP – OFBG, wykorzystujący zalety kompozytów oraz światłowodów z siatką Bragga. W ramach przeprowadzonych badań czujniki światłowodowe zatopiono w dwunastu żelbetowych belkach obciążanych następnie w teście czteropunktowego zginania. Podczas analiz zaproponowano zwiększenie przyczepności pręta pomiarowego do betonu oraz dodanie ziaren pisaku lub spiralnego oplotu na uprzednio zatopiony w żywicy pręt. Pomiaru weryfikowano referencyjnymi ekstensometrami, mocowanymi do powierzchni belek. Skorelowanie wyników z obu rodzajów czujników umożliwiło określenie miejsca i czasu powstania rysy [27].

W ramach laboratoryjnych badań wykonano belkę żelbetową wyposażoną w czujniki światłowodowe, która obciążana była stopniowo w czteropunktowym teście zginania. Rozkład odkształceń odpowiadał spodziewanemu, trapezowemu przebiegowi momentów zginających, zarówno na dolnej, jak i na górnej powierzchni elementu. Na kolejnych etapach badania obserwowano odkształcenia oraz momenty i miejsca powstawania zarysowania. Największa wartość odkształceń po stronie rozciąganej, mniej więcej na środku rozpiętości belki, odpowiadała powstaniu pierwszej rysy o największej szerokości rozwarcia. Kształt wykresu w miejscu powstania rysy wiąże się z mechaniczną odpowiedzią układu włókno-klej, podczas rejestrowania „otwarcia rysy” w betonie przez czujnik, poprzez naprężenia poprzeczne w powłoce włókna światłowodowego sensora. Zjawisko to zależy od geometrii i wytrzymałościowych właściwości

materiałów włókna światłowodowego oraz kleju. Opisany system charakteryzuje się dużym potencjałem w zakresie wykrywania i lokalizowania zarysowań w betonie już we wczesnej fazie obciążenia, kiedy mikro zarysowania są nie widoczne jeszcze gołym okiem [29], [59].

W Europie opracowano czujnik światłowodowy realizujący pomiary ciągłe odkształceń wewnątrz betonu. Zaproponowano kompozytową osłonę światłowodu wyprofilowaną na kształt fali, aby zapewnić skuteczne zespolenie czujnika z otaczającym go betonem. Sztywność obudowy światłowodu została dobrana w taki sposób, aby była zbliżona do sztywności betonu, dzięki czemu zminimalizowano powstawanie lokalnych koncentracji naprężeń. Odpowiednie ukształtowanie osłony rdzenia światłowodowego umożliwiło wykonanie symetrycznych pomiarów – zarówno po stronie rozciągania, jak i ściskania [28].

Infrastruktura budowlana we wszystkich krajach składa się z wielu starych budynków i obiektów inżynierskich – wież, mostów, tuneli, zapór lub innych form zabudowy, które wymagają cyklicznych kontroli stanu technicznego, w celu określenia bezpieczeństwa ich użytkowania [26]. Badania makroskopowe, inspekcje wykonywane przez inżynierów, powinny być wspierane przez okresowe lub ciągłe badania diagnostyczne. W przypadku obiektów o szczególnym znaczeniu zalecane jest ciągłe analizowanie stanu wyężenia istotnych elementów konstrukcyjnych. Wczesne i precyzyjne wykrycie uszkodzeń pozwala na prewencyjne działania naprawcze. System ciągłego monitoringu technicznego umożliwia znaczne wydłużenie okresu eksploatacji obiektu. Praktyczne doświadczenia inżynierskie wykazały, że odpowiednimi urządzeniami, które kwalifikują się do monitoringu, są światłowodowe czujniki FBG [25].

W obiektach budowlanych stosuje się czujniki optoelektroniczne do monitorowania odkształceń i temperatur konstrukcji. Są nimi systemy pomiarowe bazujące na czujnikach Bragga i Fabry-Perot'a [12]. Konieczność instalowania w budynkach tego typu systemów wynika także z obowiązujących

przepisów w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12.03.2009 roku zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dodano wzmiankę o powinności monitorowania budynków, w których może przebywać znaczna liczba osób. W § 204 przytoczonego aktu prawnego dodano ust. 7 o następującej treści:

Budynki użyteczności publicznej, z pomieszczeniami przeznaczonymi do przebywania znacznej liczby osób, takie jak: hale widowiskowe, sportowe, wystawowe, targowe, handlowe, dworcowe, powinny być wyposażone, w zależności od potrzeb, w urządzenia do stałej kontroli parametrów istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji, takich jak: przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w konstrukcji [13], [25].

Systemy monitoringu konstrukcji kubaturowych i inżynierskich stosowane są w celu podniesienia bezpieczeństwa ich użytkowania. W celu obniżenia kosztów związanych z odśnieżaniem (zarówno usuwania śniegu, jak też kosztów napraw pokrycia dachowego po odśnieżaniu) w warunkach obciążenia śniegiem stosuje się systemy do oceny bezpieczeństwa użytkowania. W 2009 roku w Polsce wprowadzono prawne zalecenie stosowania monitoringu konstrukcji w budynkach użytku publicznego. W krajach skandynawskich systemy monitorujące obciążenia śniegiem stosuje się standardowo. [22], [40].

Kolejnym przykładem zastosowania światłowodowych czujników FBG do monitorowania ważnego, użytkowanego przez liczną grupę osób, obiektu budowlanego jest Stadion „Legii” w Warszawie, przy ul. Łazienkowskiej 3. Jest to nowoczesna konstrukcja, wzniesiona w miejscu starego stadionu z 1930 roku. Zakończenie budowy i oficjalne otwarcie nowego stadionu miało miejsce wiosną 2011 roku. Nowy stadion ma pojemność 31 203 miejsc siedzących, dodatkowo przy jego trybunie północnej zlokalizowany jest dwukondygnacyjny parking, oferujący 979 miejsc postojowych dla samochodów osobowych. Opracowanie i wdrożenie w przedmiotowym obiekcie nowoczesnego systemu monitorowania

obciążeń i deformacji elementu oraz wczesnego ostrzeżenia o ewentualnych rozwijających się zagrożeniach konstrukcyjnych było w naszym kraju istotnym krokiem w upowszechnianiu nowych standardów bezpieczeństwa. Obiekt posiada zadaszenie w postaci membrany, rozpiętej na dwudziestu ośmiu stalowych dźwigarach w układzie kratownicowym, które posadawione są na żelbetowej konstrukcji – tzw. „ringu”, znajdującym się bezpośrednio nad najwyższymi słupami. Największe obciążenia dynamiczne konstrukcji występują w elementach północnej trybuny stadionu, gdzie przebywają kibice klubu. Wskazana część stadionu składa się z pięciu jednakowych sekcji trybun, wspartych na dziesięciu rzędach słupów żelbetowych, nakrytych wiotkim dachem, rozpiętym na pięciu dźwigarach [106]. Do instalacji systemu monitoringu wybrano środkowy z pięciu dźwigarów, znajdujący się w osi symetrii trybuny i stadionu (dzięki temu można było, korzystając z założenia o symetrii konstrukcji i symetrii obciążeń, znacznie ograniczyć liczbę czujników potrzebnych do budowy pilotażowego systemu światłowodowego). Podjęto decyzję o dokonaniu pomiaru odkształceń trzech nóg po zachodniej stronie dźwigara i temperatury dźwigara. Następnie pomiaru odkształceń osiowych pochodzących od zginania słupa podpierającego monitorowane nogi dźwigara oraz pomiar przemieszczeń wieńca stadionu, względem tego słupa, wraz z pomiarem temperatury. Przyjęta w przedmiotowym przypadku liczba i układ czujników pozwala na jednoczesne monitorowanie odkształceń dźwigara i wspierającej go żelbetowej konstrukcji. Umieszczenie punktów pomiarowych w tym samym przekroju pionowym pozwala na analizę czasową korelacji pomiędzy obciążeniami i odpowiedzią konstrukcji. Nie miał na to wpływu nawet fakt, iż znany był jedynie kierunek obciążenia (podskoki kibiców), bez znajomości jego wartości chwilowych [60], [16]. Do monitorowania wskazanej konstrukcji wybrano czujniki światłowodowe z siatką Bragga – było to podyktowane potrzebą jednoczesnego prowadzenia pomiarów, zarówno statycznych, jak i dynamicznych odkształceń oraz temperatury, a także

koniecznością montażu czujników do różnych rodzajów elementów konstrukcyjnych [104]. Do pomiaru odkształceń nóg dźwigara wybrano czujniki zgrzewane punktowo, natomiast do pomiaru odkształceń słupa i przemieszczeń wieńca stadionu względem słupa, wybrano czujniki przykręcane. Jako czytnik długości fali zastosowano analizator obsługujący cztery kanały pomiarowe przy częstotliwości 100 Hz, pozwalający na uzyskanie powtarzalności odczytu, przy zakresie długości fali od 1510 do 1590 nm [47]. Pomiaru statyczne, z wykorzystaniem zainstalowanego systemu prowadzone są we wskazanym obiekcie co godzinę, przez całą dobę, dostarczając łącznie ponad siedemset wyników w miesiącu, dla każdego z dziesięciu zainstalowanych czujników. Celem tych pomiarów jest uzyskiwanie charakterystyk deformacji temperaturowych konstrukcji i wyznaczanie trendów deformacji. Wiedza ta stanowi podstawę do analizy ewentualnych odstępstw od normalnego zachowania konstrukcji traktowanych jako sygnały pojawienia się potencjalnych defektów i konieczności podjęcia odpowiednich działań, np. przeprowadzenia dodatkowych pomiarów, inspekcji bądź przeglądów, czy też doraźnych interwencji (usuwanie śniegu, zamknięcie części obiektu). Pomiaru dynamiczne prowadzone są z kolei krótkookresowo w celu wyznaczenia charakterystyk dynamicznych konstrukcji pod wpływem obciążeń środowiskowych (np. wiatru czy ruchu pojazdów) [80]. Są to pomiary referencyjne, niezbędne dla uchwycenia różnic w zachowaniu konstrukcji pojawiających się pod wpływem zachowania tłumy. W tym celu pomiary dynamiczne przeprowadza się również podczas imprez sportowych (optymalnie podczas meczu). Porównanie pomiarów uzyskiwanych podczas meczu i dynamicznych odczytów referencyjnych stanowi podstawę analizy wpływu zachowania tłumy na pracę i bezpieczeństwo konstrukcji [37], [88].

Pierwsze praktyczne zastosowania opisanych eksperymentów i badań zrealizowano w 2005 roku, implementując światłowody wewnątrz filarów mostu. Projekt badawczy pod nazwą „TRUSS”, związany z analizą bezpieczeństwa

konstrukcji prowadzony jest przez konsorcjum pięciu uczelni, jedenastu przedsiębiorstw oraz instytutu badawczego, łącznie z pięciu krajów europejskich, w ramach programu „Horyzont 2020”. Ważnym obszarem prowadzonych badań jest rozwinięcie światłowodowej techniki pomiarowej do monitorowania konstrukcji wielkogabarytowych [81]. Specjaliści skupiają swoją uwagę na możliwości identyfikowania i oceny zarysowań w betonie. Do przykładów eksperymentów laboratoryjnych, przeprowadzanych w ramach projektu, zaliczyć można m.in. zginanie płyty żelbetowej z przyklejonymi do powierzchni włóknami światłowodowymi czy też analizę trajektorii naprężeń głównych w strefie przypodporowej belki częściowo sprężonej. Opracowuje się także algorytmy do wyznaczania szerokości rozwarcia rysy [82], [45].

Innym przykładem obiektu sportowego w Polsce, w którym zainstalowano i eksploatuje się obecnie nowoczesny system monitoringu technicznego konstrukcji, jest hala „OLIVIA” w Gdańsku. Główna część budynku składa się z żelbetowej konstrukcji trybun oraz stalowej konstrukcji dachu. System monitoringu tego obiektu został zaprojektowany i zbudowany tak, aby ostrzegał przed zagrożeniem awaryjnym w przypadku dwóch przewidywanych scenariuszy katastrofy: w wyniku utraty stateczności słupków dźwigarów stalowych lub z powodu utraty siły sprężającej w cięgnach dźwigarów. System ten prowadzi ciągły pomiar przemieszczeń dźwigarów dachu, względem płyty lodowiska (4 punkty pomiarowe), przemieszczeń pasa górnego dźwigara względem pasa dolnego (12 punktów pomiarowych) oraz odkształceń i temperatur na pasie dolnym, górnym i słupkach dźwigarów (26 punktów pomiarowych). Dodatkowo opisywany system jest wyposażony w cztery kamery obserwujące powierzchnię dachu hali i dwie kamery rejestrujące obrazy z wnętrza hali. Z punktu widzenia struktury system składa się z dwóch podsystemów: obserwacyjnego (umożliwia on uzyskiwanie informacji o potencjalnym zagrożeniu konstrukcji) i ostrzegawczego (ma możliwość analizy dokonywanych obserwacji, porównywania ich z referencyjnym modelem numerycznym oraz odniesienia do

stanów alarmowych wraz z przekazywaniem informacji o wystąpieniu takich stanów do terminala komunikacyjnego, obsługującego pocztę elektroniczną i moduł SMS) [89], [105]. Główną częścią systemu jest centralna jednostka zarządzająca podsystemami, danymi w relacyjnej bazie, prowadząca obliczenia konstrukcji dachu w sposób ciągły oraz oceniająca stan tej konstrukcji w trzystopniowej skali: konstrukcja bezpieczna, stan ostrzegawczy i awaria. W przypadku rozpoznania jednego z dwóch ostatnich stanów jednostka ta włącza automatycznie moduł powiadamiania, uruchamiając dźwiękowy sygnał ostrzegawczy, terminal sygnalizacyjny oraz wysyła powiadomienia mailowe bądź w formacie SMS do zdefiniowanego grona odbiorców. Na przykład w okresie wiosennym, gdy nasłonecznienie powoduje znaczne zmiany temperatury poszycia dachu, obserwowane są przez system wyraźne zmiany ugięć dźwigara, sięgające 40 mm. Ugięcia te powodowane są także zimą, z uwagi na zalegającą na dachu pokrywą śnieżną. Po obfitych opadach śniegu ugięcie to wynosiło (według dostępnych danych historycznych) 17 mm – licząc względem wartości początkowej. Wyniki obliczeń z modułu numerycznego (moduł analiz) określiły dla tego przypadku równoważną grubość śniegu, powodującą ugięcie tego rzędu na 66 mm. Wizualne oględziny dachu potwierdziły zgodność danych obliczeniowych, podawanych przez system, ze stanem faktycznym. Z kolei na przełomie stycznia i lutego 2010 roku (od 28.01. do 12.02) wystąpiły w Gdańsku silne opady śniegu, powodujące dodatkowe ugięcie dźwigara o 20 mm, powodujące ugięcie całkowite rzędu 60 mm. Amplituda ugięć konstrukcji dachu omawianego obiektu we wskazanym okresie wyniosła od -40 mm do +60 mm [79]. W omawianym okresie system zasygnalizował wzrost naprężeń rozciągających w pasie dolnym dźwigara oraz naprężeń ściskających w pasie górnym tego elementu, przy czym wzrost naprężeń w pasie dolnym okazał się większy (110 $\mu\epsilon$), w porównaniu do pasa górnego (-30 $\mu\epsilon$) [86], [42], [91].

W 2017 roku zespół Akademii Górniczo-Hutniczej podjął się realizacji

przedsięwzięcia pod nazwą „SMOK” – System Monitorowania Odkształceń Konstrukcji. Jego celem jest opracowanie uniwersalnego narzędzia umożliwiającego kontrolowanie przemieszczeń w czasie rzeczywistym. Obiektem, który objęty został badaniami, jest most wantowy – Brama Przemyska – w Przemyślu. Na pylonach tego obiektu zainstalowano anteny GNSS, które wykonywać będą pomiar ciągły metodą statyczną (stacja referencyjna GNSS umieszczona została na dachu obiektu, będącego siedzibą Zarządu Dróg Miejskich w Przemyślu). Uzyskiwane dane przetwarzane są na miejscu przez komputer oraz zdalnie przesyłane są do Krakowa [68], [83]. Otrzymywane dane są konfrontowane z zainstalowaną na moście stacją meteorologiczną oraz wynikami dokonywanych przez nią niezależnie pomiarów (termometr, higrometr, wiatromierz). Oprócz pomiarów realizowanych w trybie ciągłym, w ramach przedsięwzięcia zaplanowano także pomiary okresowe. Jedną z wybranych technik okresowego monitorowania odkształceń analizowanej konstrukcji zakłada wykorzystanie do celów pomiarowych włókna światłowodowego z czujnikiem, sprzężonego z interogatorem, działającym w oparciu o rozpraszanie Rayleigh’a, przytwierdzonego do elementu nośnego przęsła mostu [87]. Technika ta pozwala na precyzyjne pomiary odkształceń wzdłuż długości włókna w sposób geometrycznie ciągły. Dzięki temu pojedyncze włókno światłowodowe, o długości kilkudziesięciu metrów, jest w stanie zastąpić tysiące tradycyjnych, punktowych czujników odkształceń [84]. Dodatkowo Brama Przemyska podlegać będzie obserwacjom geodezyjnym z sieci kontrolnej, założonej wokół tego obiektu (regularnym weryfikacjom poddawane są współrzędne wszystkich punktów, składających się na sieć oraz wykonywane są ich pomiary kątowno – liniowe do folii dalmierczych, rozklejonych na konstrukcji). Obserwacje tachimetryczne uzupełnia niwelacja precyzyjna, dzięki której dodatkowo skontrolowane zostaną przemieszczenia pionowe charakterystycznych punktów mostu. Opisane przedsięwzięcie jest przykładem zastosowania techniki światłowodowej (czujniki światłowodowe z siatką

Bragga) do realizacji zadań z zakresu nowoczesnego monitoringu ważnego obiektu [44].

Duża odporność na działanie warunków termicznych oraz innych czynników zewnętrznych powodują, iż systemy monitoringu, bazujące na światłowodach, cechuje duża niezawodność oraz wysoki stopień wiarygodności. Są to właściwości i atrybuty predysponujące te rozwiązania do stosowania w przypadku podejmowania i realizowania rozległych, kosztownych i odpowiedzialnych inwestycji infrastrukturalnych [46].

Wadami przedmiotowej technologii są z kolei kruchość materiału (światłowodów, w których wykonano czujniki z siatkami Bragga), czułość na mikro zgięcia oraz dwójłomność wywoływana ciśnieniem zewnętrznym. Właściwy monitoring odkształceń konstrukcji inżynierskiej wymaga także eliminacji wpływu temperatury na wskazania siatki Bragga. Pewną barierą wobec stosowania tej technologii jest wysoka cena jej stosowania [88].

Kolejnym przypadkiem, w którym zastosowano rozwiązania oparte o światłowodowe czujniki FBG jest budynek sali sportowo-widowiskowej w Halifaxie – Halifax Metro Centre (Kanada). Jest to obiekt usytuowany w centrum miasta, jako budowla związana z World Trade Convention Centre [85]. Jest to obiekt sportowo-rozrywkowy mieszczący między innymi kryty stadion hokejowy na dziesięć tysięcy widzów. Jego dach jest wsparty na przestrzennej kratownicy o dużej rozpiętości. Konstrukcja nośna dachu służy także, w przypadku tego budynku, do podwieszania ciężkiego sprzętu podczas koncertów i innych imprez. Dach narażony jest ponadto na silne wiatry i ciężkie opady śniegu. Całość konstrukcji podlega różnorodnym obciążeniom, ciągłym i punktowym, w tym również termicznym, od zawieszanych w różnych miejscach reflektorów – utrudnia to bieżącą ocenę bezpieczeństwa jej pracy. Dla wspomagania oceny tego bezpieczeństwa na elementach kratownicy dachowej opisywanego obiektu zainstalowano trzydzieści sześć czujników światłowodowych FBG, monitorujących temperaturę i odkształcenia konstrukcji.

Drugim elementem systemu bezpieczeństwa jest laserowy robot pomiarowy, zainstalowany w celu monitorowania ugięć węzłów kratownicy [30], [41].

Innymi przykładami zagranicznych obiektów, w których zainstalowano i eksploatuje się nowoczesne, innowacyjne systemy monitoringu stanu technicznego konstrukcji, są most Infante D. Henrique w Porto (Portugalia) oraz most Tsing Ma w Hong Kongu [39].

Ważnym obszarem zastosowania techniki światłowodowej, w tym czujników FBG, jest geotechnika. Pionierami w tej dziedzinie, na samym początku XX wieku, byli Chińczycy. Czujniki siatkowe Bragga zastosowano do pomiaru odkształceń, jakim ulegała obudowa tunelu górskiego Bai Ni-jing w prowincji Yunnan w Chinach. Tunel ten wybudowano na wysokości przekraczającej 2500 m n.p.m. w warunkach dużego nachylenia stoku, sięgającego 30°. W trakcie eksploatacji tego obiektu doszło do jego uszkodzenia – obniżenia podstawy jednego z wylotów (od 40 do 60 cm), zniekształcenia sklepienia, przemieszczenia ściany bocznej oraz awarii obudowy [31], [24]. Ustalono, że propagacja odkształcenia ściany skalnej jest pochodną ciężaru właściwego skał i mas gruntu. Powierzchnia powstałego osuwiska była nierówna i dlatego przemieszczanie poszczególnych sekcji następowało wokół tunelu. Odkształcenie jednej ze ścian powodowała asymetria oddziaływania mas skalnych [90], [94]. Wybrano dziesięć przekrojów tej konstrukcji, w których postanowiono monitorować odkształcenia, jakim ulega ona w dwudziestoczterogodzinnych odstępach. W tym celu zastosowano dziesięć sztuk czujników FBG, zainstalowanych w pięciu punktach monitorujących (niektóre ułożone wzdłuż osi tunelu, z przeznaczeniem do monitorowania zniekształcenia osiowego, inne do analizy odkształceń poprzecznych tej budowli). Przeprowadzone badania wykazały, że ściany tunelu – lewa i prawa – – poddawane są zróżnicowanym naprężeniom i ulegają w związku z tym innym odkształceniom (200 $\mu\epsilon$ strona lewa i 500 $\mu\epsilon$ strona prawa). Jest to związane z oddaleniem od zbocza (stoku wzgórze), a także efektami generowanymi przez

zmieniające się pory roku (po zakończeniu pory deszczowej ciśnienie wywierane przez maszyn skalny na ścianę tunelu jest stopniowo zmniejszane, w zależności od zawartości wilgoci) [95], [96]. Rozwiązaniem problemu deformacji, jakim ulegał tunel, okazała się instalacja drenażu – od momentu uzupełnienia budowli o ten element tak znaczne odkształcenia przestały się pojawiać od strony wzgórza. W ramach przeprowadzonych badań ustalono, że większość odkształceń, jakim uległ tunel, ma możliwość powrotu do stanu przed deformacją (ujawniono, że struktura obudowy wykazuje tendencje do zachowania sprężystego). System czujników światłowodowych został zainstalowany w obudowie tunelu na stałe (specjalne wyżłobienia obudowy). Długotrwałe pomiary zmian temperatury wykazały, że deformacje zależą od fluktuacji (przypadkowych zmian) temperatury, wynikających z charakteru zmian środowiskowych w rejonie objętym pomiarami. Zmiany w zakresie odkształceń zmodernizowanej ostatecznie obudowy zależą od występowania pory deszczowej i suchej – wraz z zakończeniem pory deszczowej następuje ograniczenie występowania największych odkształceń [33], [34].

Instytut Lotnictwa w Warszawie przeprowadził szereg badań z wykorzystaniem czujników światłowodowych – zarówno tych bazujących na siatkach Bragga, jak również polarymetrycznych. Ich celem było ustalenie możliwości w zakresie wykorzystania tych urządzeń, nie tylko do pomiaru skali wielkości, takich jak: naprężenie, odkształcenie czy temperatura, lecz także do detekcji lokalizacji w ramach konkretnego elementu, w których występuje nieciągłość materiału (rozumiana jako uszkodzenie, osłabienie, ubytek). Metody pomiarowe oparte na czujnikach światłowodowych dają możliwość pomiaru odkształceń, zarówno lokalnych (siatki Bragga), jak i globalnych (czujniki polarymetryczne). Wykrycie uszkodzenia przy użyciu czujnika z siatką Bragga jest uwarunkowane położeniem sensora i uszkodzenia [92]. Jeśli miejsce uszkodzenia jest znacznie oddalone od czujnika, istnieje ryzyko, że może nie dojść do jego wykrycia. Jeśli czujnik zarejestruje odkształcenie, które może być

wywołane uszkodzeniem, możliwe jest wówczas określenie miejsca jego wystąpienia. W przypadku czujników polarymetrycznych zmiana odkształcenia wywołana uszkodzeniem zostanie zawarta w sygnale pomiarowym, odpowiadającym całkowitemu odkształceniu [93]. Wykrycie uszkodzenia jest więc możliwe, jednak nie sprecyzowano miejsca jego wystąpienia. Czujnik ten mierzy odkształcenia wzdłuż długości światłowodu, zatem lokalne zmiany odkształceń, które wystąpią obok czujnika, mogą nie zostać wykryte. Siatki Bragga są czujnikami punktowymi, natomiast czujniki polarymetryczne dają informację o zmianach wielkości mierzonej wzdłuż danej linii [38], [97].

We współczesnym budownictwie komunikacyjnym stosuje się czujniki światłowodowe z siatką Bragga – jednym z obszarów zastosowań tych urządzeń jest kontrola rozmycia dna cieków wodnych przy obiektach inżynierskich – na przykład elementach konstrukcyjnych mostów (podpór). Zazwyczaj pomiary te wykonuje się przy użyciu reflektometrów optycznych czasu przebiegu impulsu energii światła OTDR (optyczny reflektometr z *ang. optical time-domain reflectometer*), wykorzystujących światłowody. Aktualnie te rozwiązania są wypierane przez światłowodowe czujniki z siatkami Bragga [99]. Doświadczenie w tym zakresie ma Korpus Inżynierów Armii Stanów Zjednoczonych. Zazwyczaj pomiary tego typu wykonywano umieszczając dolny odcinek światłowodowego czujnika rozmyć, zakończony rodzajem martwej kotwicy w dnie cieku, na głębokości większej aniżeli prognozowane maksymalne rozmycie. Górny koniec światłowodu jest łączony w zespół optoelektroniczny, który generuje w światłowodzie cykliczne impulsy światła, odbiera je odbite od nierówności ścian światłowodu, określa czas obiegu i na tej podstawie oblicza głębokość, na której nastąpiło odbicie. Impuls odbija się w miejscu kontaktu wody z dnem, gdzie występuje odkształcenie światłowodu. Zespół optoelektroniczny przekazuje dane do systemu przetwarzania, analizy i ekspozycji. Wzdłuż światłowodu, wewnątrz jego osłony, znajduje się induktor umożliwiający powstawanie mikro wygięć, mających postać poprzecznych grzbietów. To od

nich odbija się impuls światła [98]. Opisany, stosowany dotychczas w przedmiotowym obszarze system pomiarowy, jest wypierany przez inne rozwiązanie, oparte o czujnik światłowodowy z siatką Bragga. Siatka ta działa jak selektywne zwierciadło – filtr optyczny, który odbija światło o określonej długości fali. Pojedynczy światłowód z siatką Bragga jest w opisywanym rozwiązaniu instalowany wzdłuż pręta wbitego w dno cieku i wystającego ponad dno. Przepływająca w korycie woda wygina wystający odcinek, pogłębienie dna przez rozmycie zwiększa długość i wygięcie tego odcinka, co z kolei obniża poziom odbicia od siatki Bragga – wykrywa to czujnik FBG i na tej podstawie jest określana nowa głębokość dna i skala rozmycia, do jakiej w danym momencie doszło [32].

3. TEZA I CEL PRACY

3.1 SFORMUŁOWANIE TEZY PRACY

Materiał „POLYTECH”, który został po raz pierwszy zastosowany w systemie prefabrykacji elementów budynku wymaga stałej kontroli w celu potwierdzenia zakładanych parametrów wytrzymałościowych, w tym odkształceniowych. Na podstawie przedstawionej w poprzednim rozdziale analizie możliwości kontroli stanu technicznego elementów budowli przy zastosowaniu techniki światłowodowej sformułowano tezę:

dla nowego materiału budowlanego „POLYTECH” oraz wykonanych z niego elementów budynku i prefabrykatów istnieje eksperymentalna metoda pozwalająca na wyznaczanie rzeczywistych wartości odkształceń w nich występujących.

W celu dowiedzenia powyższej tezy niezbędne są:

- 1) budowa systemu pomiarowego wyposażonego w czujniki światłowodowe z siatką Bragga (FBG),
- 2) badania wytrzymałościowe ściskania i zginania materiału „POLYTECH”,
- 3) testy wybranych elementów budynku modelowego zrealizowanego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”,
- 4) kontrola poszczególnych badanych elementów optycznym systemem „ARAMIS” do pomiaru odkształceń.

Uzyskane w czasie badań szczegółowe dane umożliwią ustalenie wartości odkształceń przedmiotowych elementów zastosowanych do wykonania budynku modelowego zrealizowanego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”

3.2 CEL PRACY

Celem niniejszej pracy było wykazanie, że zastosowanie czujników światłowodowych z siatką Bragga (z ang. *FBG Fiber Bragg Grating*) umożliwia wyznaczenie rzeczywistych wartości odkształceń występujących w **elementach budynku i prefabrykatach wykonanych z materiału budowlanego „POLYTECH”**. Wymagało to wykonania specjalnych instalacji umożliwiających zastosowanie czujników światłowodowych w systemie „POLYTECH”. Przedmiotem badań były odkształcenia w elementach budynku wykonanego z fabrykatów opracowanych w systemie „POLYTECH”.

Dodatkowo założeniem niniejszej pracy było zapoznanie ze współczesnymi rozwiązaniami z zakresu techniki światłowodowej wykorzystywanymi w pomiarach odkształceń konstrukcji, a także innowacyjnym w skali kraju urządzeniem do analizy odkształceń „ARAMIS”. Całość prac badawczych ma na celu potwierdzenie, iż elementy prefabrykowane badane metodą ciągłego pomiaru odkształceń zapewniają bezpieczeństwo użytkowania i stabilność konstrukcji pod obciążeniem testowym. Wyniki badań mogą wskazać słabe punkty systemu i ułatwić ich wyeliminowanie. Celem paralelnym jest ewentualne umożliwienie wdrożenia innowacyjnej metody produkcji elementów prefabrykowanych do budowy obiektów na skalę masową.

4. ZAKRES PRACY I PLAN BADAŃ

Budynki z nowoczesnych elementów prefabrykowanych, wykonywane według innowacyjnej technologii, mają charakteryzować się dużą energooszczędnością i szybkim czasem realizacji inwestycji. Zastosowanie metody pomiaru odkształceń, opartej na czujnikach z siatkami Bragga, umożliwi monitorowanie elementów konstrukcji budynku.

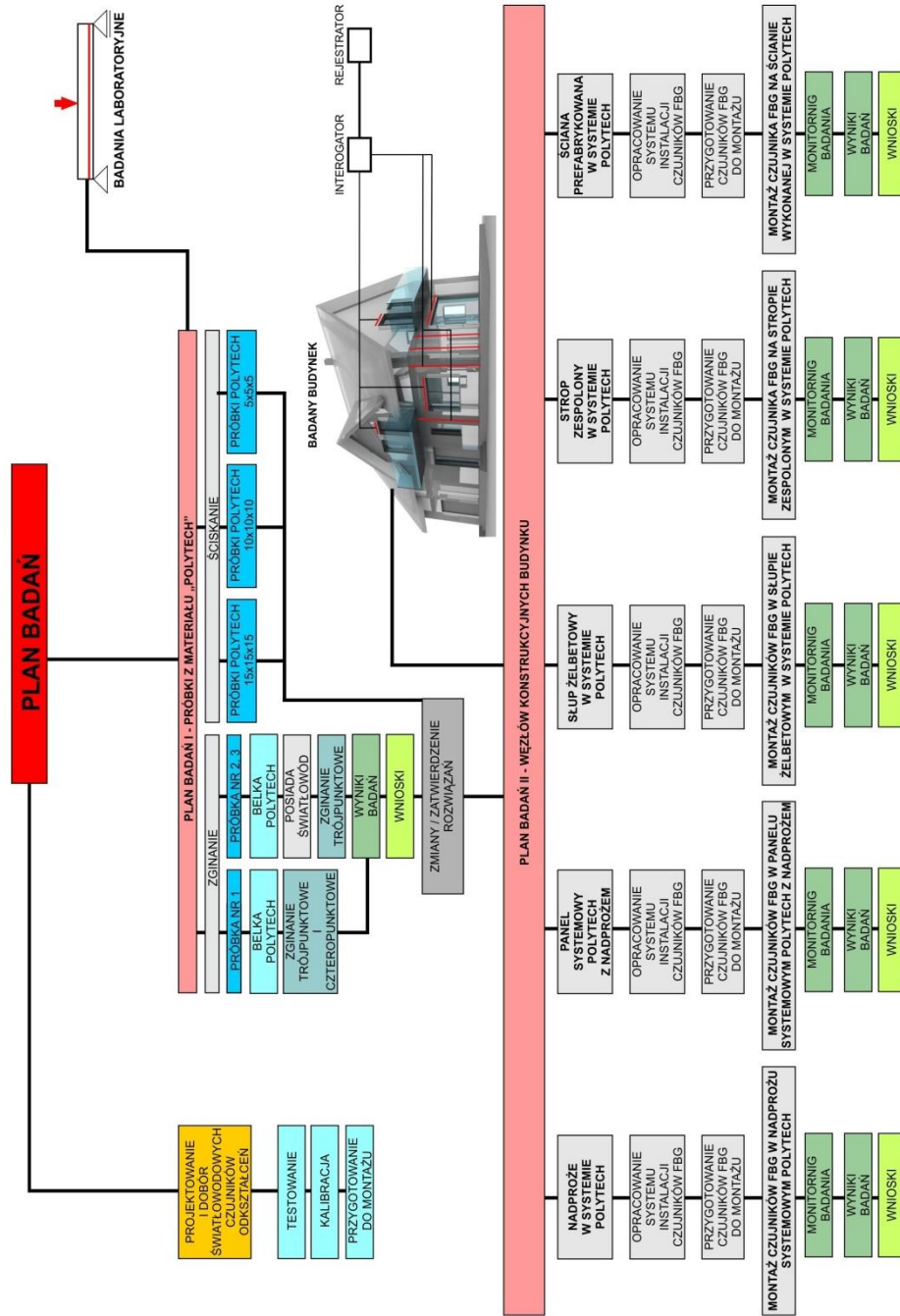
Badania przeprowadzono na wybranych prefabrykowanych elementach konstrukcyjnych z polimerobetonu – tzw. materiału „POLYTECH”, przeznaczonych do wykorzystania w branży budownictwa ogólnego.

Elementy i badane próbki to:

- próbki sześciennie z materiału „POLYTECH”,
- belki z materiału „POLYTECH”,
- nadproże w systemie „POLYTECH”,
- panel ścienny z nadprożem w systemie „POLYTECH”,
- słup żelbetowy w systemie „POLYTECH”,
- strop zespolony w systemie „POLYTECH”,
- panel ścienny w systemie „POLYTECH”.

Wymienione obiekty poddano pomiarom w zakresie odkształceń, jakim ulegają one pod wpływem występujących obciążeń. Następnie przeprowadzono walidację uzyskanych wyników za pomocą systemu „ARAMIS”.

Plan badań zaprezentowano na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Plan badań - schemat koncepcji rozwiązania tematu pracy

5. METODYKA BADAŃ

Koncepcja rozwiązania tematu pracy składa się z kilku bardzo istotnych etapów, w tym badań eksperymentalnych i analiz. W pierwszej kolejności przeprowadzono testy materiału „POLYTECH” zastosowanego w systemie prefabrykacji. Uzyskane dane pozwoliły określić parametry wytrzymałościowe na podstawie przeprowadzonych wielu prób w warunkach laboratoryjnych.

Kolejnym stadium w dowodzeniu niniejszej tezy w pracy było przeprowadzenie kontroli prefabrykatów zamontowanych w budynku modelowym. Czujniki światłowodowe z siatką Bragga (FBG), zamontowane w istotnych elementach konstrukcyjnych, umożliwiły pozyskanie danych na temat pracy badanego elementu.

Następnym etapem w dowodzeniu tezy było przeprowadzenie testów ściany z nadprożem. Prefabrykat sprawdzany był na stanowisku pomiarowym w zakładzie produkcyjnym. Przedmiotowy fragment budynku monitorowano czujnikami FBG, zamontowanymi na prętach zbrojeniowych. W tym celu użyto również czujnik cyfrowy i system „ARAMIS” wskazujący odkształcenia. Na podstawie uzyskanych danych zostały określone istotne parametry wytrzymałościowe.

5.1 NORMY I STANDARDY OBOWIĄZUJĄCE W DZIEDZINIE BADAŃ CZUJNIKAMI ŚWIATŁOWODOWYMI

Pomiary przeprowadzone w ramach badawczej części niniejszej pracy zrealizowano zgodnie z założeniami i wytycznymi normy IEC 61757 (PN-EN 61757 „Czujniki światłowodowe”, część 1-1 „Pomiar naprężenia”). Jest to obowiązujący od 2017 r. dokument [107].

6. MATERIAŁ POLYTECH – BADANY BUDYNEK ZREALIZOWANY W SYSTEMIE „POLYTECH”

6.1 MATERIAŁ „POLYTECH”

Materiał „POLYTECH”, który został zastosowany w systemie prefabrykacji do tworzenia elementów budynku, charakteryzuje się zwiększoną izolacyjnością termiczną ze względu na zastosowany granulata styropianowy. Uzyskany prefabrykat posiada również odpowiednią wytrzymałość umożliwiającą wykonanie przegród pionowych w budynkach. Po wieloletnich badaniach doświadczalnych przyjęto proporcje na poziomie 60% granulata EPS pochodzący z recyklingu i 40% odpowiednio modyfikowana zaprawa. Ponieważ materiał, który powstał posiada proporcje 60% EPS i 40% modyfikowana zaprawa cementowa, charakteryzuje się nieco niższą wytrzymałością niż wymagana. W celu zwiększenia sztywności i wytrzymałości zaproponowano wprowadzenie zbrojenia do prefabrykatów wykonywanych w systemie „POLYTECH”.

Materiał „POLYTECH” charakteryzuje się następującymi parametrami:

- $\lambda = 0,135 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- U (współczynnik przenikania ciepła) przegrody w systemie „POLYTECH” określono na poziomie $0,146 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$,
- ciężar objętościowy 750 kg/m^3 ,
- średnia wytrzymałość na ściskanie $2,13 \text{ MPa}$,
- gęstość w stanie powietrzno suchym $0,77 \text{ g/cm}^3$
[średnia po 28 dniach],
- gęstość w stanie powietrzno suchym $0,74 \text{ g/cm}^3$
[średnia po 56 dniach],
- skurcz liniowy bez elementów zbrojących $0,16 \%$
[średnia po 28 dniach],
- skurcz liniowy bez elementów zbrojących $0,20 \%$
[średnia po 56 dniach].

6.2 ZASTOSOWANIE MODYFIKOWANEJ ZAPRAWY NA BAZIE EPS W SYSTEMIE PREFABRYKACJI „POLYTECH”

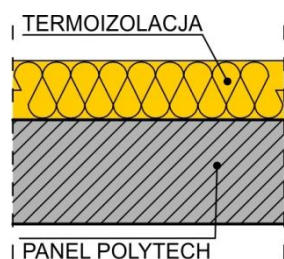
Badaniami objęty został system budowy, który bazuje na prefabrykacji elementów murowych wielkopłytowych. Wymiary paneli ściennych zależą od kształtu i wielkości budynku, z uwzględnieniem maksymalnej wagi poszczególnych elementów do 1200-1300 kg/szt. Finalne gabaryty paneli ustalane są na podstawie siatki modularnej 70 x 70 cm (rys. 59).



Rys. 6.1. Montaż paneli systemowych „POLYTECH”

System umożliwia wykonanie budynku o dowolnym kształcie, przy zastosowaniu dodatkowych niestandardowych paneli redukcyjnych, umożliwiających uzyskanie nie modularnych 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 pozyskując w świetle dodatkowe 15 - 20 cm.

Panele zewnętrzne wykonywane są jako ściana dwuwarstwowa (rys. 6.2).



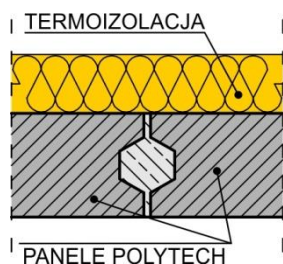
Rys. 6.2. Przekrój przez ścianę (schemat)

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 - 47 cm (rys. 6.3).



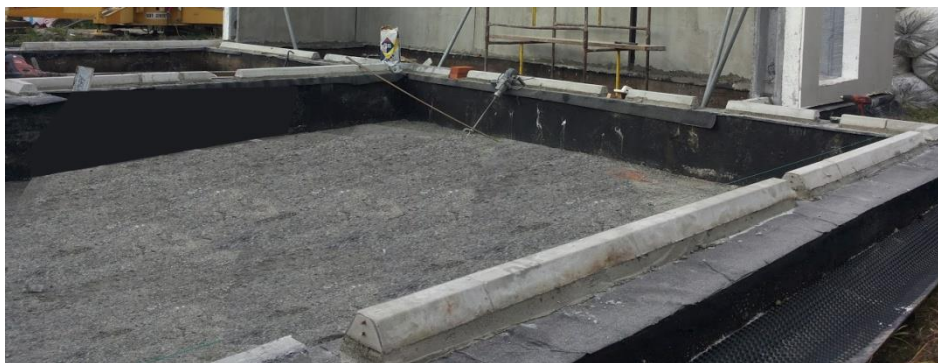
Rys. 6.3. Prefabrykowane panele „POLYTECH”

Panele łączone są ze sobą przy pomocy profilowanych (w trakcie prefabrykacji) zamków. Zamki po złożeniu ze sobą, tworzą szalunek tracony dla żelbetowych słupów w kształcie sześciokąta (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Łącznik ścian systemowych „POLYTECH”

W panelach podczas prefabrykacji umieszczona zostaje siatka zbrojąca. Na produkcji panele zewnętrzne nie są wykańczane, pozostaje konieczność wykonania warstwy zewnętrznej z siatki (z włókna szklanego) 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 (fot. 6.2 i 6.3). Budowa rozpoczyna się od pierwszej kondygnacji, na uformowanym i wyprofilowanym zamku, znajdującym się na tradycyjnym fundamencie, który umożliwia ułożenie w jednej linii paneli. Słupy łącznikowe pomiędzy panelami ściennymi, posadowione są na ścianie fundamentowej, umożliwiając przenoszenie obciążeń z wieńca na fundament (fot. 6.1).



Fot. 6.1. Wyprofilowane zamki montażowe na ścianie fundamentowej

Więźba dachowa opiera się na tradycyjnym żelbetowym wieńcu, wspartym na słupach żelbetowych i panelach „POLYTECH”.



Fot. 6.2. Budynek zrealizowany w systemie „POLYTECH”

Innowacyjny charakter systemu i pionierskie rozwiązania wymagają przeprowadzenia odpowiednich badań, które potwierdzą wymaganą jakość, zanim zostaną wdrożone do produkcji na szerszą skalę.

W toku przeprowadzonych badań, nad możliwościami w zakresie wprowadzenia materiału „POLYTECH” do obrotu i powszechnego wykorzystania w branży budownictwa ogólnego, wybudowano dotychczas kilka eksperymentalnych obiektów budowlanych (np. budynek mieszkalny jednorodzinny). Poniżej przedstawiono fotografie, wykonane podczas budowy budynku mieszkalnego jednorodzinnego – budynek modelowy, zrealizowany w systemie prefabrykacji „POLYTECH” (fot. 6.4 i 6.5).



Fot. 6.3. Budowa domu modelowego z wykorzystaniem prefabrykatów, wykonanych z materiału „POLYTECH”



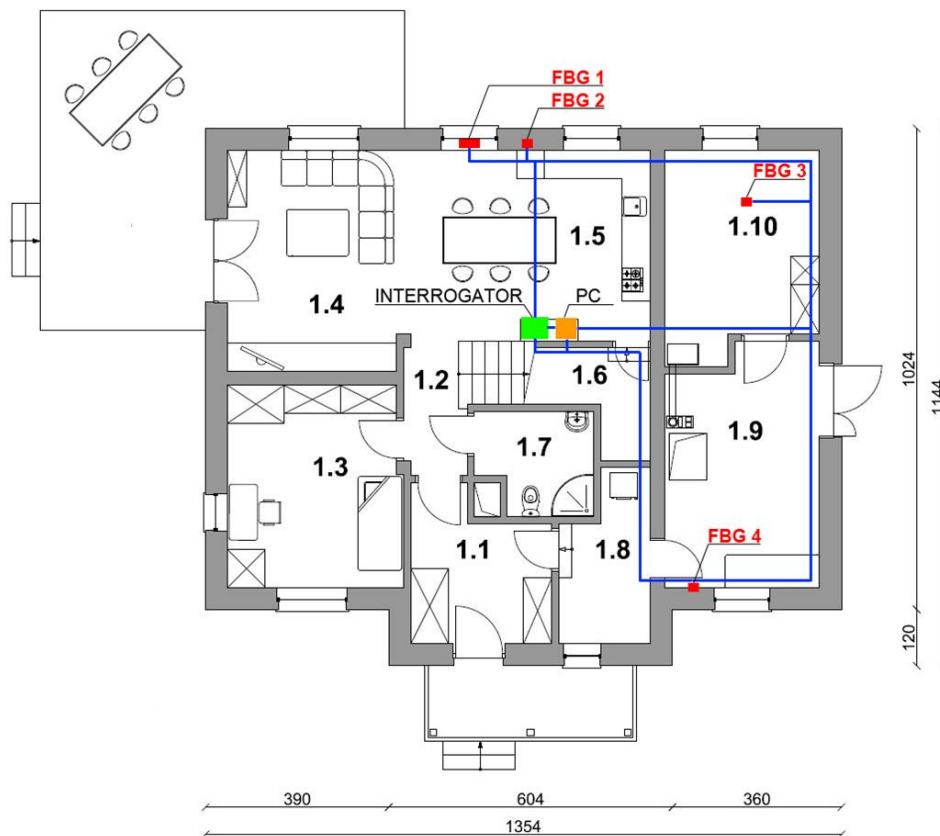
Fot. 6.4. Budowa domu modelowego z wykorzystaniem prefabrykatów, wykonanych z materiału „POLYTECH”



Fot. 6.5. Modelowy dom objęty badaniami – budynek mieszkalny jednorodzinny, wzniesiony z wykorzystaniem prefabrykatów, wykonanych z materiału „POLYTECH”

Planowany obszar badań docelowo obejmuje monitorowanie wybranych elementów budynku modelowego (dom jednorodzinny) wykonanego z prefabrykatów o powierzchni ok. 219 m² i kubaturze ok. 632 m³. Zrealizowany obiekt podlega działaniom czynników wewnętrznych i zewnętrznych jak w przypadku typowego tradycyjnego domu. Na rysunkach (rys. 6.5 i 6.6) przedstawiono schematyczne rzuty przedmiotowego domu modelowego, a zestawienie pomieszczeń na poszczególnych kondygnacjach zamieszczono w tabelach 6.1 i 6.2. Budynki realizowane zgodnie z tym systemem mają charakteryzować się krótkim czasem wykonania i dużą energooszczędnością.

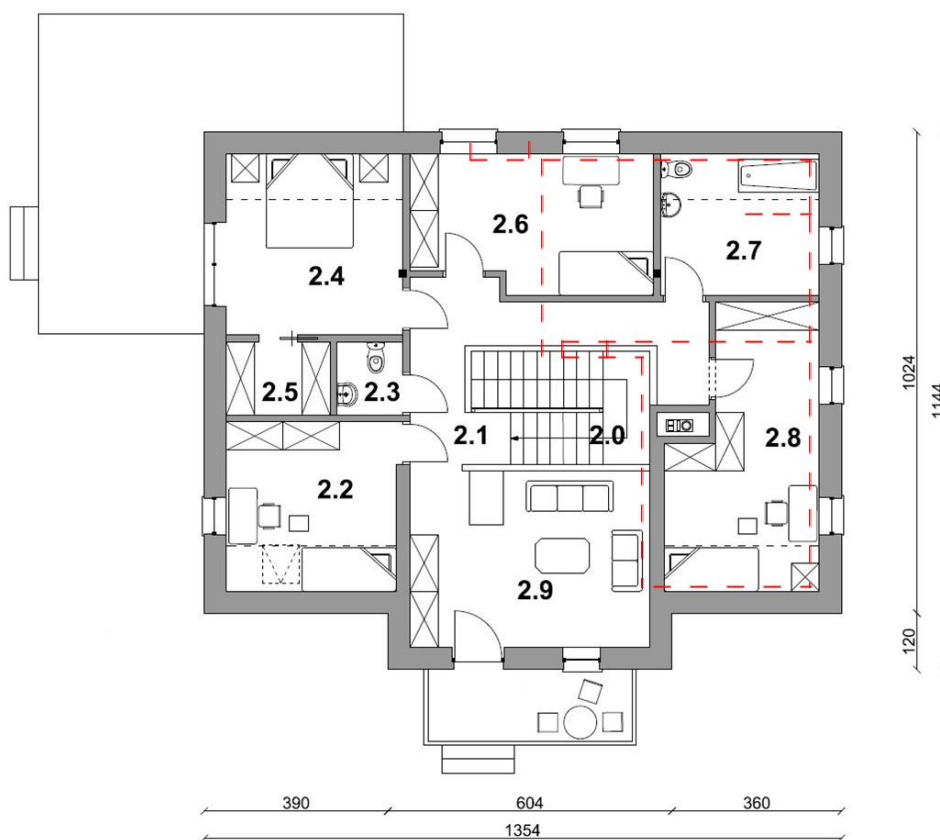
Celem przeprowadzonych badań, było zweryfikowanie parametrów wytrzymałościowych przedmiotowych prefabrykatów, które obok wymienionych cech, przesądzą o tym, czy kwalifikują opisany materiał do obrotu i powszechnego wykorzystania w branży budownictwa ogólnego.



Rys. 6.5. Schemat rzutu parteru budynku modelowego objętego badaniami, lokalizacja analizowanych elementów czujnikami FBG (FBG 1-4) i interrogatora z rejestratorem (PC)

Tabela 6.1. Zestawienie pomieszczeń na parterze budynku modelowego objętego badaniami

1.1	Wiatrołap	9,1m ²
1.2	Korytarz	3,0m ²
1.3	Sypialnia	16,6m ²
1.4	Pokój dzienny	18,1m ²
1.5	Kuchnia z jadalnią	21,4m ²
1.6	Spiżarnia	3,2m ²
1.7	Łazienka z wc	5,8m ²
1.8	Pralnia	6,2m ²
1.9	Pomieszczenie techniczne	16,3m ²
1.10	Kotłownia	13,8m ²



Rys. 6.6. Schemat rzutu poddasza budynku modelowego objętego badaniami

Tabela 6.2. Zestawienie pomieszczeń na poddaszu budynku modelowego objętego badaniami

2.0	Komunikacja pionowa	8,3m ²
2.1	Korytarz	12,3m ²
2.2	Sypialnia	11,2m ²
2.3	WC	2,2m ²
2.4	Sypialnia	12,6m ²
2.5	Garderoba	3,2m ²
2.6	Sypialnia	14,5m ²
2.7	Łazienka z wc	8,5m ²
2.8	Pokój	15,4m ²
2.9	Pokój dzienny	18,1m ²

7. BADANIA LABORATORYJNE

7.1 MATERIAŁ „POLYTECH” – PRÓBA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

Przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z materiału „POLYTECH”. Testy zrealizowano na dwóch różnych urządzeniach. Badaniom wytrzymałości na ściskanie poddano takie elementy, jak:

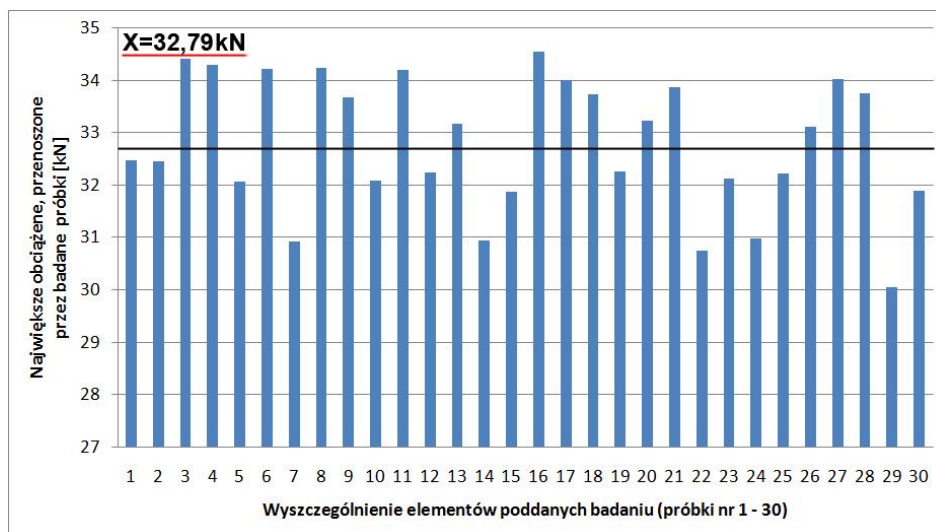
- sześciany o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm, zbadane z wykorzystaniem prasy do betonu z podwójnym tłokiem produkcji Tecnotest S.p.A. (urządzenie ma możliwość zastosowania siły do 3000 kN). Przeprowadzono badania wytrzymałość na ściskanie 30 szt. elementów. Wymiary próbek były zgodne z normą stosowaną podczas badania wytrzymałości betonu na ściskanie.
- sześciany o wymiarach 100 mm x 100 mm x 100 mm, zbadane z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej, klasy „0,5” (zapewniającej dużą dokładność pomiaru, rzędu 0,5 %), produkcji Zwick 020 GmbH, (zbadano wytrzymałość na ściskanie 30 szt. elementów).
- sześciany o wymiarach 50 mm x 50 mm x 50 mm, również zbadano z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick 020 GmbH, (zbadano wytrzymałość na ściskanie 30 szt. elementów).

Badanie przedmiotowych elementów na ściskanie, polegało na oddziaływaniu na nie tłokiem prasy, opuszczanym z góry na jedną z powierzchni [55]. W tabeli 7.1 przedstawiono zestawienie największych obciążeń, przenoszonych przez ściskane elementy, wraz ze zbadaną wytrzymałością na ściskanie (sześciany o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm).

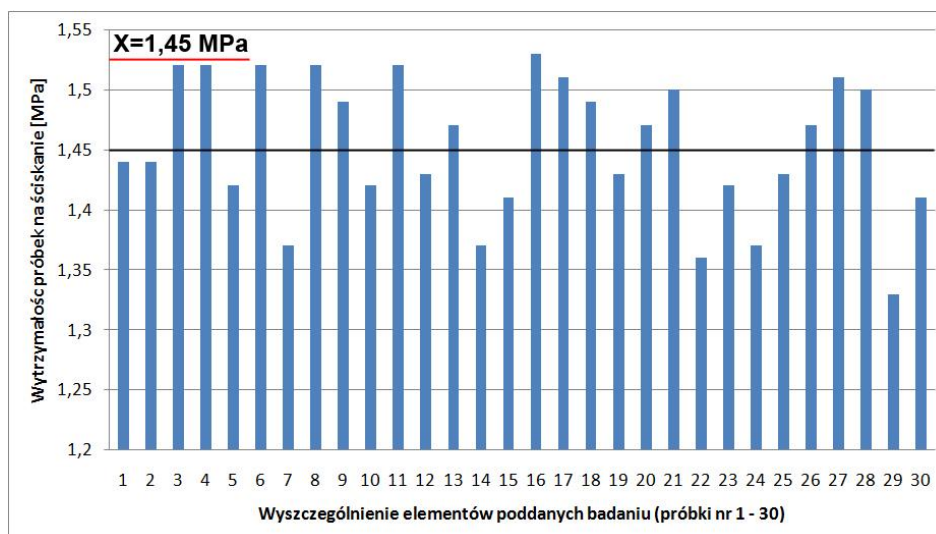
Tabela 7.1. Zestawienie największych obciążeń, przenoszonych przez próbki wykonane z materiału „POLYTECH” i wytrzymałość na ściskanie (sześciiany o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm)

Nr próbki poddanej badaniom	Największe obciążenie przeniesione przez badany element [kN]	Wyznaczona dla elementu wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1.	32,48	1,44
2.	32,45	1,44
3.	34,41	1,52
4.	34,31	1,52
5.	32,06	1,42
6.	34,22	1,52
7.	30,93	1,37
8.	34,25	1,52
9.	33,67	1,49
10.	32,08	1,42
11.	34,20	1,52
12.	32,25	1,43
13.	33,18	1,47
14.	30,94	1,37
15.	31,87	1,41
16.	34,55	1,53
17.	34,01	1,51
18.	33,73	1,49
19.	32,27	1,43
20.	33,23	1,47
21.	33,88	1,50
22.	30,74	1,36
23.	32,12	1,42
24.	30,98	1,37
25.	32,22	1,43
26.	33,12	1,47
27.	34,02	1,51
28.	33,76	1,50
29.	30,04	1,33
30.	31,89	1,41
Wartość średnia	32,79	1,45
Odchylenie standardowe	1,2812	0,0576

Uzyskane dane z przeprowadzonych badań przedstawiono na wykresach 7.1 i 7.2.



Wyk. 7.1. Zestawienie największych obciążeń przenoszonych przez próbki wykonane z materiału „POLYTECH” (sześciiany o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm)



Wyk. 7. 2. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie, ustalonych dla próbek, poddanych badaniom (sześciiany o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm)

Jak wynika z przeprowadzonych badań próbki, wykonane z materiału „POLYTECH” (sześciiany o wymiarach: 150 mm x 150 mm x 150 mm), przenoszą obciążenie od 30,93 kN do 34,48 kN. Oznacza to, iż właściwa

dla nich wytrzymałość na ściskanie, zawiera się w przedziale od 1,33 MPa do 1,53 MPa.

Osobne badania wytrzymałości próbek, wykonanych z materiału „POLYTECH”, przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową Zwick 020 GmbH klasy „0,5” - fotografia 7.1 z przeprowadzonych badań.



Fot. 7.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z materiału „POLYTECH” z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick 020 GmbH klasy „0,5”

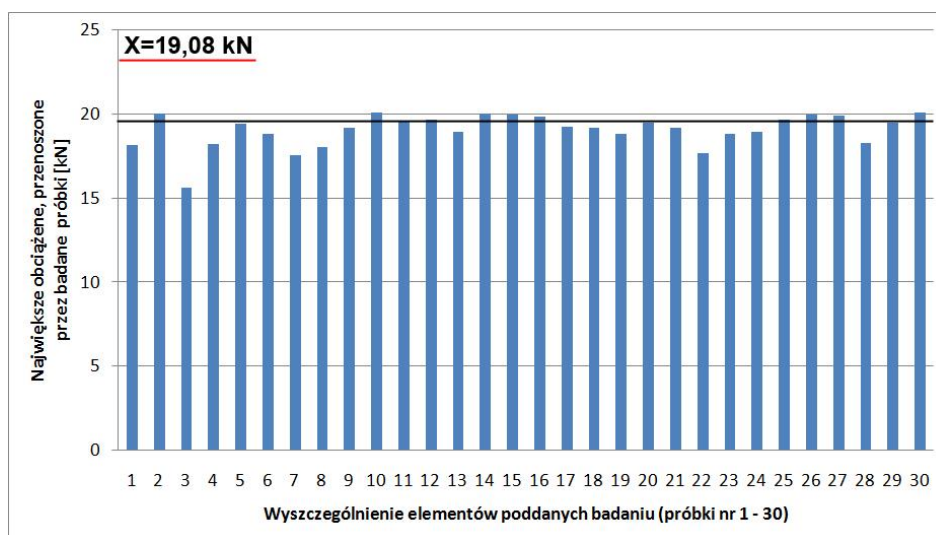
Procedura przeprowadzania badania wytrzymałości na ściskanie, próbek wykonanych z materiału „POLYTECH” (sześciiany o wymiarach 100 mm x 100 mm x 100 mm), z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick 020 GmbH jest analogiczna, jak w poprzednim przypadku. Uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań wyniki zamieszczono w tabeli 7.2.

Tabela 7. 2. Zestawienie największych obciążeń, przenoszonych przez próbki wykonane z materiału „POLYTECH” i wytrzymałość na ściskanie (sześciiany o wymiarach 100 mm x 100 mm x 100 mm)

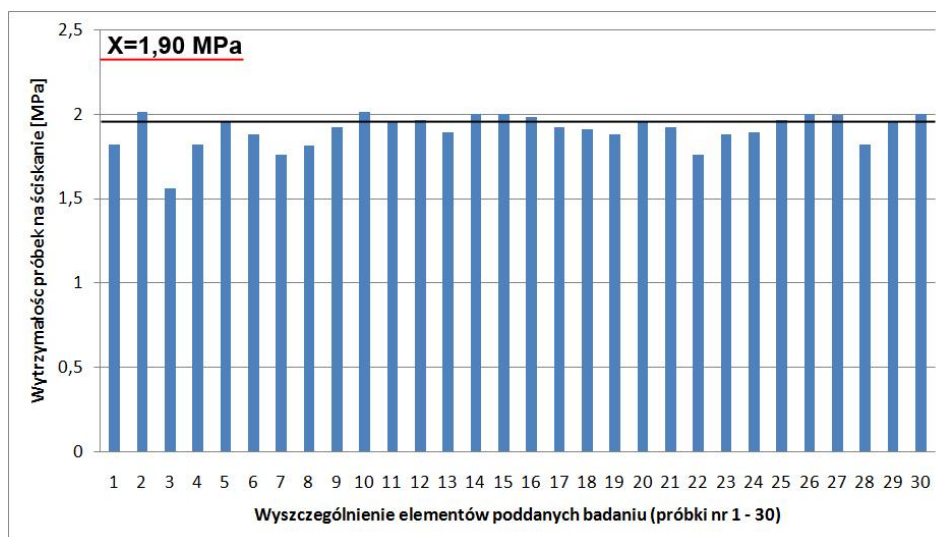
Nr próbki poddanej badaniom	Największe obciążenie przeniesione przez badany element [kN]	Wyznaczona dla elementu wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1.	18,16	1,82
2.	20,03	2,01
3.	15,64	1,56
4.	18,21	1,82
5.	19,45	1,95
6.	18,84	1,88
7.	17,55	1,76
8.	18,07	1,81
9.	19,22	1,92
10.	20,10	2,01
11.	19,59	1,95
12.	19,68	1,96
13.	18,97	1,89
14.	20,04	2,00
15.	20,00	2,00
16.	19,89	1,98
17.	19,24	1,92
18.	19,18	1,91
19.	18,87	1,88
20.	19,52	1,95
21.	19,21	1,92
22.	17,69	1,76
23.	18,87	1,88
24.	18,99	1,89
25.	19,68	1,96
26.	20,01	2,00
27.	19,93	1,99
28.	18,28	1,82
29.	19,52	1,95
30.	20,09	2,00
Wartość średnia	19,08	1,90
Odchylenie standardowe	0,9841	0,0982

Wyniki badań przeprowadzonych, z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Zwick 020 GmbH, są bardziej zróżnicowane (tab. 7.2), w porównaniu do poprzednich analiz. Obciążenia przenoszone przez badane próbki, zawierają się w przedziale od 15,64 kN do 20,10 kN. Określa to

wytrzymałość na ściskanie badanych próbek w przedziale od 1,76 MPa do 2,01 MPa. Wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych badań przedstawiono na wykresach 7.3 i 7.4.



Wyk. 7.3. Zestawienie największych obciążeń przenoszonych przez próbki wykonane z materiału „POLYTECH” (sześciiany o wymiarach 100 mm x 100 mm x 100 mm)



Wyk. 7.4. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie, ustalonych dla próbek, poddanych badaniom (sześciiany o wymiarach 100 mm x 100 mm x 100 mm)

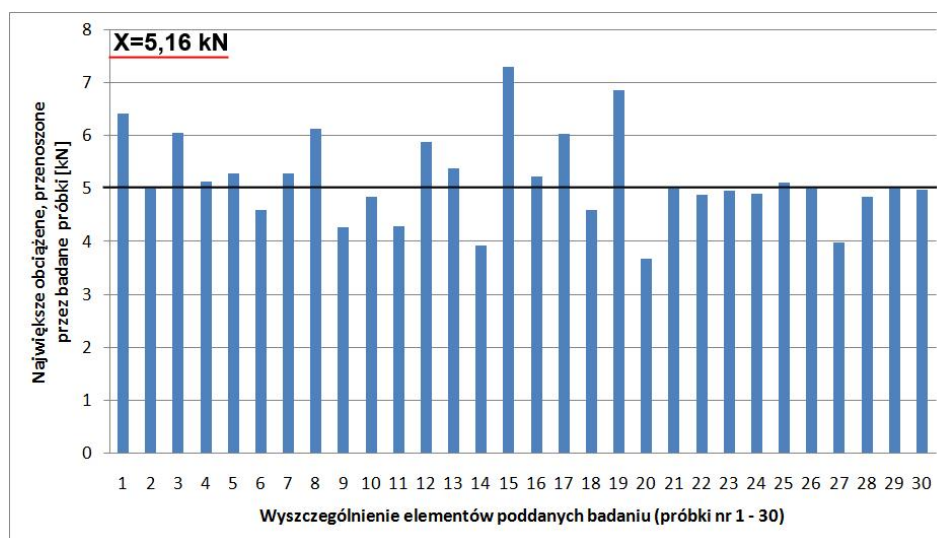
Przeprowadzono kolejne badania wytrzymałości na ściskanie próbek, wykonanych z materiału „POLYTECH” (sześciiany o wymiarach 50 mm x 50 mm x 50 mm). Procedura jest analogiczna, jak w poprzednim przypadku. Uzyskane podczas przeprowadzonych testów wyniki, zamieszczono w tabeli 7.3.

Tabela 7. 3. Zestawienie największych obciążeń, przenoszonych przez próbki wykonane z materiału „POLYTECH” i wytrzymałość na ściskanie (sześciiany o wymiarach 50 mm x 50 mm x 50 mm)

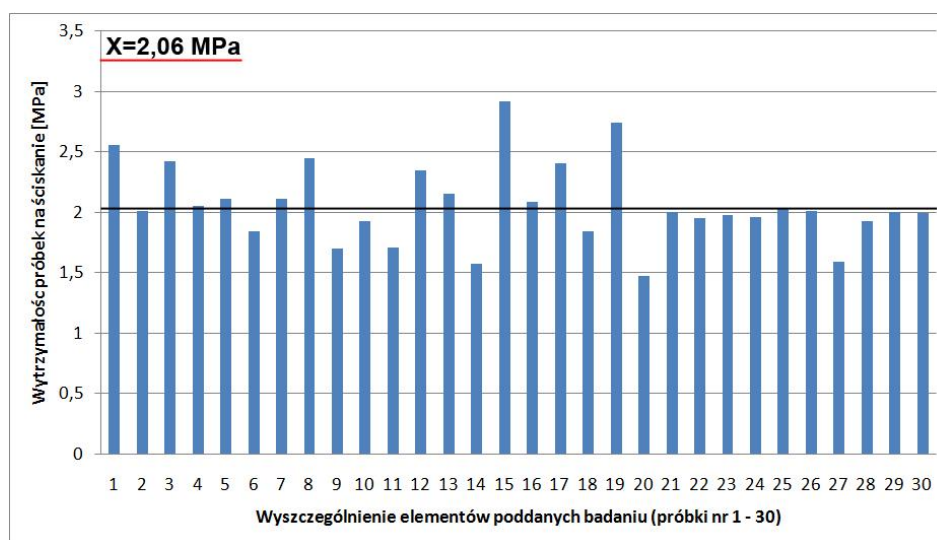
Nr próbki poddanej badaniom	Największe obciążenie przeniesione przez badany element [kN]	Wyznaczona dla elementu wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	6,42	2,56
2	5,04	2,01
3	6,06	2,42
4	5,13	2,05
5	5,28	2,11
6	4,60	1,84
7	5,28	2,11
8	6,13	2,45
9	4,26	1,70
10	4,84	1,93
11	4,28	1,71
12	5,89	2,35
13	5,39	2,15
14	3,93	1,57
15	7,31	2,92
16	5,23	2,09
17	6,03	2,41
18	4,60	1,84
19	6,86	2,74
20	3,68	1,47
21	5,01	2,00
22	4,88	1,95
23	4,97	1,98
24	4,91	1,96
25	5,11	2,04
26	5,03	2,01
27	3,98	1,59
28	4,84	1,93
29	5,01	2,00
30	4,99	1,99
Wartość średnia	5,16	2,06
Odchylenie standardowe	0,8309	0,3317

Analiza wykazała, że w porównaniu do poprzednich, wcześniejszych badań,

obciążenia przenoszone przez przedmiotowe elementy zawierają się w przedziale od 3,68 kN do ponad 7,31 kN. Wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych badaniu jest w przedziale od 1,47 MPa do ponad 2,92 MPa. Wyniki badań zilustrowano na wykresach 7.5 i 7.6.

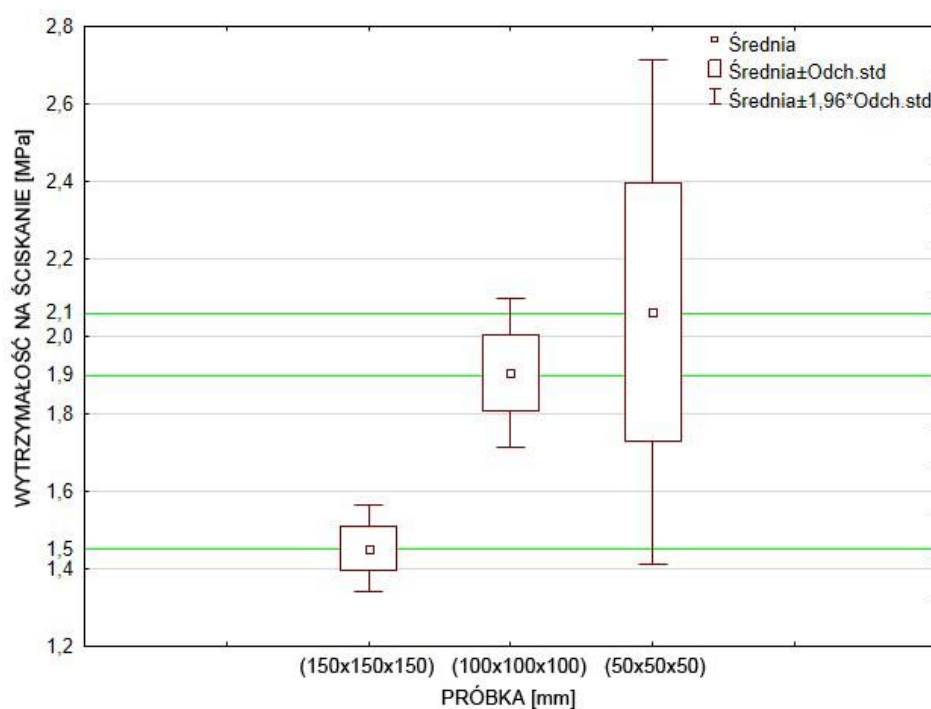


Wyk. 7.5. Zestawienie maksymalnych obciążeń przenoszonych przez elementy prefabrykowane z materiału „POLYTECH” (sześciiany o wymiarach 50 mm x 50 mm x 50 mm)



Wyk. 7.6. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie, ustalonych dla próbek, poddanych badaniom (sześciiany o wymiarach 50 mm x 50 mm x 50 mm)

Wykres 7.7 przedstawia zestawienie średnich wartości wytrzymałości na ściskanie badanych próbek o wymiarach 50 x 50 x 50, 100 x 100 x 100 i 150 x 150 x 150 wykonanych z materiału „POLYTECH” oraz odchylenie standardowe.



Wyk. 7.7. Wykres pudełkowy przedstawiający średnie wartości wytrzymałości na ściskanie badanych próbek o wymiarach 50 x 50 x 50 mm, 100 x 100 x 100 mm i 150 x 150 x 150 mm wykonanych z materiału „POLYTECH” i odchylenie standardowe

Z wykresu 7.7 wynika, iż w zależności od rodzaju, próbki średnie wartości wytrzymałości na ściskanie znajdują się w przedziale od 1,45 MPa do 2,06 MPa. Średnie odchylenie wartości wytrzymałości wszystkich próbek wynosi 0,163. Minimalna średnia wytrzymałość na ściskanie próbki kształtuje się na poziomie 1,45 MPa, a maksymalna 2,06 MPa. Próbki 50 x 50 x 50 mm o średniej wartości wytrzymałość na ściskanie 2,06 MPa posiadają największą wartość odchylenia standardowego wynoszącą 0,3317.

Jak wynika z przeprowadzonych badań, wytrzymałość na ściskanie próbek z materiału „POLYTECH”, odbiega od analogicznych parametrów porównywalnych elementów, wykonanych np. z betonu. Pomimo otrzymanych niższych parametrów wytrzymałościowych materiał ten jest atrakcyjny i może znaleźć szerokie zastosowanie w budownictwie.

Próbki o wymiarach 150 mm x 150 mm x 150 mm wykazały średnią wartość wytrzymałości na ściskanie na poziomie 1,45 MPa.

Próbki o wymiarach 100 mm x 100 mm x 100 mm wykazały średnią wartość wytrzymałości na ściskanie na poziomie 1,90 MPa.

Próbki o wymiarach 50 mm x 50 mm x 50 mm wykazały średnią wartość wytrzymałości na ściskanie na poziomie 2,06 MPa.

Po przeanalizowaniu wyników badań ustalono, iż rozbieżności związane z inną wytrzymałością na ściskanie poszczególnych rodzajów próbek wynikają ze sposobu przygotowania elementów do analiz. Próbki w postaci sześciątów 150 mm x 150 mm x 150 mm były pozyskane na zasadzie wycinania z belek o wymiarach 150 mm x 150 mm x 1200 mm. Próbki w postaci sześciątów 100 mm x 100 mm x 100 mm i 50 mm x 50 mm x 50 mm wycięto z bloków o wymiarach 600 mm x 600 mm. Materiał „POLYTECH” wykazywał lepsze parametry wytrzymałościowe w większych formach przeznaczonych do badań. Taki sposób przygotowania, umożliwił równomierne rozmieszczenie składników w mieszance, zastosowanej do wykonania próbek.

Kolejnym etapem analiz było przeprowadzenie prób na zginanie belek z przedmiotowego materiału.

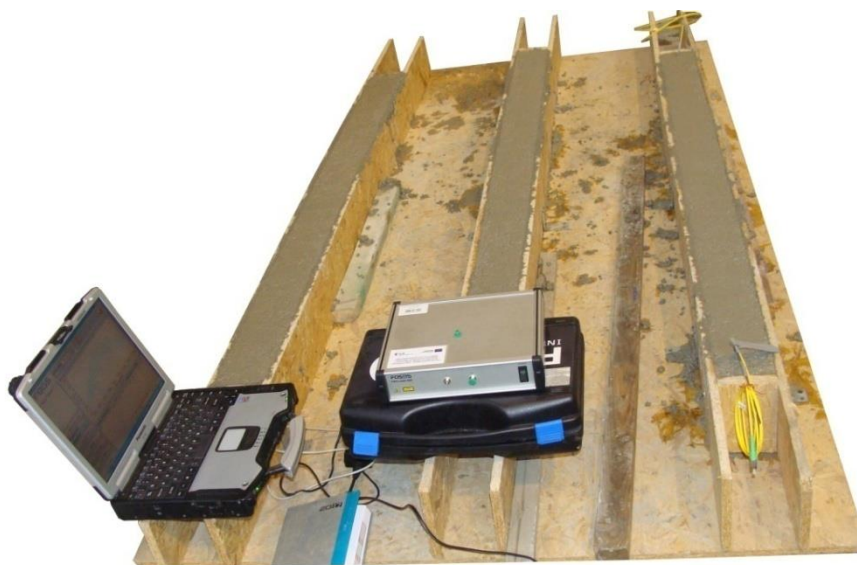
Do przeprowadzonych badań wykorzystano technikę światłowodową – światłowody jednomodowe z naniesioną w ramach ich rdzenia siatką Bragga oraz interrogator optyczny. Dzięki tym urządzeniom uzyskano szereg dokładnych danych, które pozwoliły pozyskać informacje dotyczące elementów wykonywanych z materiału „POLYTECH”.

7.2 PRÓBA ZGINANIA BELEK Z MATERIAŁU „POLYTECH”

7.2.1 ZGINANIE – BELKA Z CZUJNIKIEM FBG UMIESZCZONYM WEWNĄTRZ PRÓBKI BSW

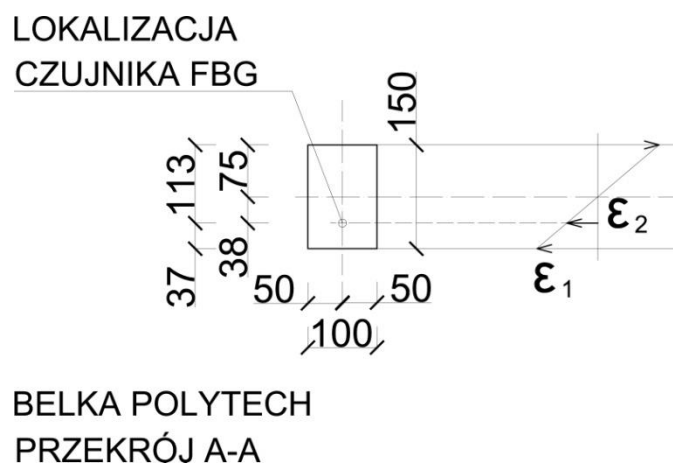
Belka I – światłowód z czujnikiem FBG wewnątrz belki „BSW”

Obiektem badań jest belka z materiału „POLYTECH” o łącznej długości 1700 mm i wymiarach przekroju poprzecznego: 150 mm x 100 mm. Element ten zaprezentowano na fotografii 7.2.



Fot. 7.2. Belki z materiału „POLYTECH” (etap realizacji elementów do badań)

Belka została wyposażona, już na etapie wykonywania, w światłowodowy czujnik FBG. Po podłączeniu sensor współpracował z optycznym interrogatorem i rejestratorem wyposażonym w odpowiednie oprogramowanie. Rozwiązanie to umożliwiała dokonywanie precyzyjnych pomiarów odkształcenia, jakiemu ulegała belka pod zadawanym jej obciążeniem [65]. Lokalizację włókna światłowodowego z czujnikiem na powierzchni przekroju poprzecznego opisywanego elementu przedstawiono na rysunku 7.1.



Rys.7.1. Lokalizacja czujnika FBG w przekroju poprzecznym badanego elementu

Mając na uwadze wymiary analizowanego elementu, wyznaczono dla badanej belki główny, centralny moment bezwładności jej przekroju poprzecznego, względem osi z, korzystając ze wzoru:

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

gdzie:

I_z – moment bezwładności przekroju badanego elementu [mm^4]

b – szerokość badanego elementu

h – wysokość badanego elementu

Następnie dla przedmiotowego przypadku wyznaczono wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie [56]. W analizowanym elemencie, szczególnie istotną kwestią jest lokalizacja czujnika światłowodowego. W przekroju poprzecznym badanej belki – czujnik ten umieszczono 38 mm poniżej środka ciężkości przedmiotowego przekroju. Wskaźnik wytrzymałości wyznaczono jako iloraz obliczonego uprzednio momentu bezwładności oraz odległości dzielącej środek ciężkości od miejsca, w którym w ramach przekroju poprzecznego (badanego

elementu) ulokowano czujnik światłowodowy [64]:

$$W_z = \frac{I_z}{Y} \quad (2)$$

gdzie:

W_z – wartość wskaźnika wytrzymałości przekroju badanego elementu na zginanie [mm^2]

I_z – moment bezwładności przekroju badanego elementu [mm^4]

Y – odległości dzieląca środek ciężkości od miejsca, w którym w ramach przekroju poprzecznego (badanego elementu) ulokowano czujnik światłowodowy

W ramach prowadzonych doświadczeń, wartość tę uwzględniono, podczas obliczania moduł Younga.

Następnie przeprowadzono szereg testów, polegających na oddziaływaniu różnych rodzajów obciążeń na belkę z materiału „POLYTECH”. Przed przyłożeniem do elementu obciążenia, pod jego dolną krawędzią każdorazowo, umieszczano dodatkowo klasyczny, cyfrowy czujnik ugięcia. Jego wskazania porównywano następnie z odczytami uzyskiwanymi z interrogatora, analizującego długość fali świetlnej ze światłowodu.

Celem przeprowadzania badań była weryfikacja:

- wytrzymałości badanego elementu na zginanie z udziałem sił poprzecznych,
- nośności badanego elementu na ścinanie, w warunkach jego zginania, ze szczególnym uwzględnieniem parametru, jakim jest wskaźnik ścinania (uwzględnionego jako iloraz odległości przyłożonego do belki obciążenia od podpory oraz wysokości użytecznej przekroju elementu).

W ramach badań wykonano 5 różnych testów. Podczas pierwszego testu

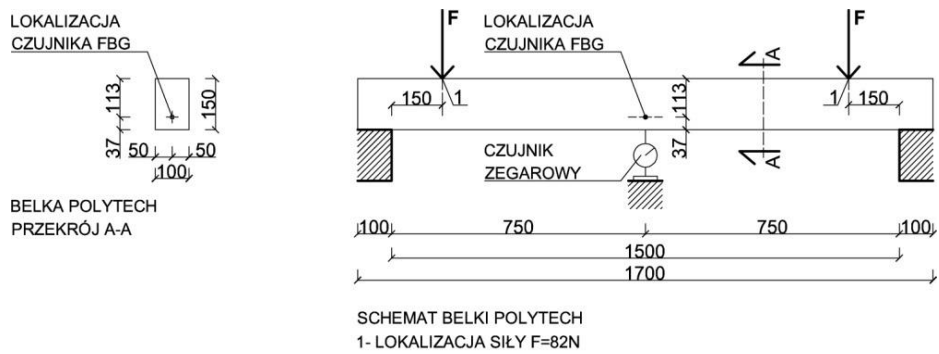
przedmiotową belkę umieszczono na dwóch podporach w taki sposób, iż jej rozpiętość w świetle wynosiła: 1500 mm. Następnie na jej górnej powierzchni wyznaczono 9 punktów, w których następnie przykładano obciążenie:

- punkt centralny, znajdujący się na środku długości belki w odległości 750 mm od podpory, oznaczony jako p. 5 (rys. 7.2),
- 8 szt. punktów pośrednich, po 4 szt. z każdej strony punktu centralnego, oddalone od siebie symetrycznie o 150 mm – w odległościach 150 mm, 300 mm, 450 mm oraz 600 mm od podpory, oznaczone odpowiednio jako: p.1, p.2, p.3, p.4 (rys.7.3, rys. 7,4 i rys. 7.5)

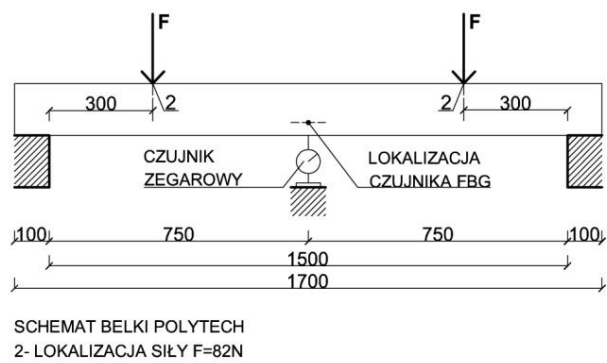
Obciążenie do belki przykładane było za pomocą 2 szt. legalizowanych obciążników powodujących siłę 82 N każdy. Obciążniki te układane były jednocześnie parami na górnej powierzchni belki, w wyznaczonych punktach. W ramach eksperymentu uzyskano 5 różnych ustawień legalizowanych obciążników na badanej belce:

1. 2 szt. legalizowanych obciążników w 2 punktach pośrednich skrajnych, obu oddalonych o 150 mm od podpór – p.1 (rys.7.2),
2. 2 szt. legalizowanych obciążników w 2 punktach pośrednich wewnętrznych, obu oddalonych o 300 mm od podpór – p.2 (rys. 7.3),
3. 2 szt. legalizowanych obciążników w 2 punktach pośrednich wewnętrznych, obu oddalonych o 450 mm od podpór – p.3 (rys. 7.4),
4. 2 szt. legalizowanych obciążników w 2 punktach pośrednich wewnętrznych, obu oddalonych o 600 mm od podpór – p.4 (rys. 7.5),
5. 2 szt. legalizowanych obciążników w punkcie centralnym, zlokalizowanym po środku badanej belki – p.5 (rys. 7.6).

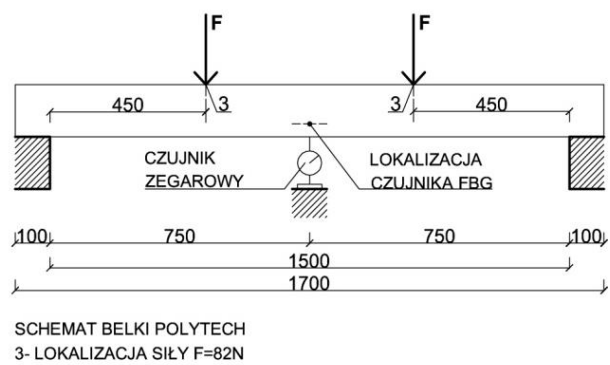
Opisaną sytuację ilustrują rysunki 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6.



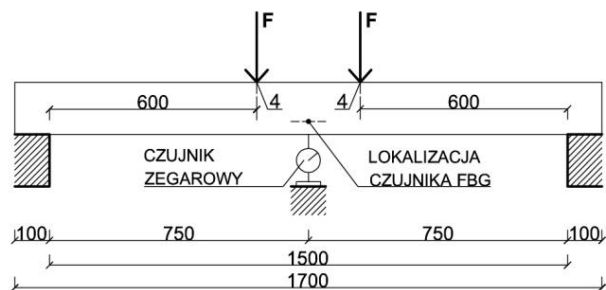
Rys.7.2. Etap -1 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH” – p.1



Rys. 7.3. Etap -2 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH” – p.2

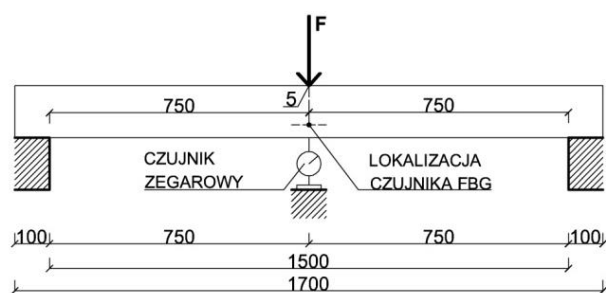


Rys. 7.4. Etap -3 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH” – p.3



SCHEMAT BELKI POLYTECH
4- LOKALIZACJA SIŁY F=82N

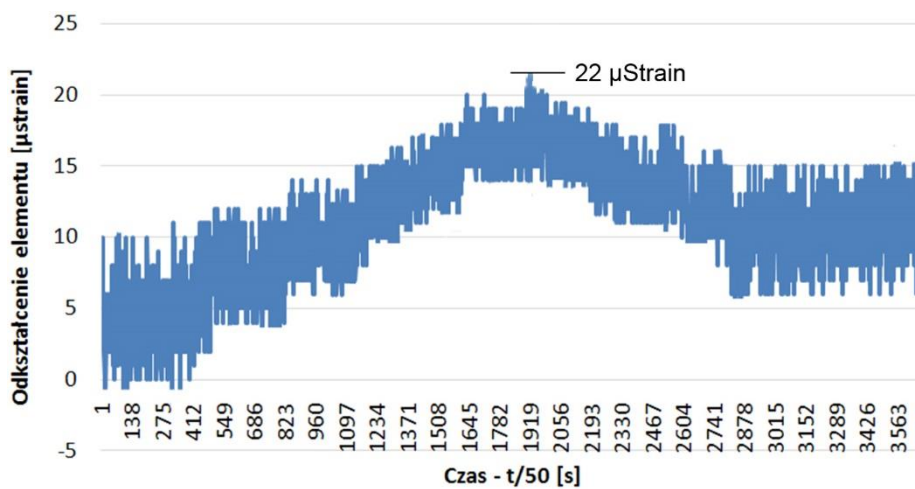
Rys. 7.5. Etap -4 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH”) – p.4



SCHEMAT BELKI POLYTECH
5- LOKALIZACJA SIŁY F=164N

Rys. 7.6. Etap -5 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH”) – p.5

Faza badawcza trwała 73,68 s. W tym czasie interrogator optyczny wykonał 3684 szt. jednostkowych pomiarów, przypisując każdej analizowanej jednostce czasu (0,02 s) indywidualny wynik mierzonego ugięcia badanego elementu w mikrostrainach. Maksymalna zmierzona w trakcie trwania testu wartość ugięcia badanego elementu w mikrostrainach to: 22 μ Strain. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych przez system (interrogator optyczny, analizujący dane z czujnika, umieszczonego w belce) prezentuje wykres 7.8 (jednostki czasu na osi odciętych, wartości odkształcenia w mikrostrainach na osi rzędnych).



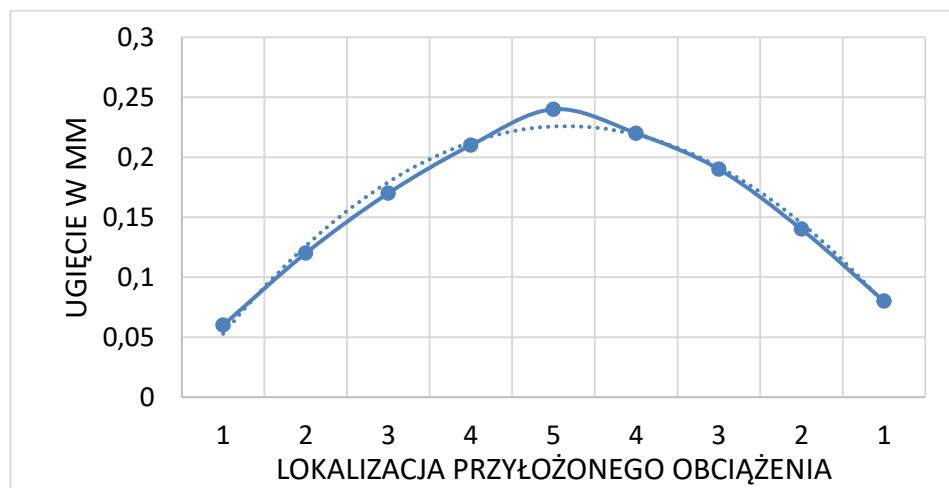
Wyk. 7.8. Zarejestrowane odkształcenie podczas próby obciążenia belki z materiału „POLYTECH”

Na górnej powierzchni belki przykładano obciążniki zgodnie z rysunkami 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6. Na podstawie odczytów z umieszczonego pod belką cyfrowego wskaźnika ugięcia rejestrowano strzałkę ugięcia belki. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Wartości ugięcia badanego elementu, pod wpływem zadanego mu obciążenia (moment zginający) - w ramach przeprowadzonego testu nr 1

Wartość przykładanego obciążenia: 2 x 82 N			
Kierunek przemieszczenia obciążenia na górnej powierzchni belki: podpora – środek			
Wyszczególnienie punktów lokalizacji obciążenia	Ugięcie [mm]	Wartość wskaźnika ścinania	Wartość maksymalnego momentu zginającego [Nm]
1	0,06	1,0	12,3
2	0,12	2,0	24,6
3	0,17	3,0	36,9
4	0,21	4,0	49,2
5	0,24	5,0	61,5
Kierunek przemieszczenia obciążenia na górnej powierzchni belki: środek – podpora			
Wyszczególnienie punktów lokalizacji obciążenia	Ugięcie [mm]	Wartość wskaźnika ścinania	Wartość maksymalnego momentu zginającego
4	0,22	1,0	49,2
3	0,19	2,0	36,9
2	0,14	3,0	24,6
1	0,08	4,0	12,3

Wartości ugięcia belki, uzyskiwane dla poszczególnych lokalizacji obciążenia zaprezentowano na wykresie 7.9.



Wyk. 7.9. Liniowa zależność pomiędzy wartością działającego momentu zginającego, a ugięciem badanego elementu, zaobserwowano podczas testu nr 1

W rezultacie przeprowadzonego badania nie doszło do uszkodzenia belki – po zdjęciu obciążenia belka nie wykazywała pęknięć ani żadnych trwałych odkształceń. Po ostatecznym zdjęciu z belki obciążenia wskazania, czujnika cyfrowego umieszczonego pod belką, były zbliżone do poziomu 0,00 mm.

Na podstawie danych, uzyskanych w ramach przeprowadzonego testu (nr 1) podjęto próbę, wyznaczenia jednego z kluczowych parametrów, determinujących właściwości odkształceń analizowanego materiału – modułu Younga. Parametr ten wyznaczano dwoma metodami:

I - z przekształconego wzoru analitycznego na strzałkę ugięcia (wyznaczoną za pomocą czujnika cyfrowego) belki obciążoną siłą F:

$$E = \frac{FL^2a}{8f_{\max}I_z} \quad (3)$$

gdzie:

- F – siła oddziałująca na badany element [N],
- L – odległość pomiędzy siłami oddziałującymi na badany element [mm],
- a – odległość pomiędzy siłami oddziałującymi na badany element a podporami [mm],
- I_z – moment bezwładności przekroju badanego elementu [mm⁴],
- f_{\max} – ugięcie badanego elementu wskazywane przez czujnik cyfrowy [mm],

II - na podstawie pomiarów odkształceń ϵ za pomocą czujnika FBG:

$$E = \frac{M_g}{\epsilon W_z} \quad (4)$$

gdzie:

- ε – wartość odkształcenia badanego elementu, wskazywana przez interogator [μStrain],
- M_g – wartość momentu gnącego, oddziałującego na badany element, w danym stadium eksperymentu [Nm],
- W_z – wartość wskaźnika wytrzymałości przekroju badanego elementu na zginanie [mm^2].

Wartość modułu Younga wyznaczona eksperymentalnie podczas testu nr 1 wyniosła 1312 MPa.

Tabela 7.5 przedstawia wyznaczone wartości modułu Younga na podstawie pomiarów odkształceń FBG.

Tabela 7.5. Wartość modułu Younga badanego materiału wyznaczona podczas testu nr 1 – wzór wykorzystujący dane z interrogatora

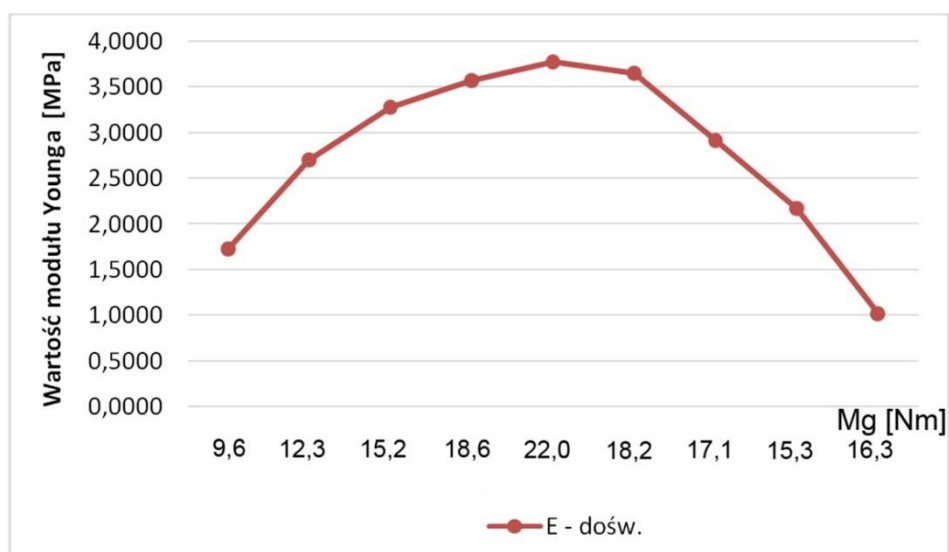
Eksperyment nr 1 - wyznaczenie modułu Younga na podstawie danych z interrogatora				
1	Mg	12,3	E:	9,6
	Wz	740131,57	E:	1731,1
2	Mg	24,6	E	12,3
	Wz	740131,57	E:	2702,2
3	Mg	36,9	E	15,2
	Wz	740131,57	E:	3280,0
4	Mg	49,2	E	18,6
	Wz	740131,57	E:	3573,9
5	Mg	61,5	E	22
	Wz	740131,57	E:	3777,0
4	Mg	49,2	E	18,2
	Wz	740131,57	E:	3652,5
3	Mg	36,9	E	17,1
	Wz	740131,57	E:	2915,6
2	Mg	24,6	E	15,3
	Wz	740131,57	E:	2172,4
1	Mg	12,3	E	16,3
	Wz	740131,57	E:	1019,6

W tabeli 7.6 porównano wartości modułu Younga materiału „POLYTECH” podczas testu nr 1 z wykorzystaniem dwóch metod pomiaru.

Tabela 7.6. Porównanie wartości modułu Younga badanego materiału wyznaczonej podczas testu nr 1 z wykorzystaniem dwóch metod pomiaru

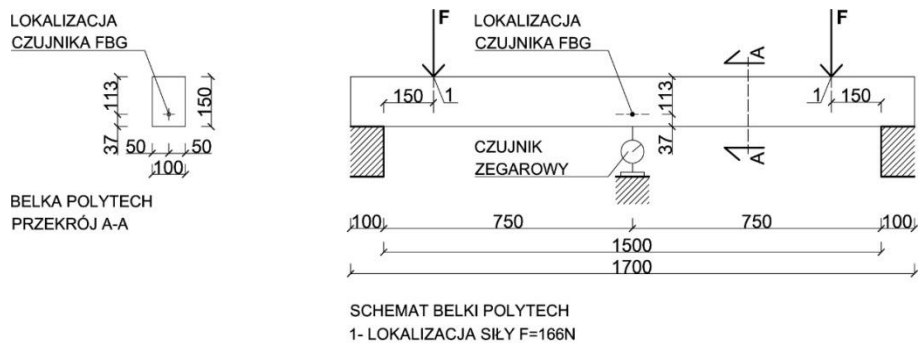
Etap:	Wartość modułu Younga elementu (na podstawie danych eksperymentalnych)
1	1731,1
2	2702,2
3	3280,0
4	3573,9
5	3777,0
4	3652,5
3	2915,6
2	2172,4
1	10196

Wykres 7.10 przedstawia wartości modułu Younga wyznaczone podczas testu nr 1.

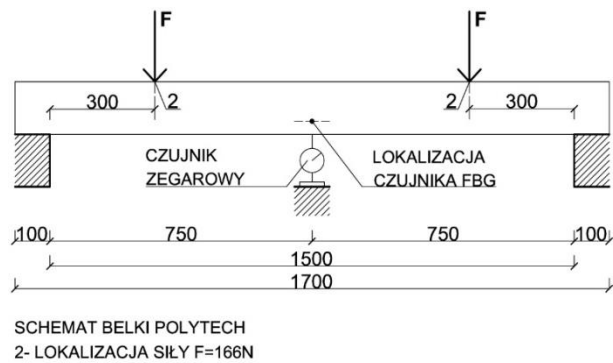


Wyk. 7.10. Wartości modułu Younga badanego materiału wyznaczone podczas testu nr 1

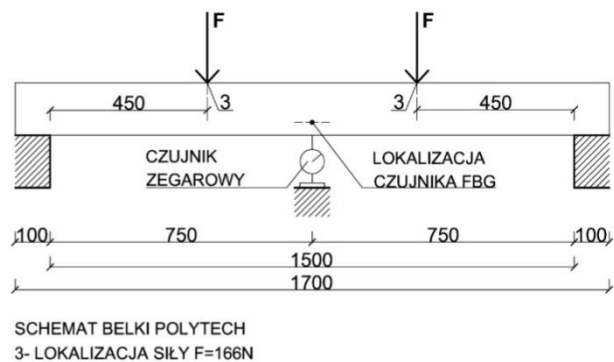
Test nr 2 przeprowadzony został w analogiczny sposób, jak test nr 1, jednakże z tą różnicą, że zwiększono obciążenie do 166 N. Opisaną sytuację ilustrują rysunki 7.7, 7.8, 7.9, 7.10.



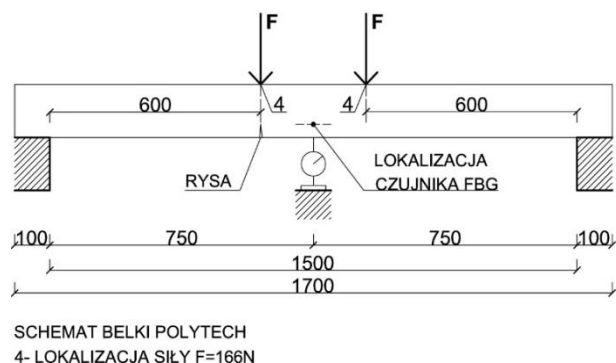
Rys. 7.7. Etap -1 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH”)



Rys. 7.8. Etap -2 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH”)

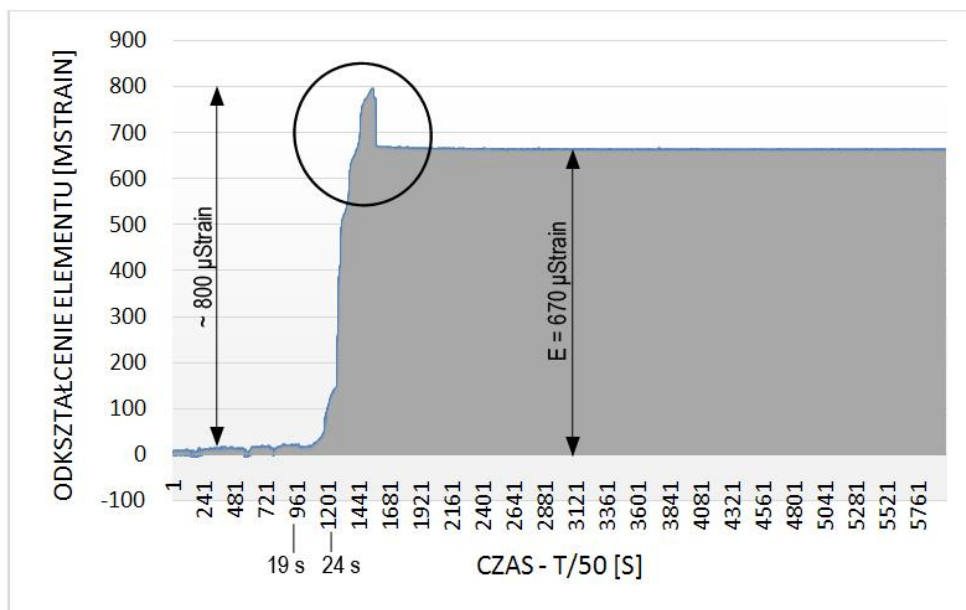


Rys. 7.9. Etap -3 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH”)

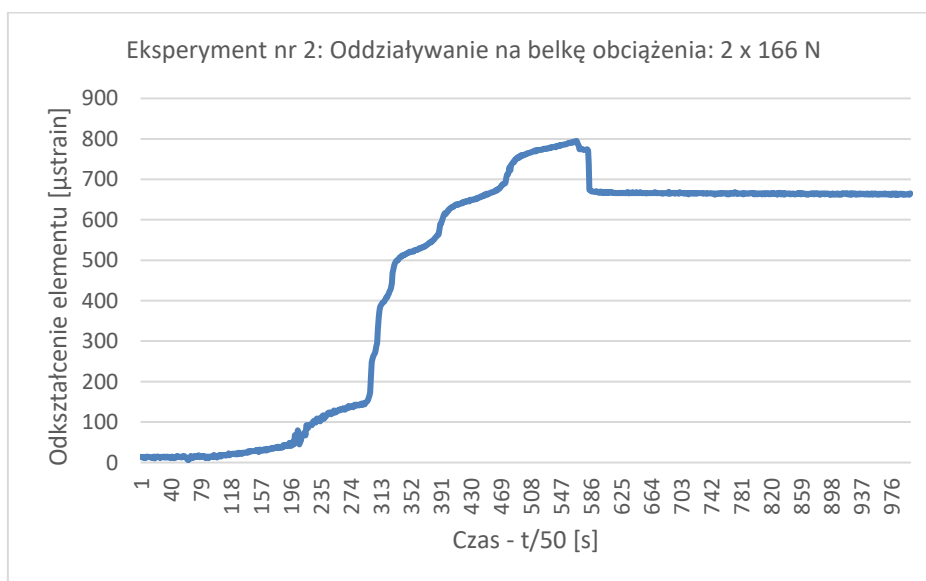


Rys. 7. 10. Etap -4 badania (schemat belki wykonanej z materiału „POLYTECH”)

Faza badawcza testu nr 2 trwała 119,7 s. W tym czasie interrogator optyczny wykonał 5986 pomiarów, przypisując każdej analizowanej jednostce czasu (0,02 s) indywidualny wynik mierzonego odkształcenia, badanego elementu w mikrostrainach. W trakcie trwania testu, największa zmierzona wartość odkształcenia badanego elementu wyniosła 795 μ Strain. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych przez system (interrogator optyczny, analizujący dane z czujnika, umieszczonego w belce) przedstawiono na wykresach 7.11 i 7.12 (jednostki czasu na osi odciętych, wartości odkształcenia w mikrostrainach na osi rzędnych).



Wyk. 7.11. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych w ramach testu nr 2



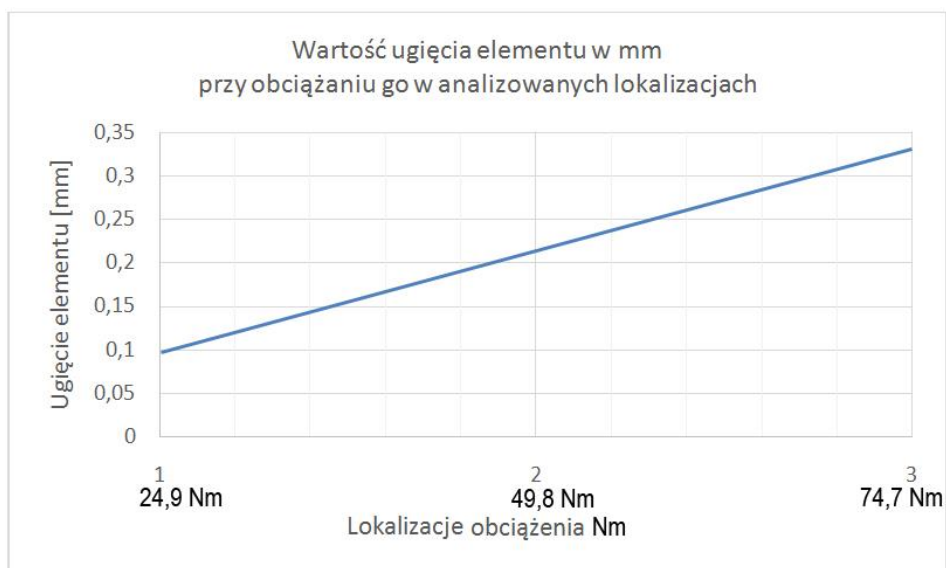
Wyk. 5.12. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych w ramach eksperymentu nr 2 –
– prezentacja szczegółowych danych z zakresu zawężonego

W trakcie testu nr 2, analizowano jednocześnie wskazania z umieszczonego pod belką czujnika ugięcia. Uzyskane wyniki zaprezentowano w tab. nr 7.7.

Tabela 7.7. Wartości ugięcia badanego elementu, pod wpływem zadanego mu obciążenia w ramach przeprowadzonego testu nr 2

Wartość przykładanego obciążenia: 2 x 166 N			
Kierunek postępu elementów stalowych po górnej powierzchni belki: podpora – środek			
Wyszczególnienie punktów lokalizacji obciążenia	Ugięcie [mm]	Wartość wskaźnika ścinania	Wartość maksymalnego momentu zginającego [Nm]
1	0,1	1,0	24,9
2	0,21	2,0	49,8
3	0,33	3,0	74,7
4	Destrukcja elementu, brak odczytu pomiaru	4,0	99,6

Podobnie jak miało to miejsce w przypadku testu nr 1, tak również w przypadku testu nr 2 zaobserwowano liniową zależność pomiędzy wartością ugięcia, uzyskiwaną w poszczególnych analizowanych lokalizacjach, a działającym na badany element momentem zginającym (jego wartość bezpośrednio związana jest z lokalizacją, w której przykładane było obciążenie). Zależność tę obserwowano jednakże do momentu, w którym nastąpiła destrukcja badanego elementu (przyłożenie obciążenia w punkcie nr 4). Zaprezentowano to na wykresie 7.13.



Wyk. 7.13. Liniowa zależność pomiędzy wartością działającego momentu zginającego, a ugięciem badanego elementu, zaobserwowana w ramach eksperymentu nr 2

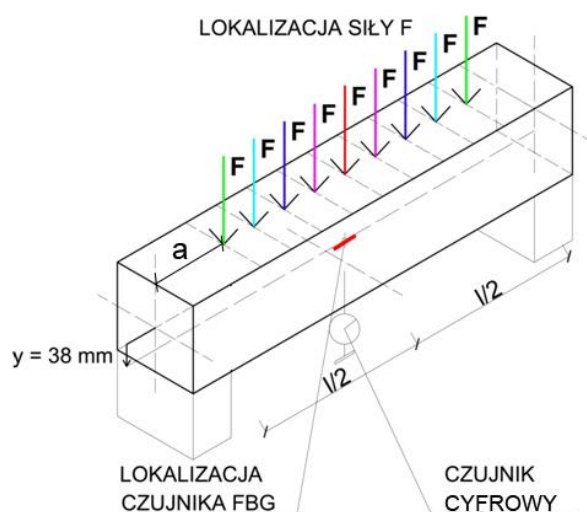
Uszkodzenia badanej belki zaprezentowano na fotografii nr 7.3.



Fot. 7.3. Obiekt badań zniszczony w rezultacie przeprowadzonego testu nr 2, etap 4

Na etapie 4 po przyłożeniu, obciążenia $2 \times 166 \text{ N} = 332 \text{ N}$, nastąpiło pęknięcie w miejscu przyłożenia siły F (rys. 7.10). Pęknięcie to zostało zarejestrowane przez czujnik FBG pomiędzy 19 a 24 sekundą badania, gdzie odkształcenie skokowo wzrastało o $800 \mu\text{Strain}$. Po odciążeniu belki, pozostało odkształcenie trwałe wynoszące $670 \mu\text{Strain}$.

Po przeanalizowaniu wyników badań i biorąc pod uwagę, iż czujnik światłowodowy z siatką Bragga jest wykonany na bazie światłowodu z włókna szklanego ustalono, iż te właściwości miały bezpośredni wpływ na lokalizację sensora [66]. Umieszczenie czujnika FBG w formie, a następnie ułożenie mieszanki „POLYTECH”, powodowało zerwanie bądź uszkodzenie czujnika. W celu wyeliminowania tego niekorzystnego zjawiska, czujnik przyklejono do pręta $\varnothing 2 \text{ mm}$, który umieszczono w formie. Takie rozwiązanie zabezpieczyło przed uszkodzeniem czujnika FBG (rys. 7.11).

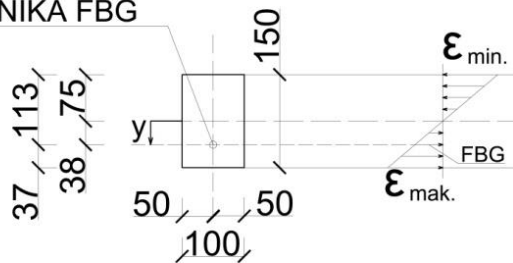


Rys. 7.11. Schemat pomiaru odkształceń czujnikiem FBG i strzałki ugięcia (kolory oznaczają poszczególne etapy badań)

Przeprowadzono próby zginania zarówno 3 i 4 punktowego.

Czujnik umieszczony był w odległości 38 mm od osi centralnej próbki (rys.7.12).

LOKALIZACJA
CZUJNIKA FBG



BELKA POLYTECH
PRZEKRÓJ A-A

Rys. 7.12. Lokalizacja czujnika FBG w przekroju poprzecznym badanego elementu

Włókna belki oddalone o $y = 38$ mm od osi obojętnej zginania charakteryzuje wskaźnik wytrzymałości:

$$W_z = \frac{I_z}{Y} \quad (2)$$

Moment gnący:

$$M_g = F \cdot a \quad (5)$$

Zastępczą wartość modułu Younga E_z wyznaczono w oparciu o:

a) wyznaczone doświadczalnie ugięcie belki:

$$E_z = \frac{F l^2 a}{8 I_z \cdot f} \quad (6)$$

$$E_z = \frac{F l^3}{48 I_z \cdot f} \quad (7)$$

dla siły umieszczonej centralnie

$$E_z = 2342,85 \text{ MPa}$$

gdzie:

F - siła obciążenie,

l - rozpiętość belki,

a - odległość między podporami,

I_z - moment bezwładności,

f - ugięcie belki.

b) wyznaczone doświadczalnie odkształcenie belki za pomocą sensora FBG:

$$E_z^{\text{FBG}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

gdzie:

σ - naprężenia zginające,

ε - wartość odkształcenia badanego elementu,

$\varepsilon = 22 \mu\text{Strain}$.

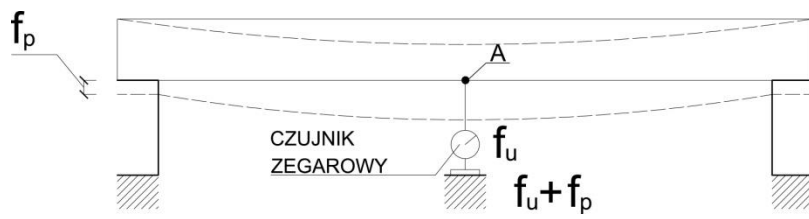
$$E_z^{\text{FBG}} = 3776,97 \text{ MPa}$$

Zastępcza wartość modułu E wyznaczona dla belki w punkcie A jest ilorazem wartości naprężenia σ przez wyznaczone doświadczalnie odkształcenie (rys. 7.13).

Natomiast wartość wyznaczona wewnątrz belki informuje o odkształceniu czujnika umieszczonego na pręcie o $\varnothing 2 \text{ mm}$. Jest ona większa ze względu na funkcje zbrojenia jaką pełni pręt.

Mniejsza wartość modułu E_z wynika z faktu odkształcenia badanej próbki na podporach.

Wpływ odkształcenia belki na podporach przedstawiono na rysunku 7.13.



Rys. 7.13. Wpływ odkształcenia belki na podporach (f_u - ugięcie belki, f_p - ugięcie podpór)

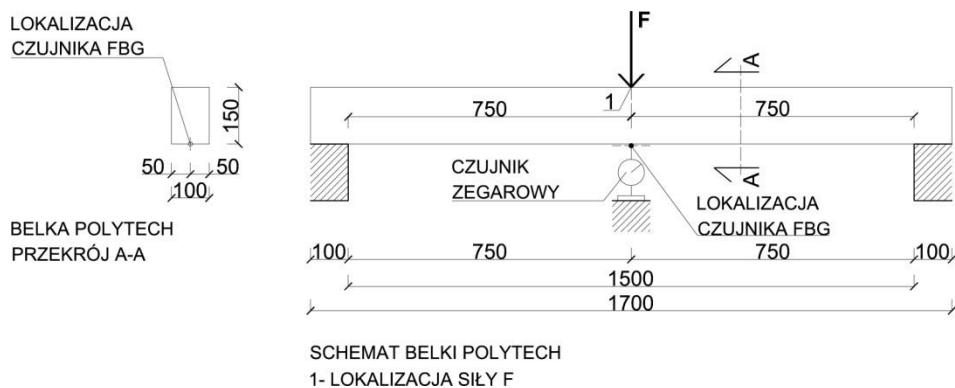
7.2.2 ZGINANIE – BELKA Z MATERIAŁU „POLYTECH” Z CZUJNIKIEM FBG UMIESZCZONYM CENTRALNIE NA DOLNEJ POWIERZCHNI PRÓBKII „BSZ”

Belka II – światłowód z czujnikiem FBG na zewnątrz belki „BSZ”

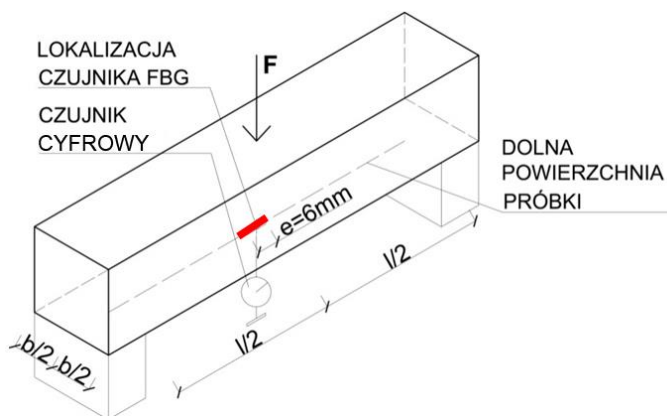
Inspiracją dalszych badań było poszukiwanie informacji dotyczącej różnicy odczytu odkształceń między światłowodem umieszczonym na drucie stalowym \varnothing 2 mm wewnątrz belki w odniesieniu do odkształceń zarejestrowanych czujnikiem umieszczonym na zewnątrz belki.

Na kolejnym etapie badań materiału „POLYTECH” w postaci belki o wymiarach 1700 mm x 100 mm x 150 mm przeprowadzono eksperymenty, które polegały na oddziaływaniu różnymi wartościami obciążenia na belkę. Przedmiotowa próbka została wyposażona w czujnik FBG zamontowany w dolnej strefie na środku długości badanej belki (rys. 7.14 i 7.15). Przed przyłożeniem do elementu obciążenia, pod jego dolną krawędzią każdorazowo umieszczano cyfrowy czujnik ugięcia. Jego wskazania porównywano z odczytami uzyskiwanymi z interrogatora, analizującego długość fali ze światłowodu. Celem przeprowadzonego eksperymentu była weryfikacja wytrzymałości badanego elementu na zginanie z udziałem sił poprzecznych.

Przeprowadzono dziesięć prób obciążeniowych badanego elementu.



Rys. 7.14. Schemat obciążenia belki wykonanej z materiału „POLYTECH” i lokalizacja czujnika FBG



Rys. 7.15. Schemat pomiaru odkształceń za pomocą czujnika FBG oraz strzałki ugięcia

W ramach eksperymentu przedmiotową belkę umieszczono na dwóch podporach w taki sposób, iż jej rozpiętość w świetle wynosiła: 1500 mm. Następnie na jej górnej powierzchni w środku długości przykładano obciążenie.

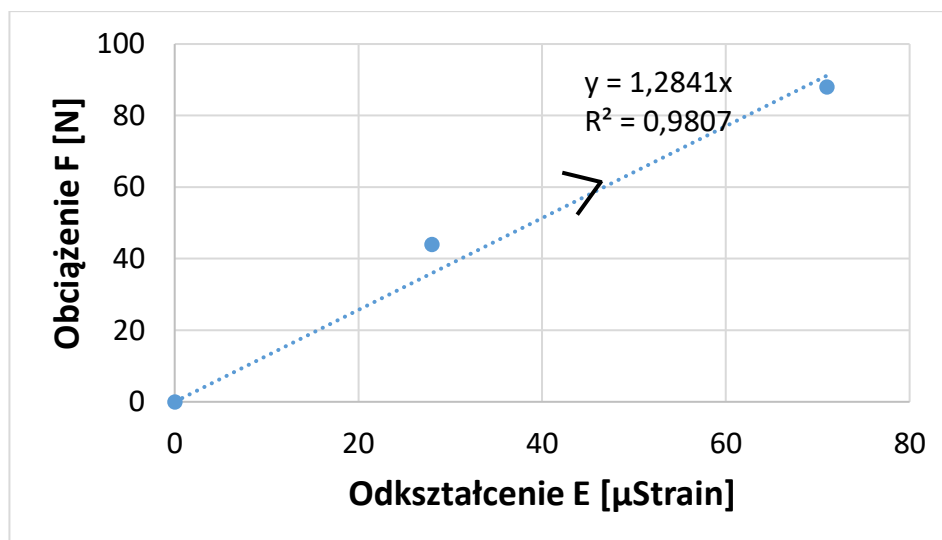
Obciążenie do belki przykładane było za pomocą laboratoryjnych obciążników uprzednio legalizowanych. Po przyłożeniu maksymalnego założonego obciążenia w odpowiedniej kolejności belkę odciążano. Opisaną sytuację przedstawiono na rysunku 7.15.

Próba nr 1 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 88 N, następnie stopniowo odciążano (tab. 7.8).

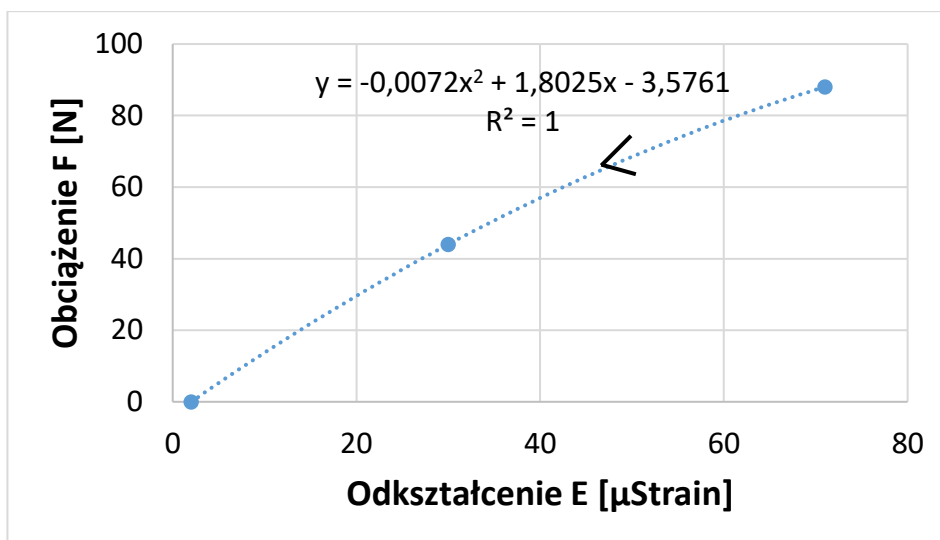
Tabela 7.8. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 1

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskaźniki interrogatora [μ Strain]	Wskaźniki czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	28	0,08
3	88	71	0,17
4	44	30	0,09
5	0	2	0

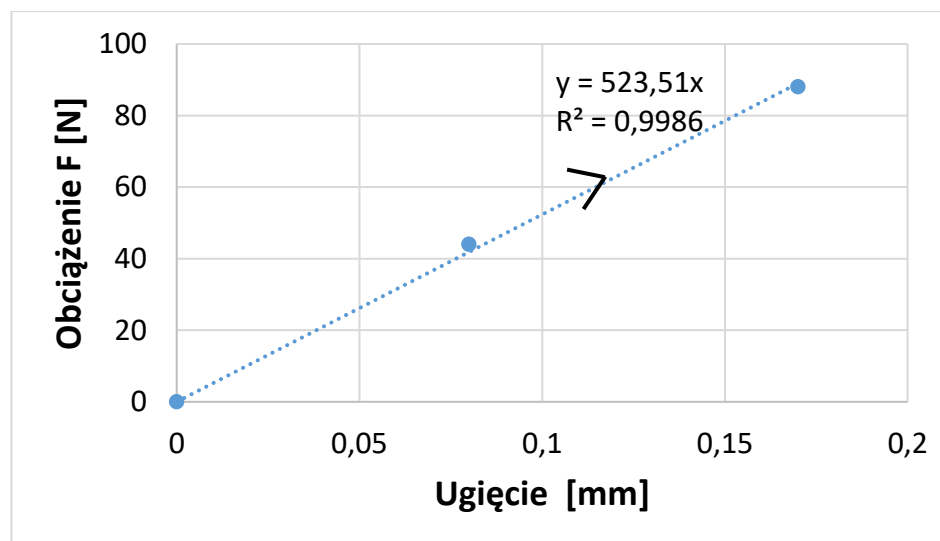
W trakcie trwania eksperymentu (próba nr 1), największa zmierzona wartość odkształcenia badanego elementu wyniosła: 71 μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,17 mm. Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez system (interrogator optyczny analizujący dane z czujnika umieszczonego na belce) i wartości ugięcia odczytane z czujnika cyfrowego przedstawiono na wykresach 7.14, 7.15, 7.16, 7.17.



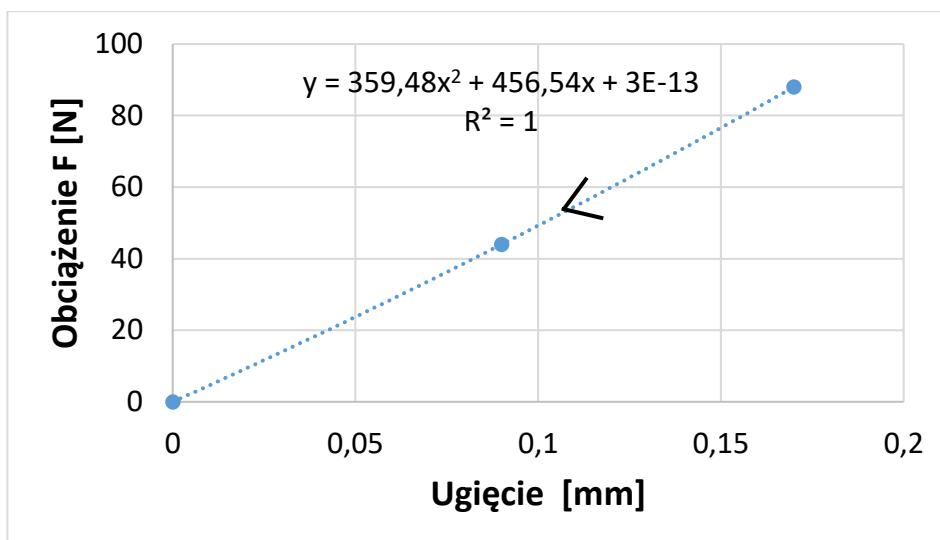
Wyk. 7.14. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 1).



Wyk. 7.15. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 1).



Wyk. 7.16. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 1).



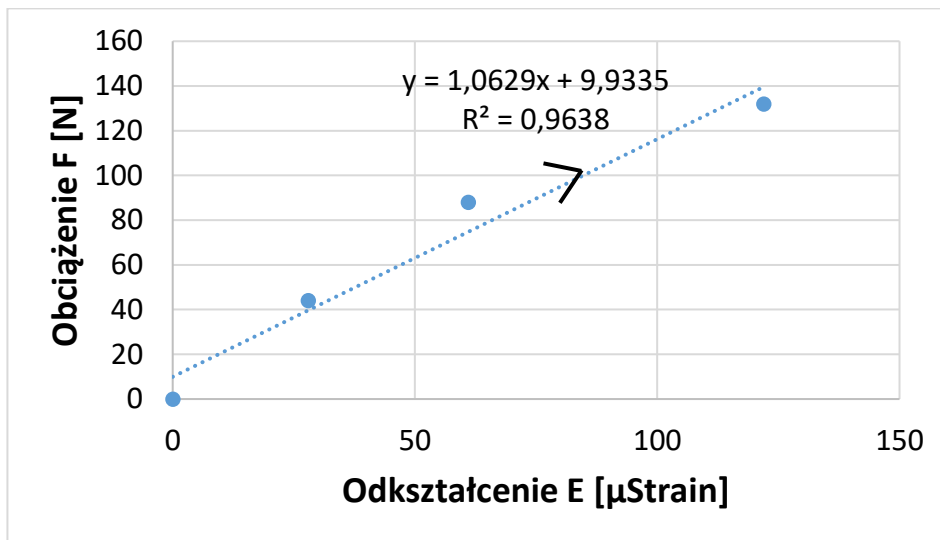
Wyk. 7.17. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 1).

Próba nr 2 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 132 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.9).

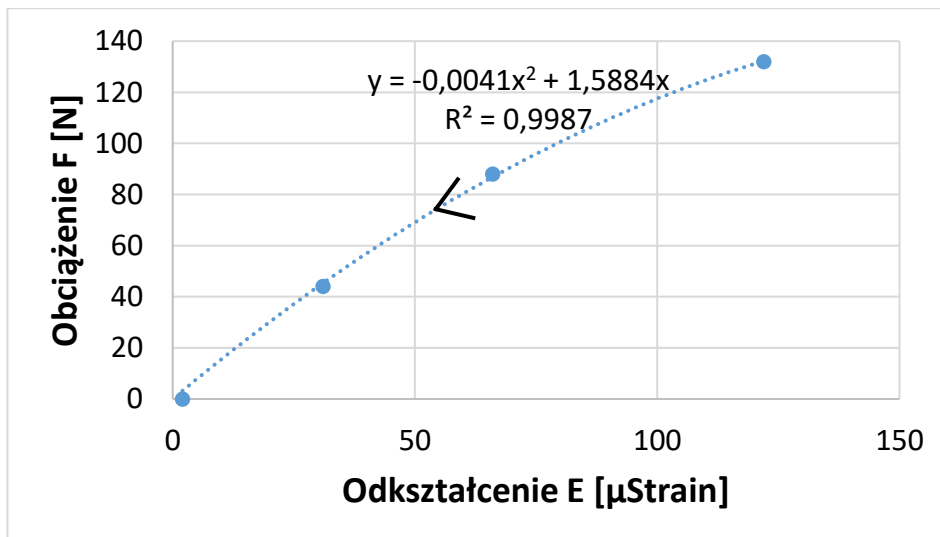
Tabela 7.9. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 2

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	28	0,09
3	88	61	0,18
4	132	122	0,27
5	88	66	0,19
6	44	31	0,1
7	0	2	0,01

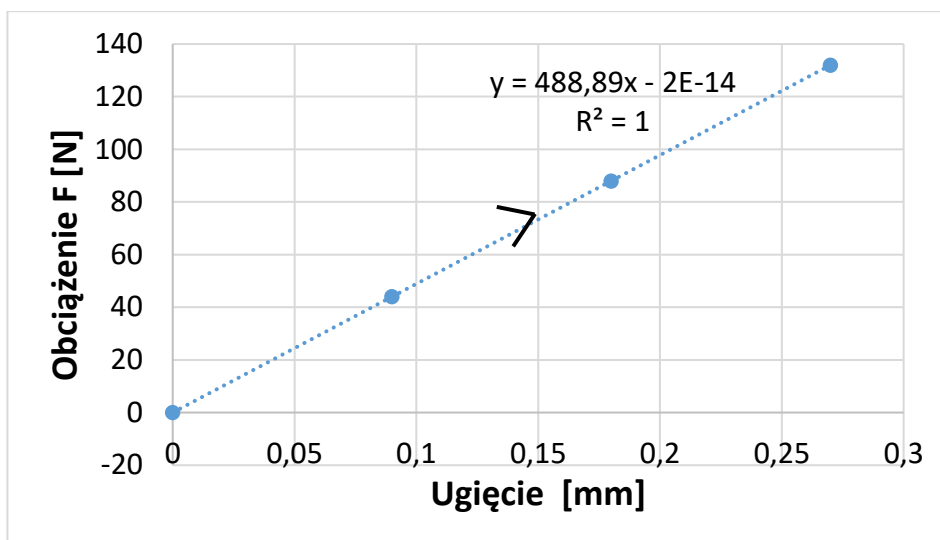
W trakcie trwania eksperymentu (próba nr 2), największa zmierzona wartość odkształcenia badanego elementu wyniosła: 122 μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,27 mm. Wyniki pomiarów czujnikami FBG, i wartości ugięcia odczytane z czujnika cyfrowego przedstawiono na wykresach 7.18, 7.19, 7.20, 7.21



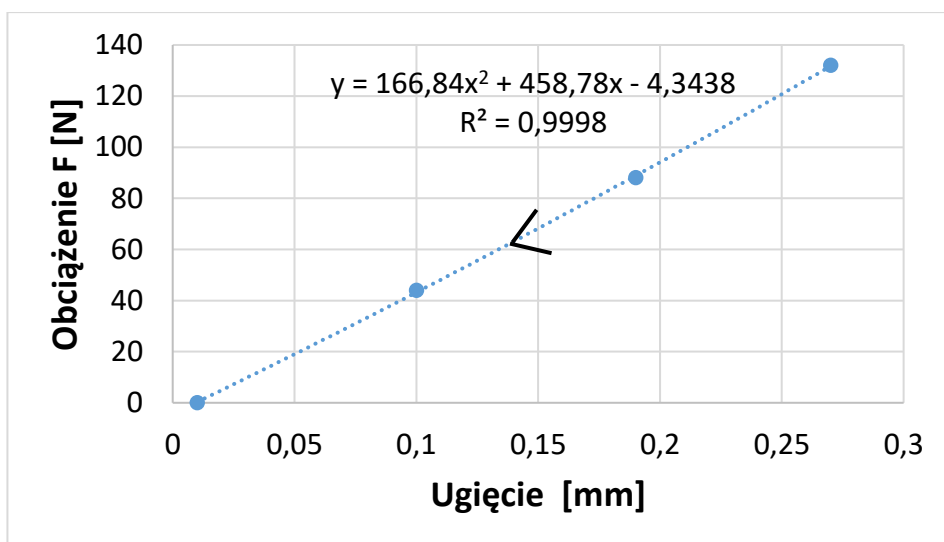
Wyk. 7.18. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 2).



Wyk. 7.19. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 2).



Wyk. 7.20. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika z cyfrowego – (próba nr 2).



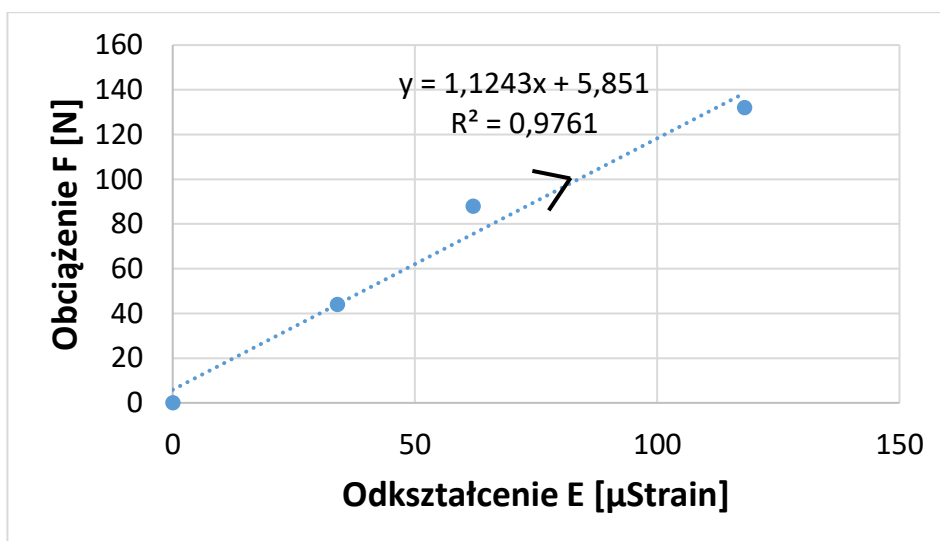
Wyk. 7.21. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 2).

Próba nr 3 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 132 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.10).

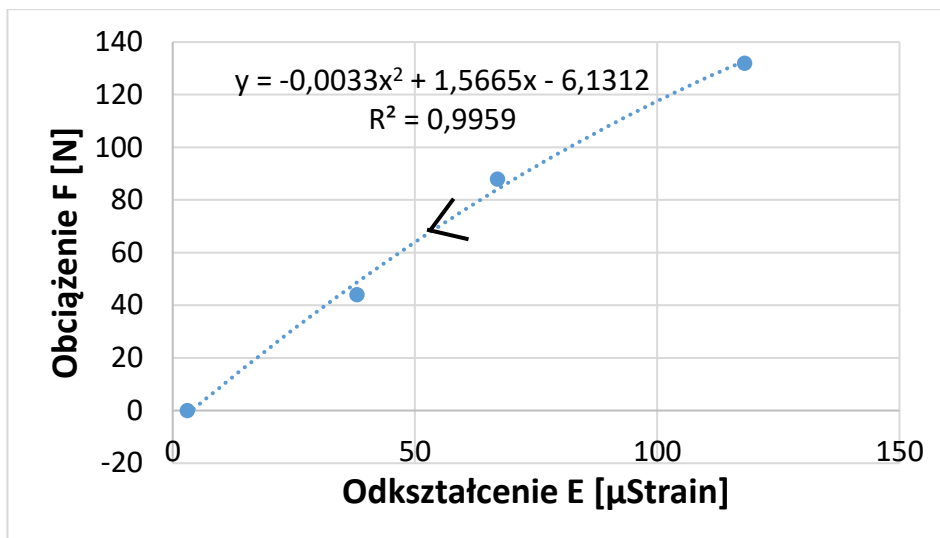
Tabela 7.10. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 3

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	34	0,09
3	88	62	0,18
4	132	118	0,27
5	88	67	0,19
6	44	38	0,1
7	0	3	0,01

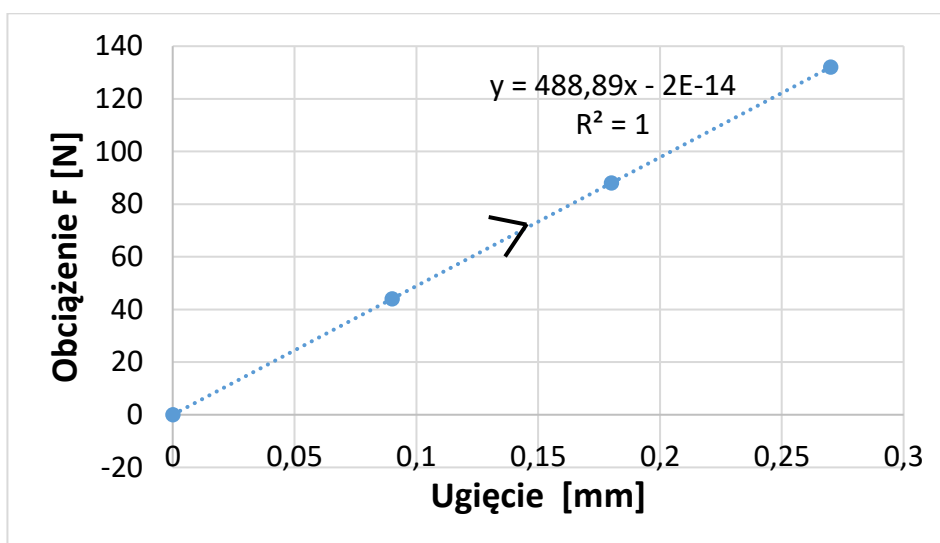
Zmierzona największa wartość odkształcenia (próba nr 3) badanego elementu: przy użyciu czujnika FBG wynosiła 118 μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,27 mm. Wyniki pomiarów, przedstawiono na wykresach 7.22, 7.23, 7.24, 7.25.



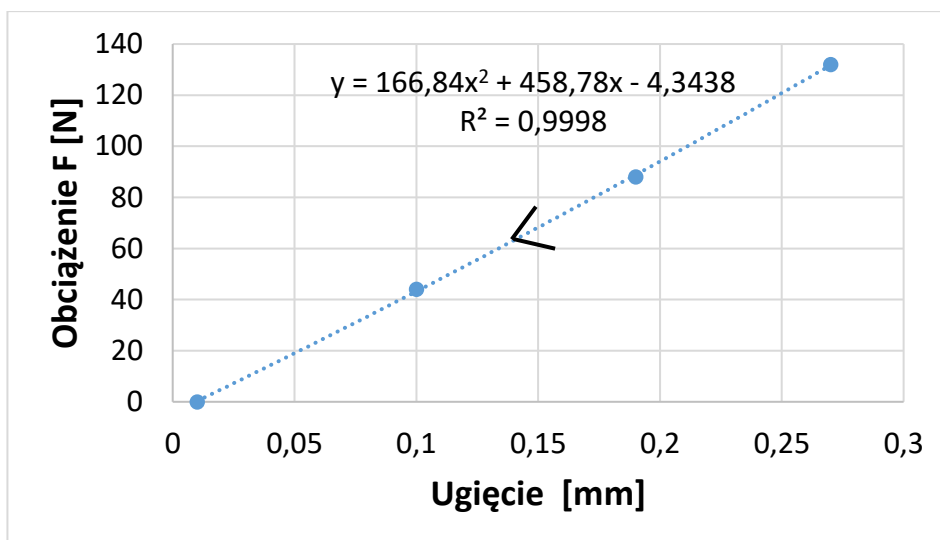
Wyk. 7.22. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 3).



Wyk. 7.23. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 3).



Wyk. 7.24. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 3).



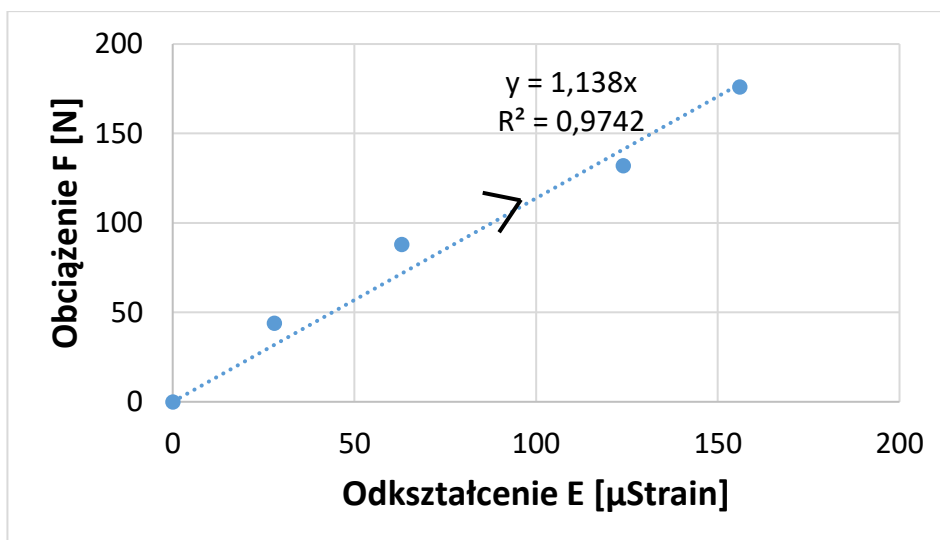
Wyk. 7.25. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 3).

Próba nr 4 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 176 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.11).

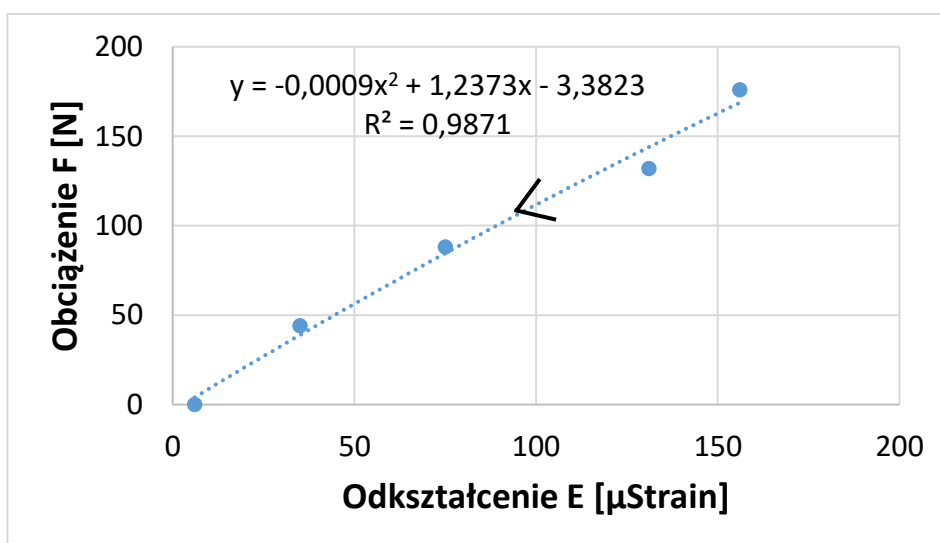
Tabela 7.11. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 4

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	28	0,09
3	88	63	0,18
4	132	124	0,27
5	176	156	0,36
6	132	131	0,28
7	88	75	0,20
8	44	35	0,11
9	0	6	0,01

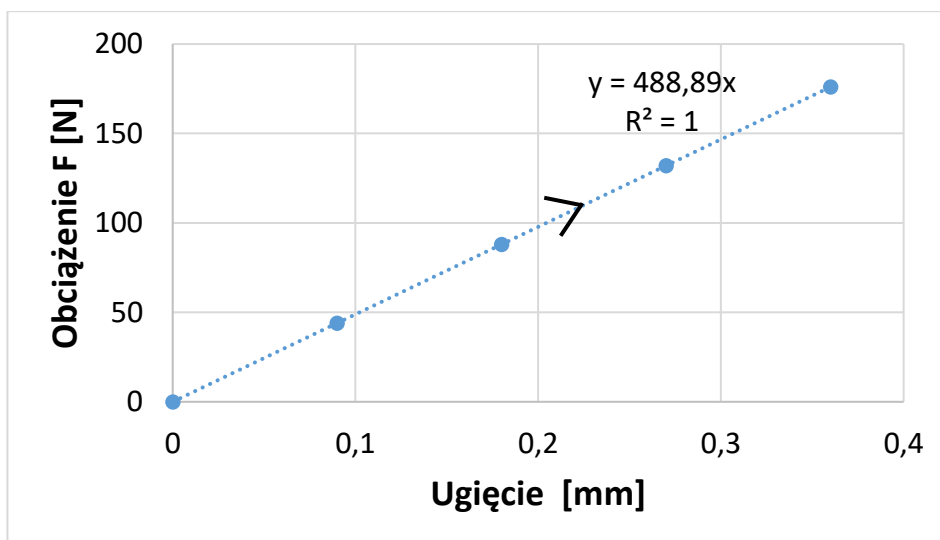
Próba nr 4. Największa zmierzona wartość odkształcenia badanego elementu wyniosła: 156 μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,36 mm. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach 7.26, 7.27, 7.28, 7.29.



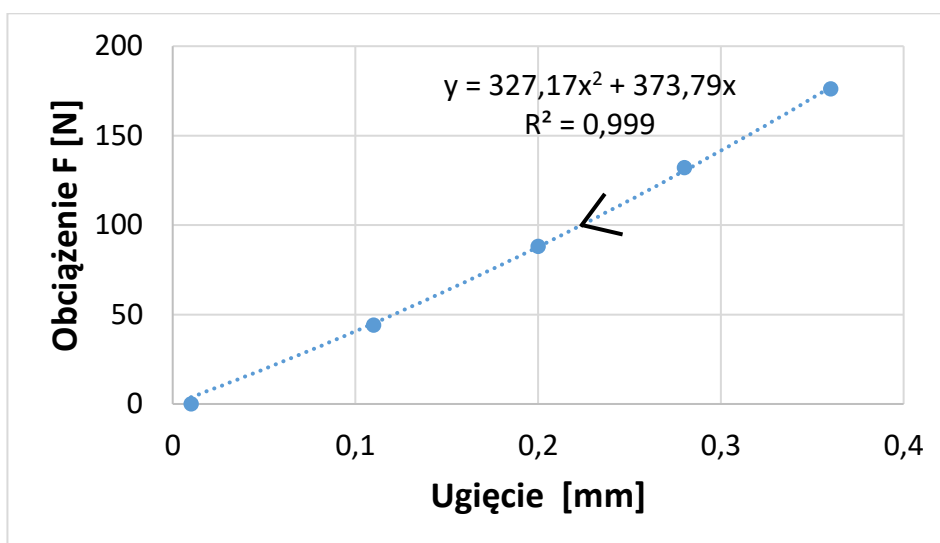
Wyk. 7.26. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 4).



Wyk. 7.27. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 4).



Wyk. 7.28. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 4).



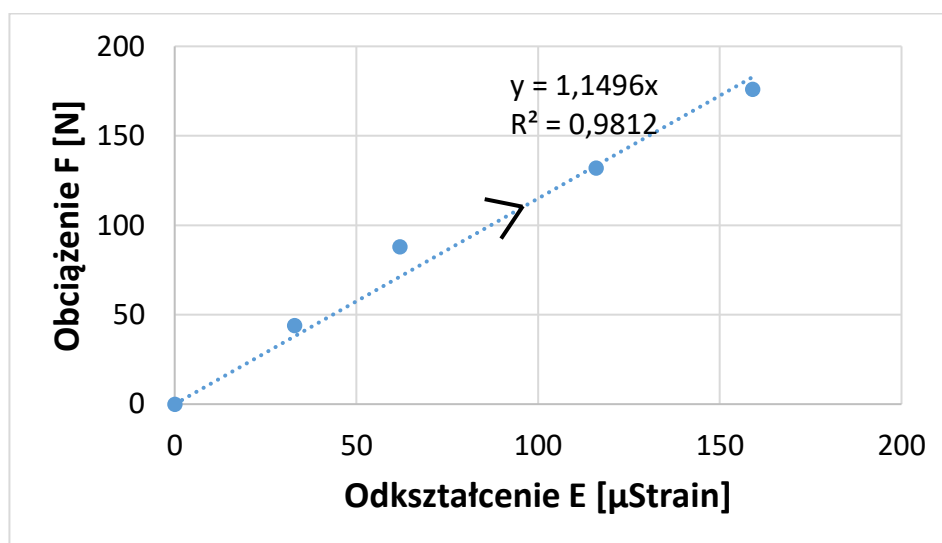
Wyk. 7.29. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 4).

Próba nr 5 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 176 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.12).

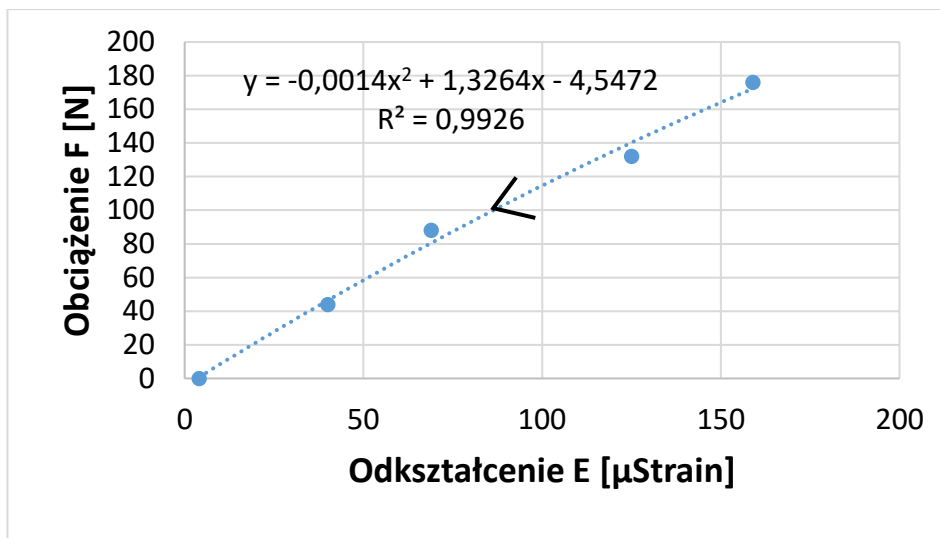
Tabela 7.12. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 5

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	33	0,09
3	88	62	0,18
4	132	116	0,26
5	176	159	0,35
6	132	125	0,28
7	88	69	0,19
8	44	40	0,11
9	0	4	0,01

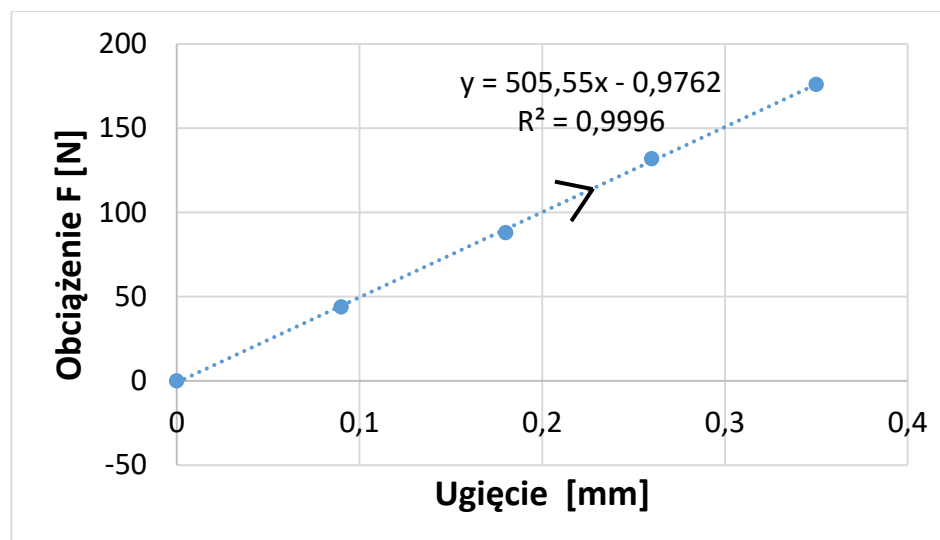
Podczas próby nr 5 określono największą wartość odkształcenia badanego elementu: Czujnik FBG zarejestrował 159 μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,35 mm. Odczytane dane z czujników przedstawiono na wykresach 7.30, 7.31, 7.32, 7.33.



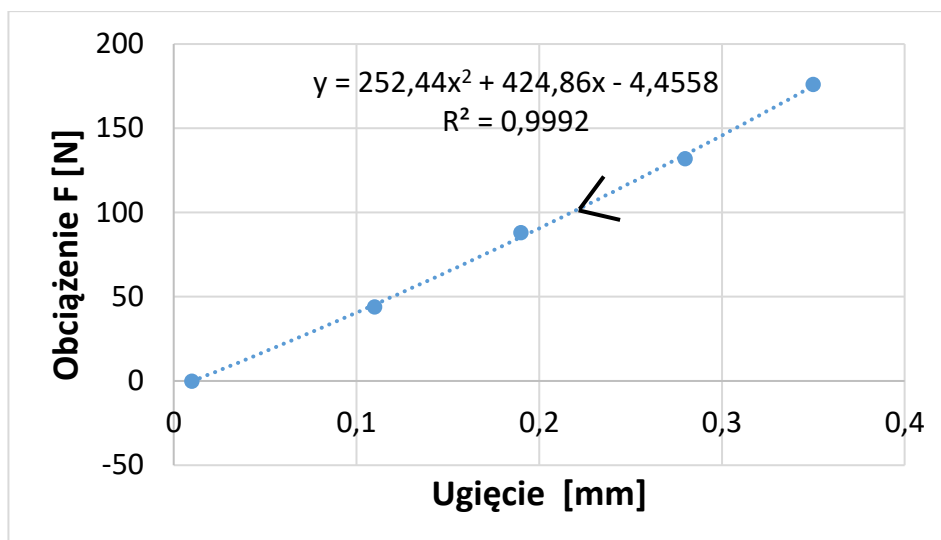
Wyk. 7.30. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 5).



Wyk. 7.31. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 5).



Wyk. 7.32. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 5).



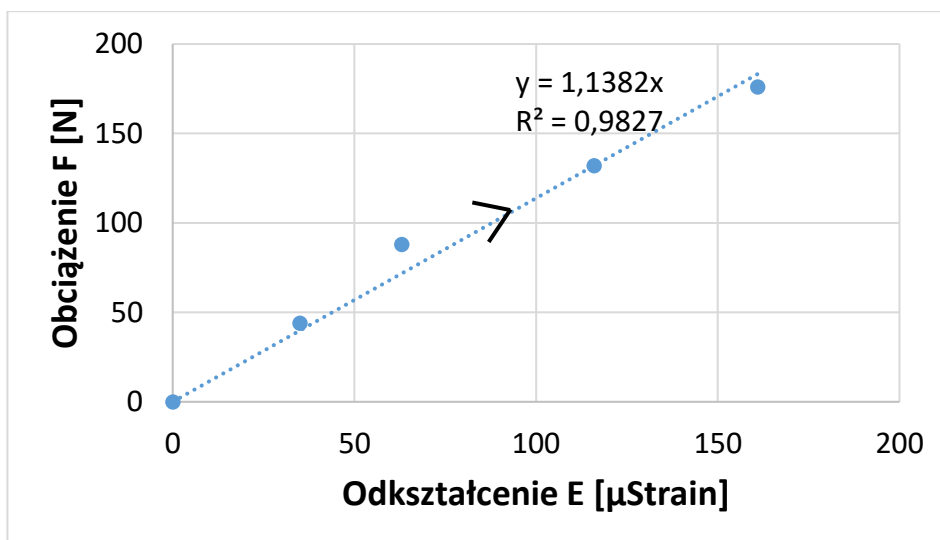
Wyk. 7.33. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 5).

Próba nr 6 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 176 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.13).

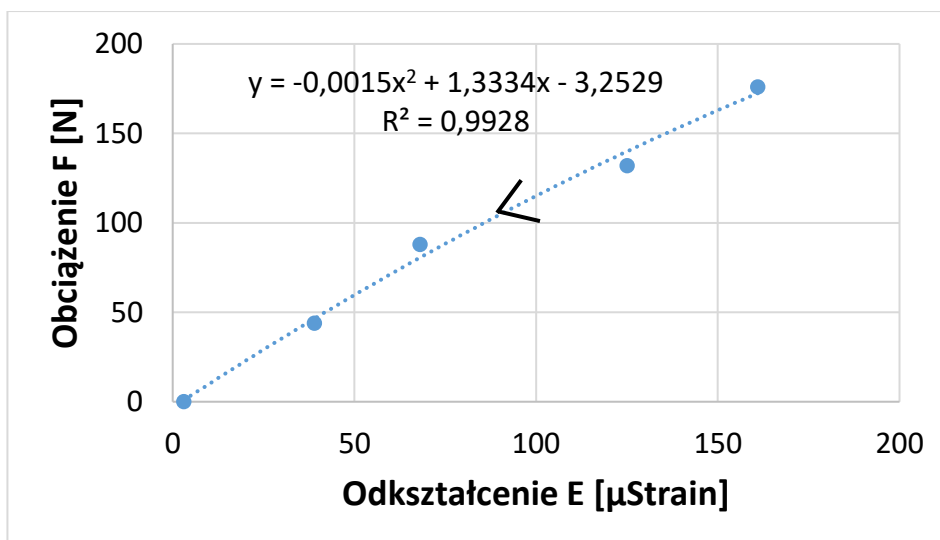
Tabela 7.13. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 6

Etap badania	Wartość przykładowego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	35	0,09
3	88	63	0,18
4	132	116	0,27
5	176	161	0,35
6	132	125	0,28
7	88	68	0,20
8	44	39	0,10
9	0	3	0,01

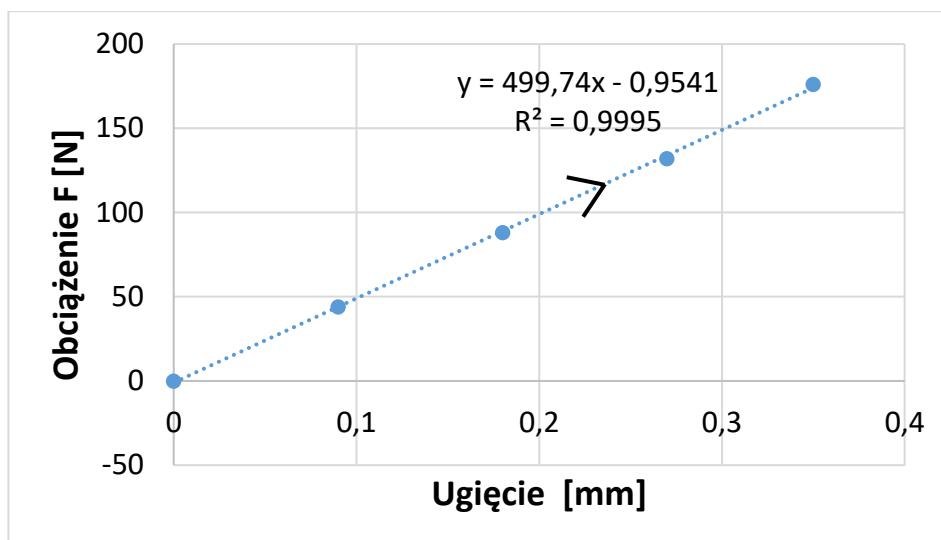
W trakcie eksperymentu (próba nr 6), czujnik FBG określił wartość odkształcenia badanego elementu na poziomie 161 μ Strain. Sensor cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,35 mm. Dane z czujników przedstawiono na wykresach 7.34, 7.35, 7.36, 7.37.



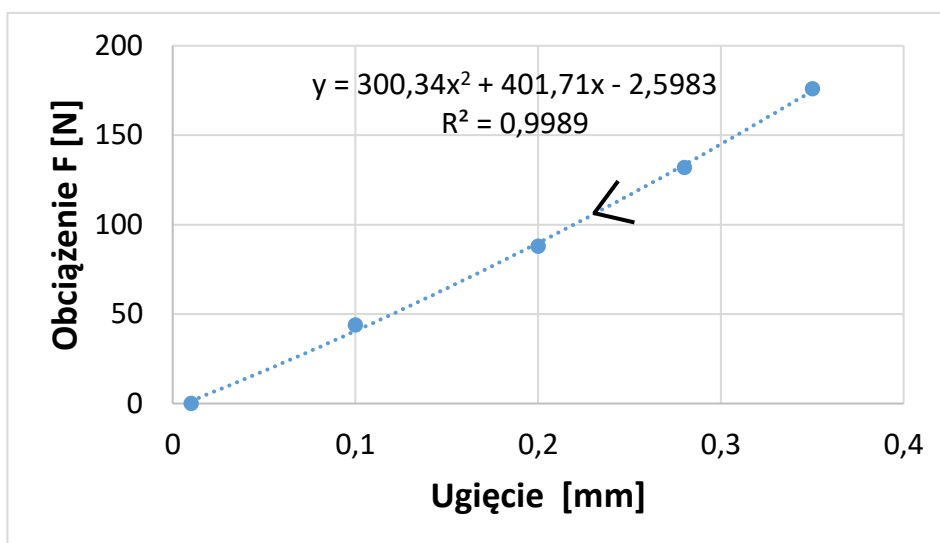
Wyk. 7.34. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 6).



Wyk. 7.35. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 6).



Wyk. 7.36. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 6).



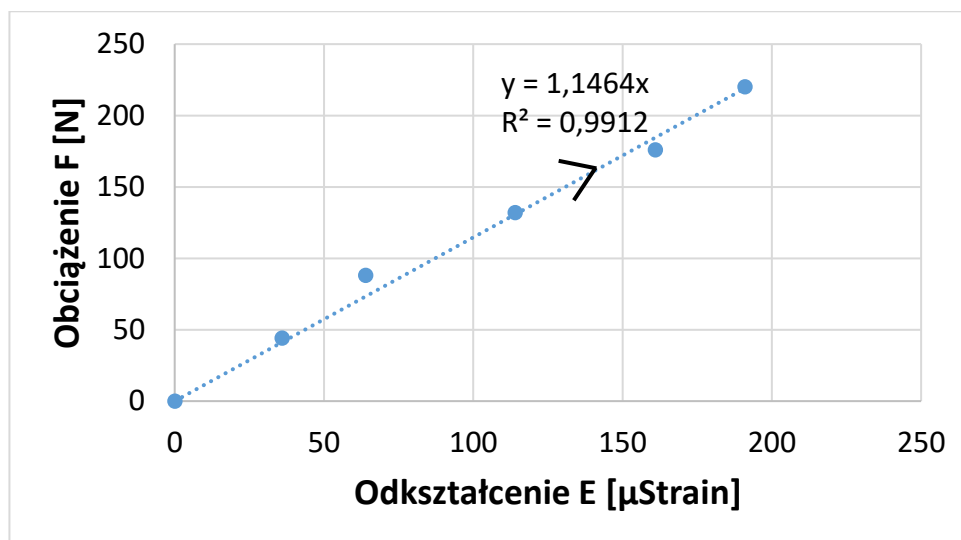
Wyk. 7.37. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 6).

Próba nr 7 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 220 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.14).

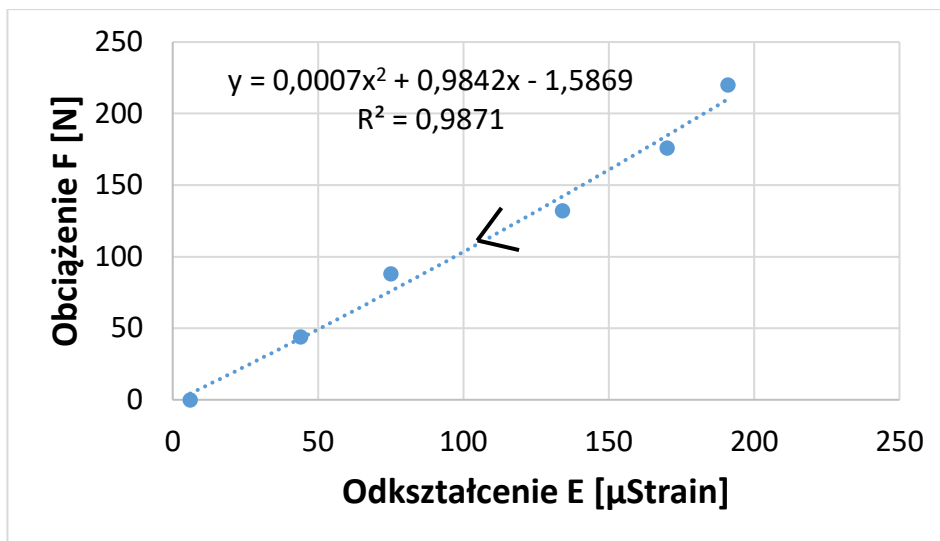
Tabela 7.14. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 7

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	36	0,09
3	88	64	0,18
4	132	114	0,27
5	176	161	0,35
6	220	191	0,44
7	176	170	0,37
8	132	134	0,30
9	88	75	0,21
10	44	44	0,12
11	0	6	0,02

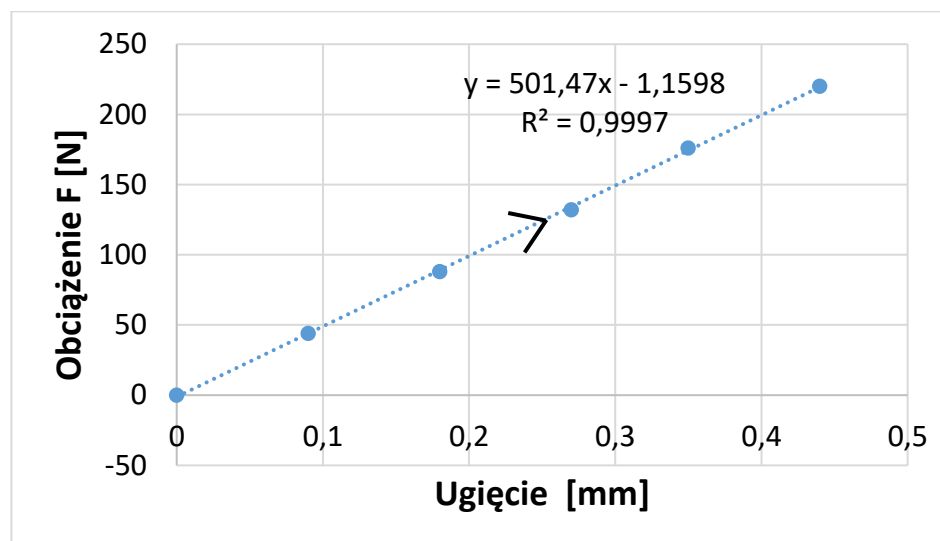
Podczas eksperymentu (próba nr 7) zmierzono czujnikiem FBG największą wartość wynoszącą 191μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,44 mm. Zarejestrowane wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach 7.38, 7.39, 7.40, 7.41.



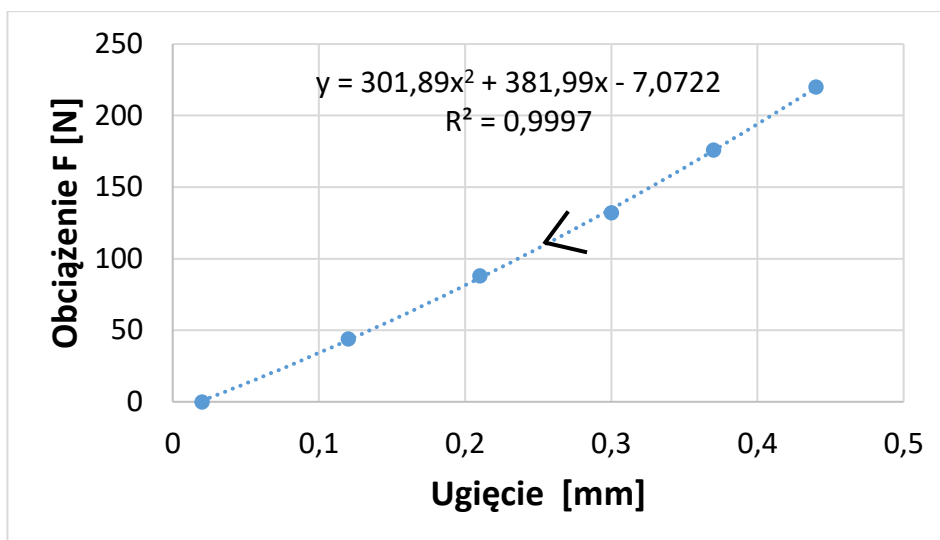
Wyk. 7.38. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 7).



Wyk. 7.39. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 7).



Wyk. 7.40. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 7).



Wyk. 7.41. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 7).

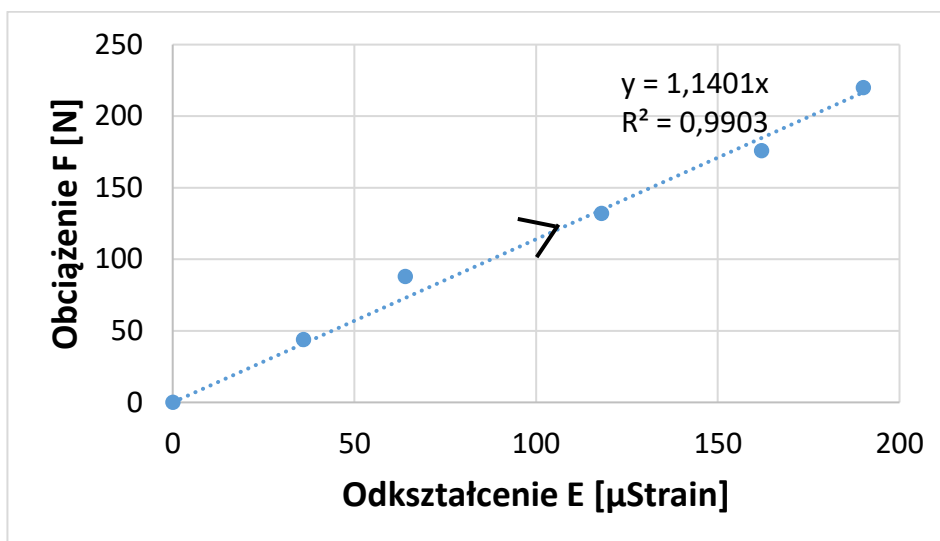
Próba nr 8 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 220 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.15).

Tabela 7.15. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 8

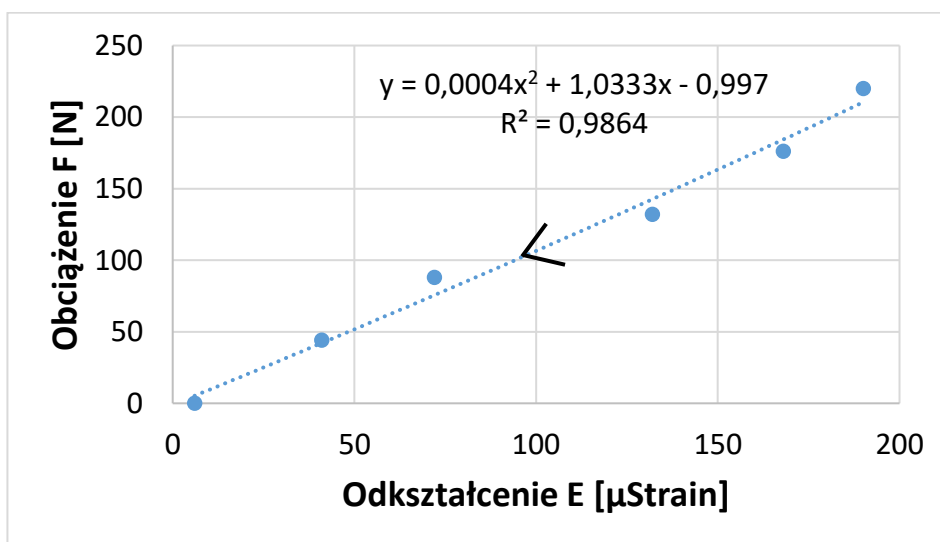
Etap badania	Wartość przykładowego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	36	0,1
3	88	64	0,19
4	132	118	0,28
5	176	162	0,37
6	220	190	0,46
7	176	168	0,38
8	132	132	0,31
9	88	72	0,22
10	44	41	0,13
11	0	6	0,03

Wykonana próba nr 8 umożliwiła określenie największej wartości odkształcenia badanego elementu czujnikiem FBG na poziomie 190 μ Strain. Czujnik cyfrowy

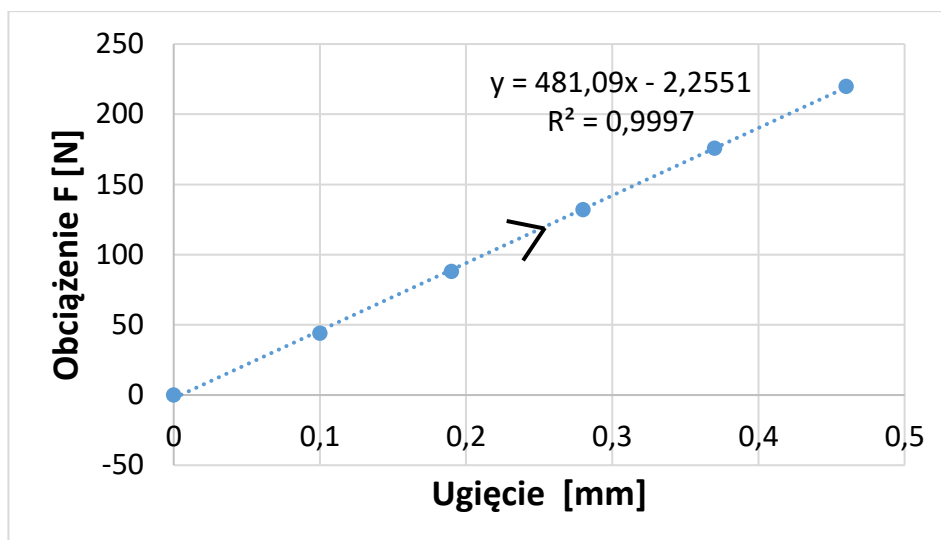
wykazał największą wartość ugięcia 0,46 mm. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych przy użyciu czujnika FBG i wartości odkształcenia odczytane z czujnika cyfrowego przedstawiono na wykresach 7.42, 7.43, 7.44, 7.45.



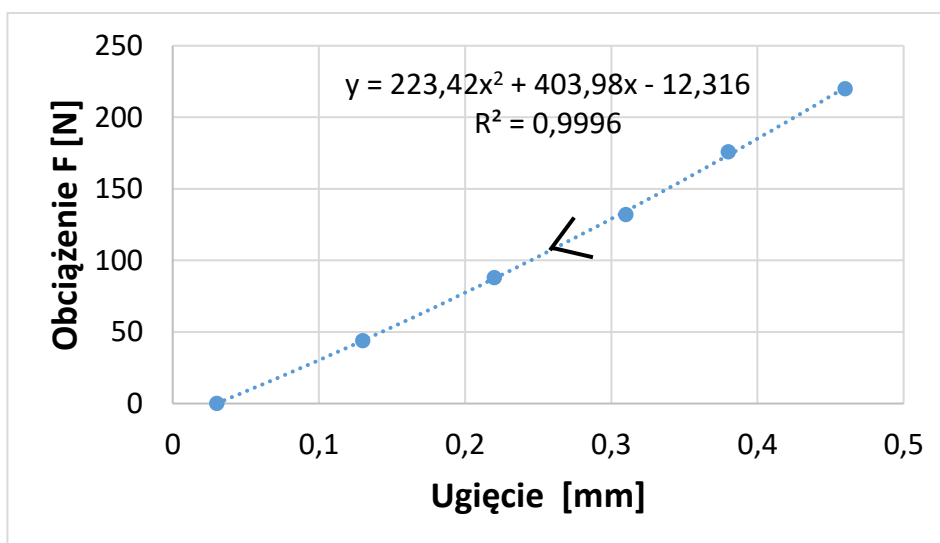
Wyk. 7.42. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 8).



Wyk. 7.43. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 8).



Wyk. 7.44. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 8).



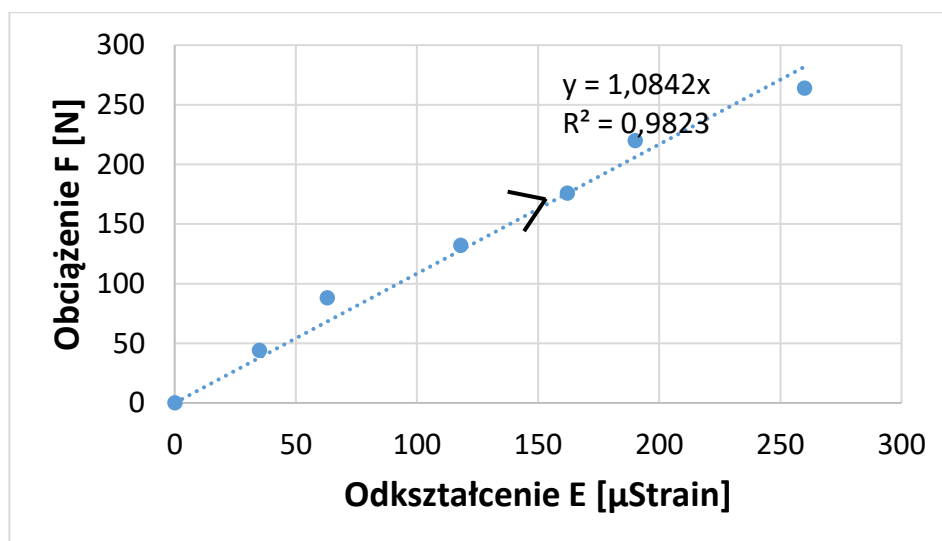
Wyk. 7.45. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 8).

Próba nr 9 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 264 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.16).

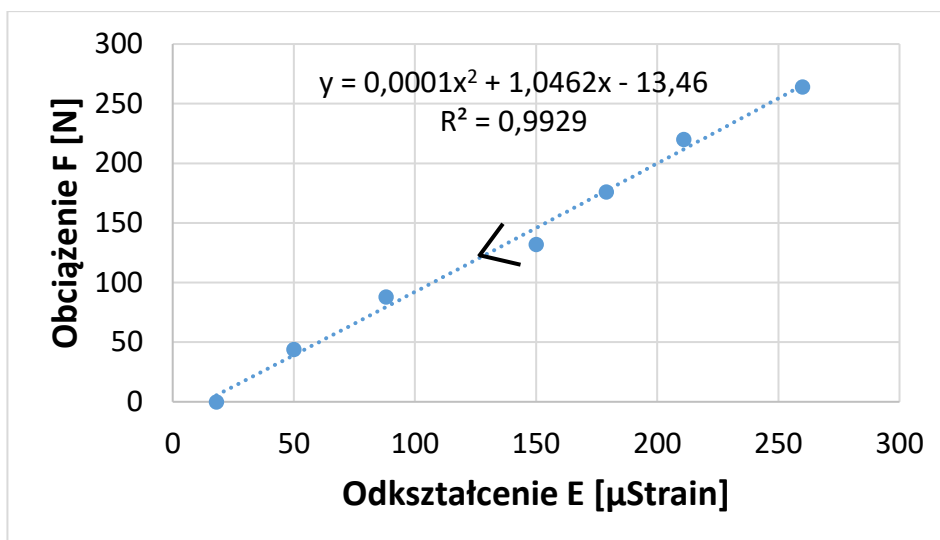
Tabela 7.16. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 9

Etap badania	Wartość przykładanego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	35	0,11
3	88	63	0,20
4	132	118	0,29
5	176	162	0,37
6	220	190	0,46
7	264	260	0,56
8	220	211	0,49
9	176	179	0,41
10	132	150	0,33
11	88	88	0,24
12	44	50	0,14
13	0	18	0,04

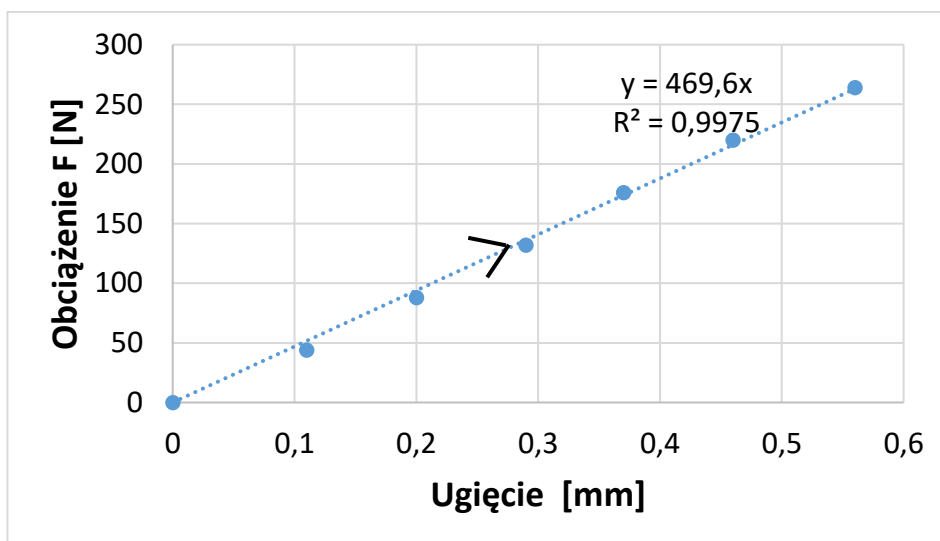
Następny eksperyment (próba nr 9) umożliwił określić największą wartość odkształcenia badanego elementu: 211 μ Strain (czujnik FBG). Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,49 mm. Wartości odczytane z czujników przedstawiono na wykresach 7.46, 7.47, 7.48, 7.49.



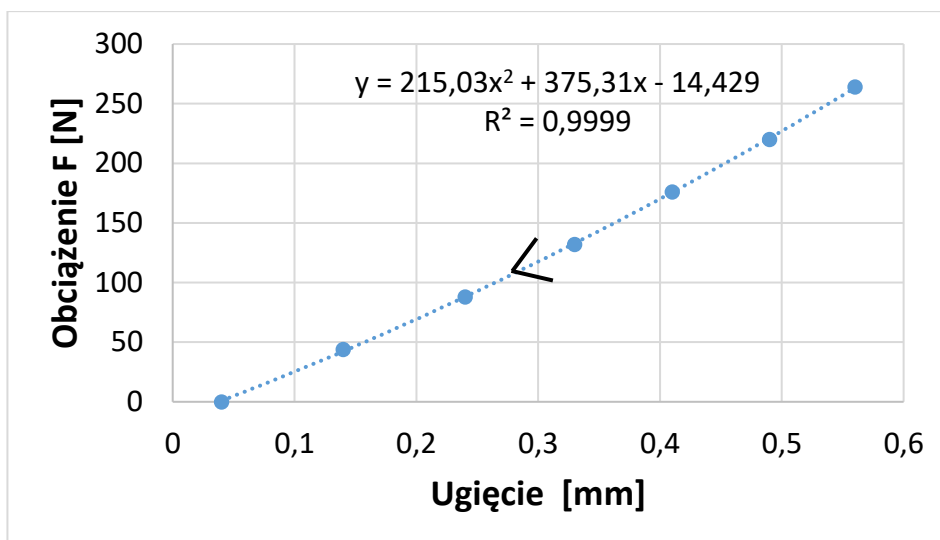
Wyk. 7.46. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 9).



Wyk. 7.47. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 9).



Wyk. 7.48. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 9).



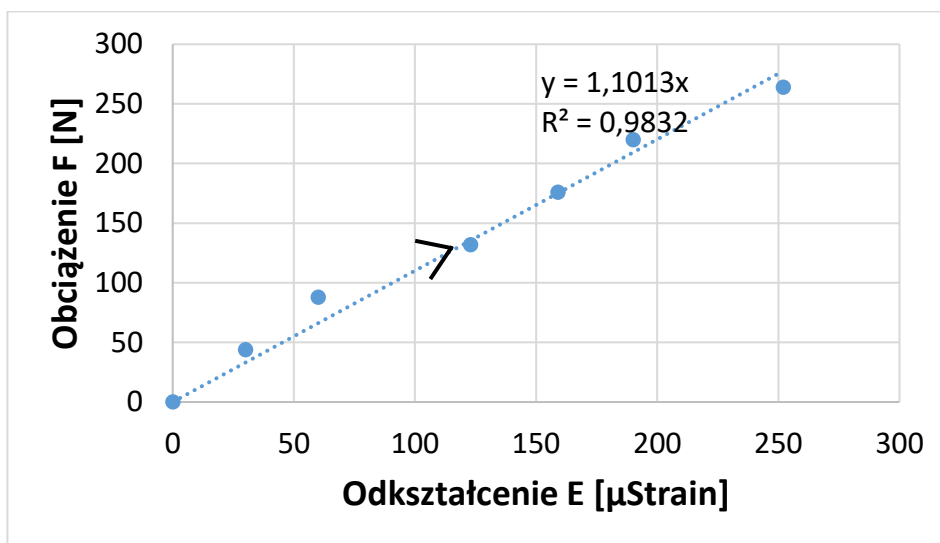
Wyk. 7.49. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 9).

Próba nr 10 polegała na obciążaniu i odciążaniu badanej belki. Podczas badania przykładano obciążenie zaczynając od 44 N aż do 264 N, następnie stopniowo odciążano belkę (tab. 7.18).

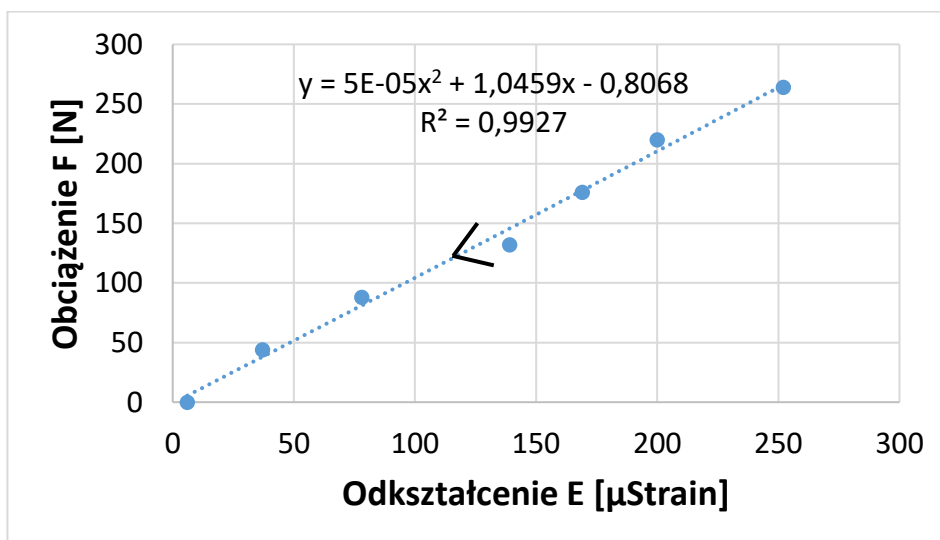
Tabela 7.18. Wartości odkształcenia i ugięcia dla belki II, pod wpływem zadanego obciążenia podczas próby nr 10

Etap badania	Wartość przykładowego F obciążenia [N]	Wskazania interrogatora [μ Strain]	Wskazania czujnika cyfrowego [mm]
1	0	0	0
2	44	30	0,09
3	88	60	0,18
4	132	123	0,27
5	176	159	0,35
6	220	190	0,44
7	264	252	0,53
8	220	200	0,45
9	176	169	0,38
10	132	139	0,30
11	88	78	0,21
12	44	37	0,11
13	0	6	0,01

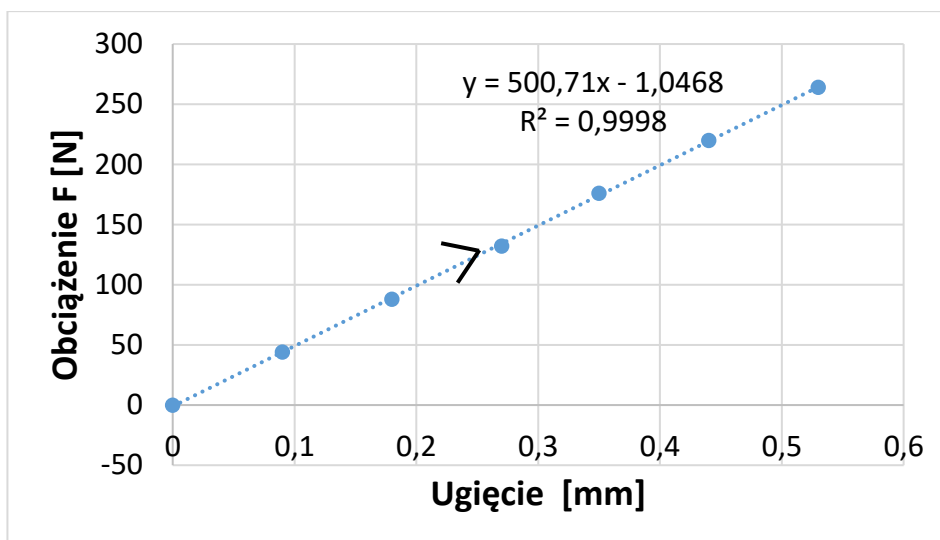
Zmierzona największa wartość odkształcenia w trakcie trwania eksperymentu (próba nr 10) badanego elementu, określona czujnikiem FBG wynosiła 252 μ Strain. Czujnik cyfrowy wykazał największą wartość ugięcia 0,53 mm. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach 7.50, 7.51, 7.52, 7.53.



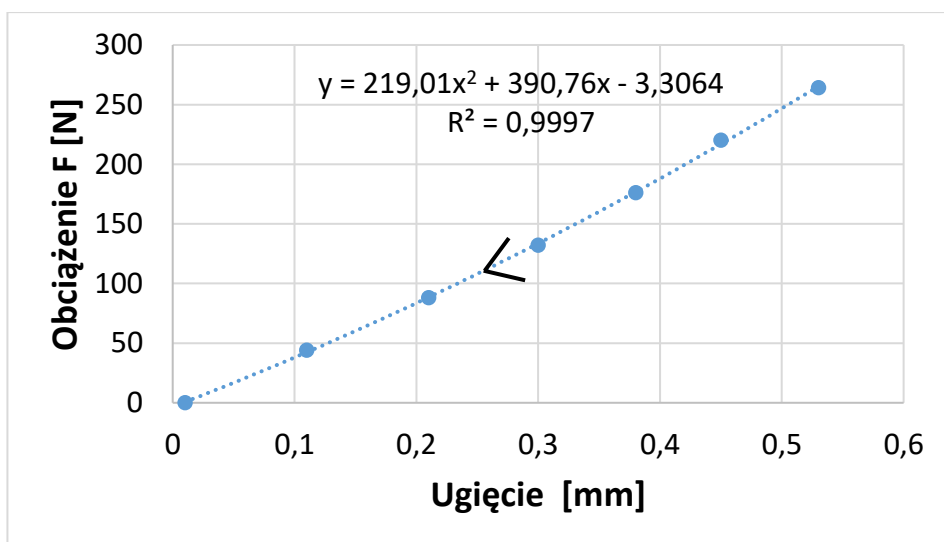
Wyk. 7.50. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 10).



Wyk. 7.51. Wartości odkształcenia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, zarejestrowane przez czujnik FBG – (próba nr 10).



Wyk. 7.52. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby obciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 10).



Wyk. 7.53. Wartości ugięcia badanej belki z materiału „POLYTECH” podczas próby odciążania elementu, odczytane z czujnika cyfrowego – (próba nr 10).

Wyznaczenie rzeczywistych wartości odkształcenia belki umożliwiło określenie modułu odkształcalności Younga E.

Poniżej przedstawiono schemat postępowania umożliwiający wyznaczenie modułu Younga E.

Przykładowe parametry podano dla siły $F=132$ N.

Wartości naprężenia wyznaczono w oparciu o teorię zginania.

Moment gnący dla zginania 3-punktowego:

$$M_g = \frac{FL}{4} \quad (9)$$

$M_g = 33000$ Nmm dla $F= 88$ N oraz $L = 1500$ mm

Naprężenia zginające wyrażone są wzorem :

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_z} \quad (10)$$

- gdzie W_z – wskaźnik wytrzymałości na zginanie dla przekroju 100×150 mm,
po podstawieniu wartości liczbowych (naprężenie zginające) wynosi:

$$\sigma_g = 0,088 \text{ MPa}$$

Wyznaczenie wartości modułu Younga na podstawie pomiaru ugięcia:

$$E_{ug} = \frac{FL^3}{48f \cdot I_z} \quad (11)$$

gdzie:

F – siła oddziałująca na badany element [N],

L – odległość pomiędzy siłami oddziałującymi na badany element [mm],

I_z – moment bezwładności przekroju badanego elementu [mm⁴]

$$E_{ug} = 1222,22 \text{ MPa}$$

Wyznaczenie wartości modułu Younga na podstawie pomiaru za pomocą czujnika FBG:

$$E_{FBG} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (12)$$

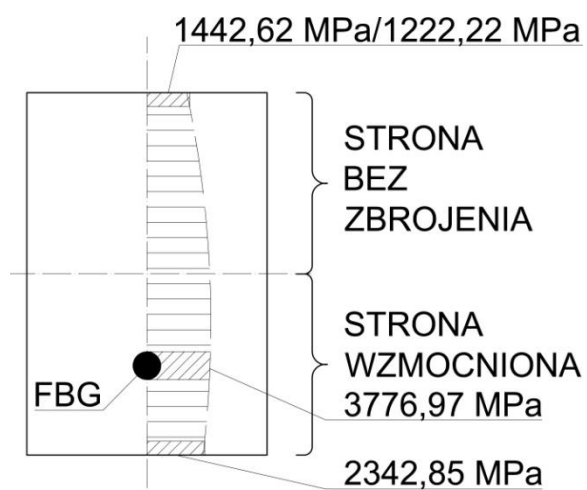
σ - naprężenia zginające,

ϵ - wartość odkształcenia badanego elementu

$$E_{FBG} = 1442,62 \text{ MPa}$$

Różnica otrzymanych wartości modułu E wynika z tego, że próbka podczas obciążania uległa odkształceniu na podporach. Zarejestrowano tym samym większą wartość ugięcia w wyniku czego moduł Younga miał mniejszą wartość.

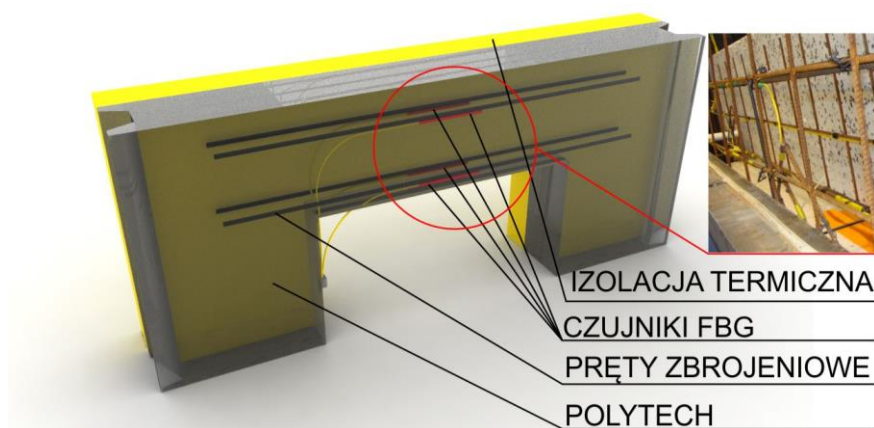
Rozkład zmian wartości zastępczego modułu odkształcalności wzdłuż wysokości przekroju poprzecznego analizowanej belki zamieszczono na rysunku 7.16.



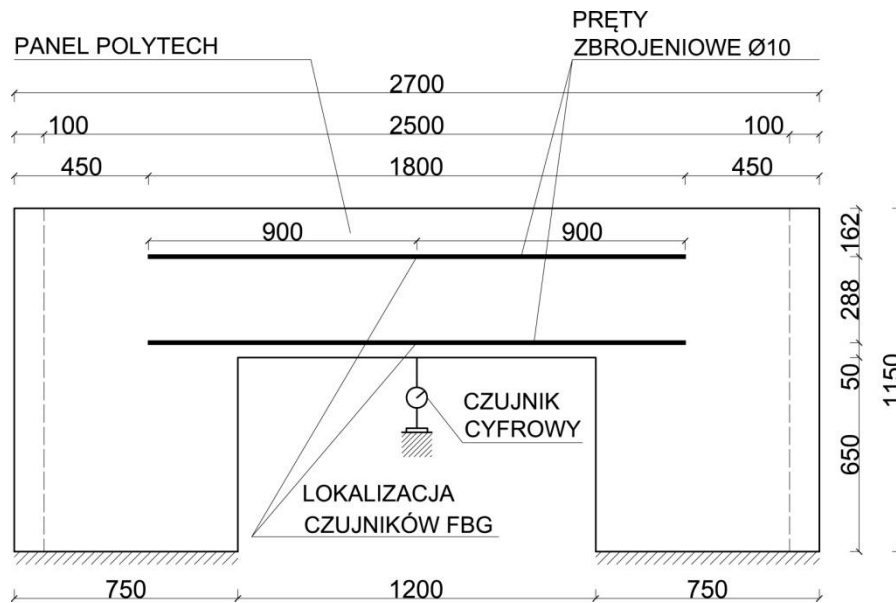
Rys. 7.16. Rozkład zmian wartości zastępczego modułu odkształcalności wzdłuż wysokości przekroju poprzecznego analizowanej belki

7.3 PREFABRYKOWANE NADPROŻE „POLYTECH” Z CZUJNIKAMI FBG – BADANIA LABORATORYJNE

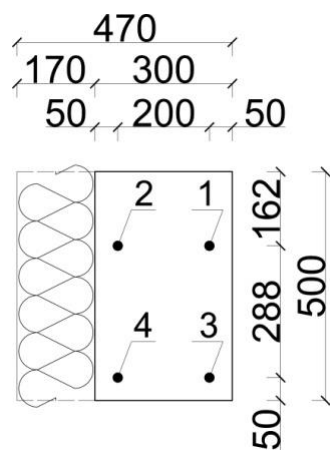
Kolejnym obiektem przeprowadzonych badań było prefabrykowane nadproże wykonane z materiału „POLYTECH”, przeznaczone do testów laboratoryjnych rys. 7.17. Element ten stosowany jest w różnych przedsięwzięciach budowlanych (m.in. budowa obiektów, etc.). Posiada długość wynoszącą 2700 mm, przy wysokości 1150 mm i szerokości 300 mm (rys. 7.18). Nadproże jest wzmocnione zbrojeniem wykonanym w formie siatki prętów stalowych, o średnicy 6 mm, w rozstawie co 140 mm. Podobnie jak we wcześniejszych badaniach belki również i nadproże na etapie jego produkcji, zostało wyposażone w zatopione we wnętrzu światłowody z czujnikami FBG, umożliwiające, dokonywanie pomiarów odkształcenia [67]. Dwie pary światłowodów, oznaczane jako: para 1 – 2, oraz para 3 – 4 przedstawione na rysunku 7.19 zamontowano do czterech prętów zbrojeniowych $\varnothing 10$ o długości 1800 mm. Czujniki FBG umieszczono na środku długości prętów (rys. 7.17, 7.18, 7.19).



Rys. 7.17. Obiekt badań– prefabrykowane nadproże, wykonane z materiału „POLYTECH” -
- model 3D



Rys. 7.18. Obiekt badań– prefabrykowane nadproże, wykonane z materiału „POLYTECH” - elewacja frontowa



Rys. 7.19. Prefabrykowane nadproże, wykonane z materiału „POLYTECH” – lokalizacja prętów zbrojeniowych (przekrój, wymiarowanie w cm)

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 stalowej podkładki, umieszczona pomiędzy dolną powierzchnią cylindra opuszczanego na nadproże, a górną powierzchnią nadproża wynosiła: 1800 cm² (wymiary 60 cm x 30 cm). Zdjęcie stanowiska badawczego przedstawia fotografia 7.4.



Fot. 7.4. Obiekt badań na stanowisku badawczo pomiarowym (urządzenie ściskające)

Nadproże obciążano przykładając: od 10 barów do 70 barów. Wartość siły ściskającej ustalono biorąc pod uwagę powierzchnię tłoka ściskającego, będącego elementem wykorzystanej do eksperymentu prasy (33,2 cm²/ /3320 mm²) [59].

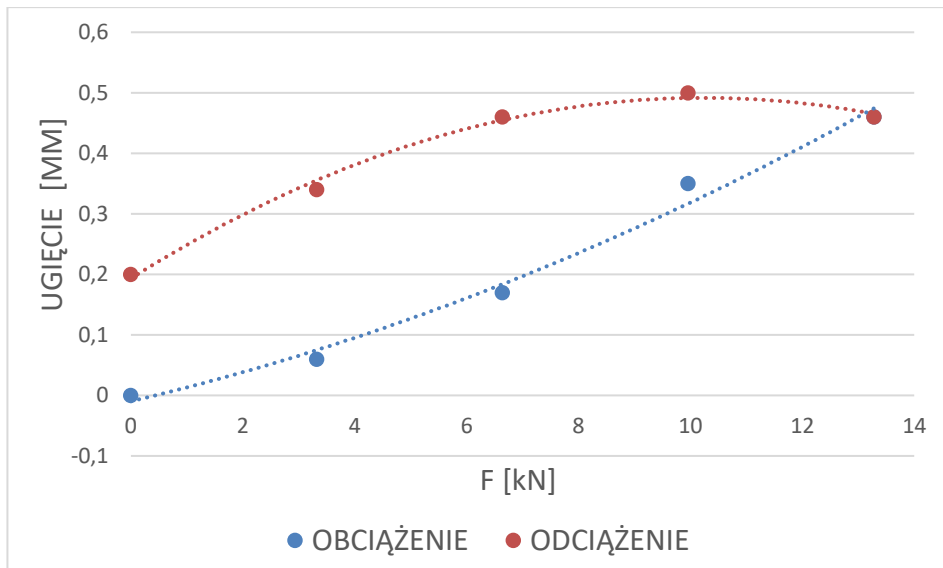
Badania polegały na obciążaniu nadproża i pomiarze odkształceń za pomocą czujników światłowodowych FBG oraz ugięcia czujnikiem cyfrowym przemieszczeń (CCP). Na wykresach 7.54, 7.55, 7.56, 7.57, 7.58, 7.59, 7.60, 7.61, 7.62, 7.63, 7.64, 7.65, 7.66, 7.67, 7.68, zaprezentowano wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych eksperymentów.

Plan badań obejmował cztery 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.

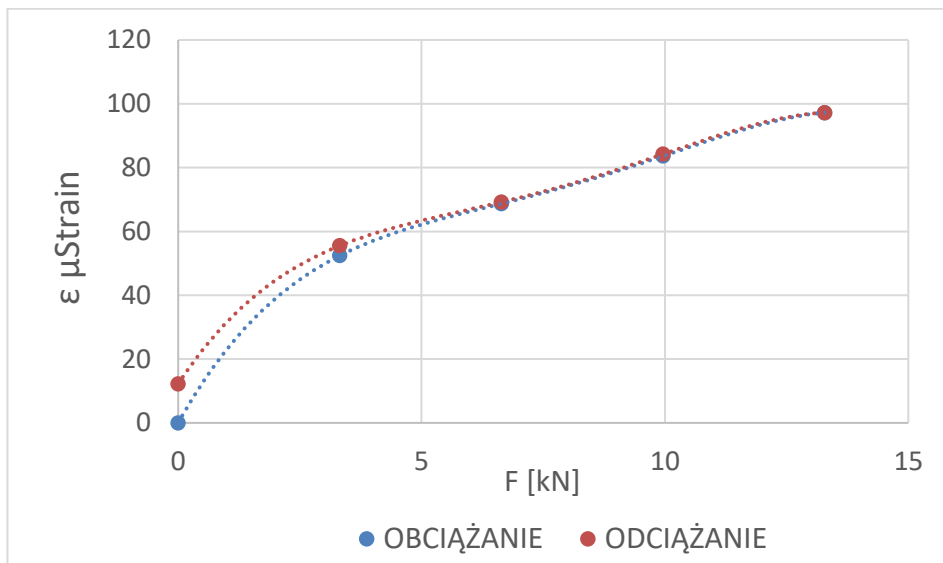
Eksperyment nr 1 – I para światłowodów (czujniki FBG na prętach nr 1 i 2)
Test nr 1:

Podczas prób obciążeniowych nadproża przedstawionych na wykresie 7.55 można zaobserwować, że dla największej wartości siły obciążenia $F_{\max} = 13,28$ kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi $\epsilon = 97,22$ μ Strain. Po odciążeniu badane nadproże nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwale wyniosło $\epsilon_{\text{trw}} = 12,2$ μ Strain.

Natomiast pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń przedstawione na wykresie 7.54 wykazują dla największej wartości siły ugięcie $f = 0,46$ mm. Podczas procesu odciążania dla siły 9,96 kN czujnik zarejestrował większe ugięcie $f = 0,50$ 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.



Wyk. 7.54. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami czujnika cyfrowego (CCP) –eksperyment nr 1, test nr 1

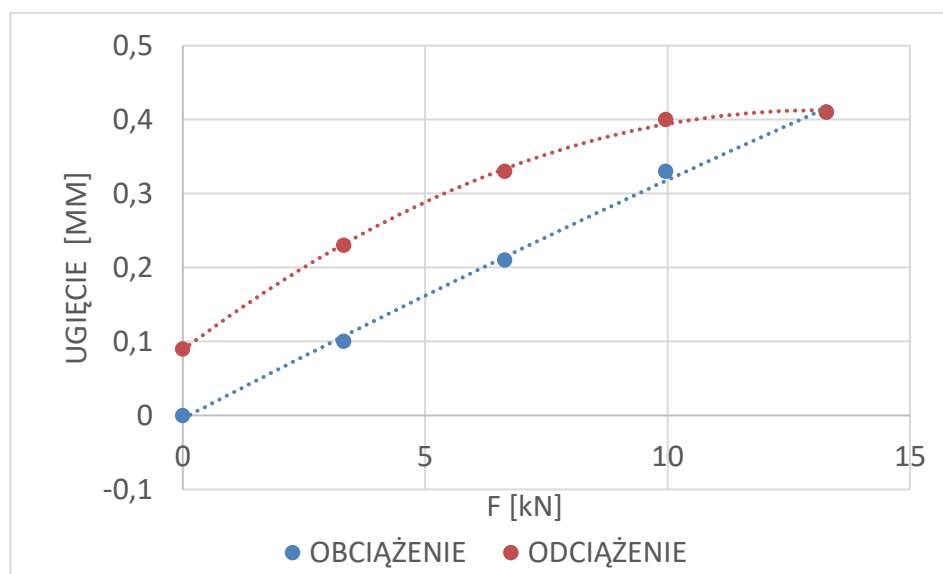


Wyk. 7.55. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami interrogatora (FBG) – eksperyment nr 1, test nr 1

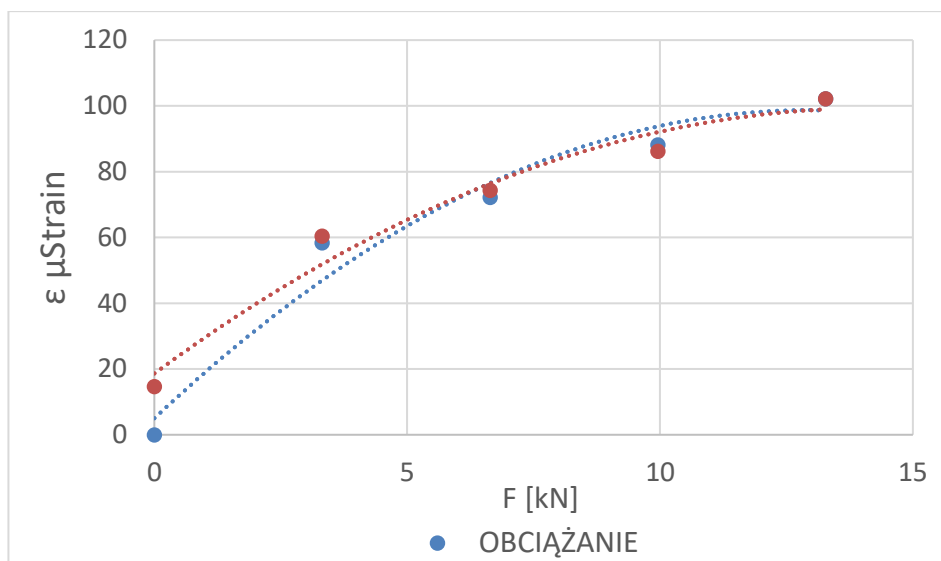
Test nr 2:

Kolejna próba obciążeniowa nadproża (przedstawiona na wykresie 7.57) wykazała, że dla ponownie przyłożonej największej wartości siły obciążenia $F_{\max} = 13,28$ kN interogator zarejestrował odkształcenie, które wynosiło $\epsilon = 102,20$ μStrain . Po odciążeniu badane nadproże nadal nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło $\epsilon_{\text{trw}} = 14,70$ μStrain i uległo zwiększeniu o $2,5$ μStrain .

Pomiary ugięć za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń (przedstawione na wykresie 7.56) 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.



Wyk. 7.56. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami czujnika cyfrowego (CCP) – eksperyment nr 1, test nr 2



Wyk. 7.57. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniem interrogatora (FBG) – eksperyment nr 1, test nr 2

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.

Faza badawcza eksperymentu trwała 66,6 s. W tym czasie interrogator optyczny wykonał 3330 pomiarów, przypisując każdej analizowanej jednostce czasu (0,02 s) indywidualny wynik mierzonego odkształcenia badanego elementu w mikrostrainach.

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

Kolejne badania wykonano analogicznie obciążając badany element i analizując tym razem dane uzyskane z drugiej pary światłowodów (czujników FBG). Uzyskane w ten sposób wyniki zaprezentowano na wykresach 7.58, 7.59, 7.60, 7.61, 7.62, 7.63, 7.64, 7.65, 7.66, 7.67, 7.68.

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:

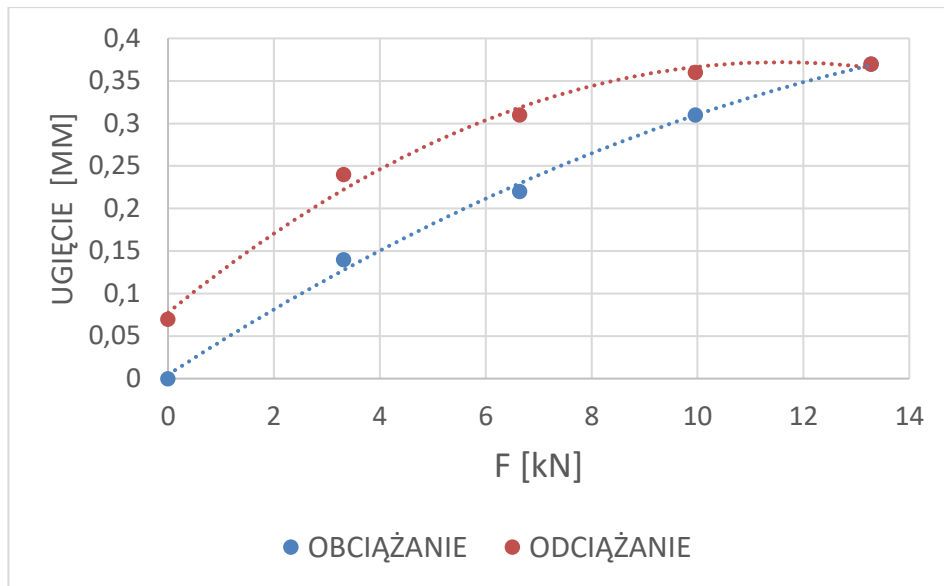
W czasie prób obciążeniowych nadproża przedstawionych na wykresie 7.59 stwierdzono, że dla największej wartości siły obciążenia

$F_{\max} = 13,28$ kN interogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi

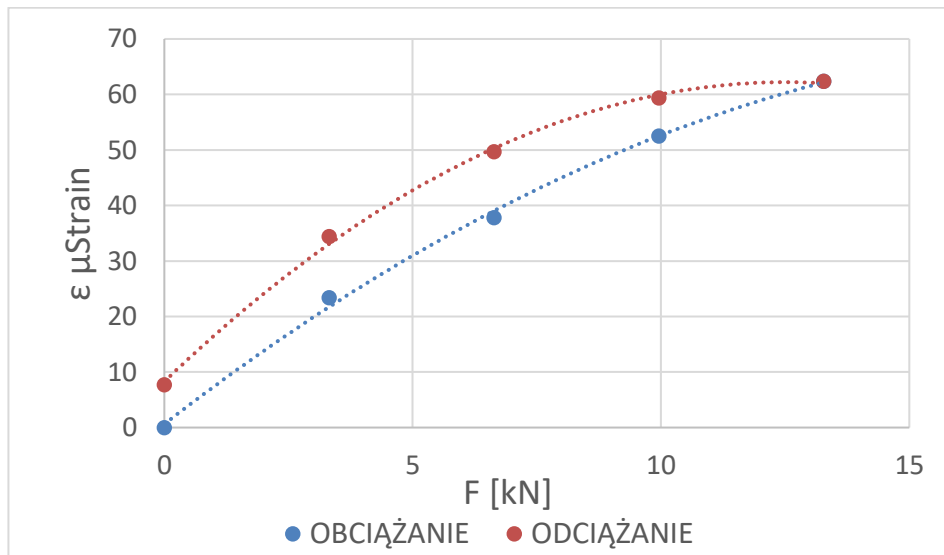
$\epsilon = 62,40$ μ Strain. Po odciążeniu badane nadproże ponownie nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło $\epsilon_{trw} = 7,70$ μ Strain.

Wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń, przedstawione na wykresie 7.58 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.



Wyk. 7.58. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniami czujnika cyfrowego (CCP) – eksperyment nr 2, test nr 1

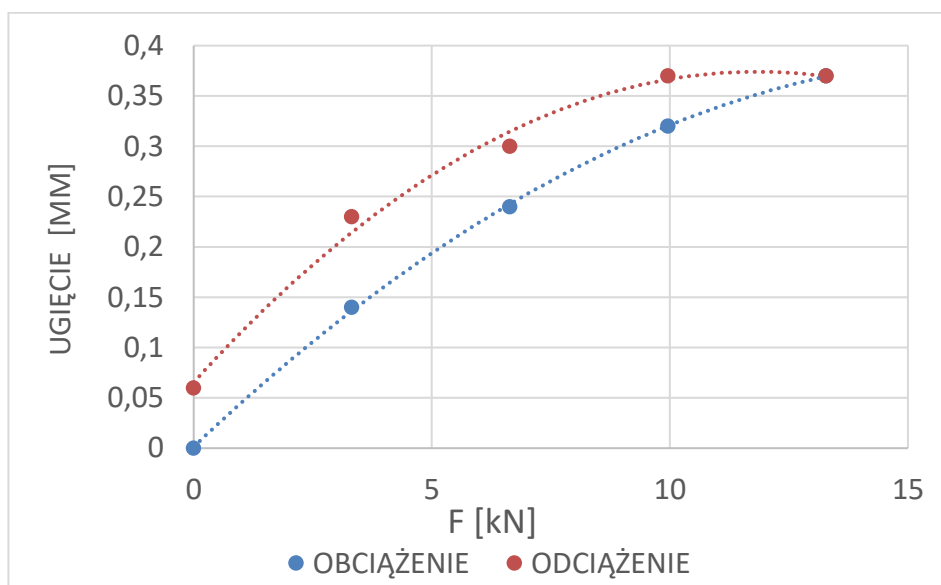


Wyk. 7.59. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami interrogatora (FBG) – eksperyment nr 2, test nr 1

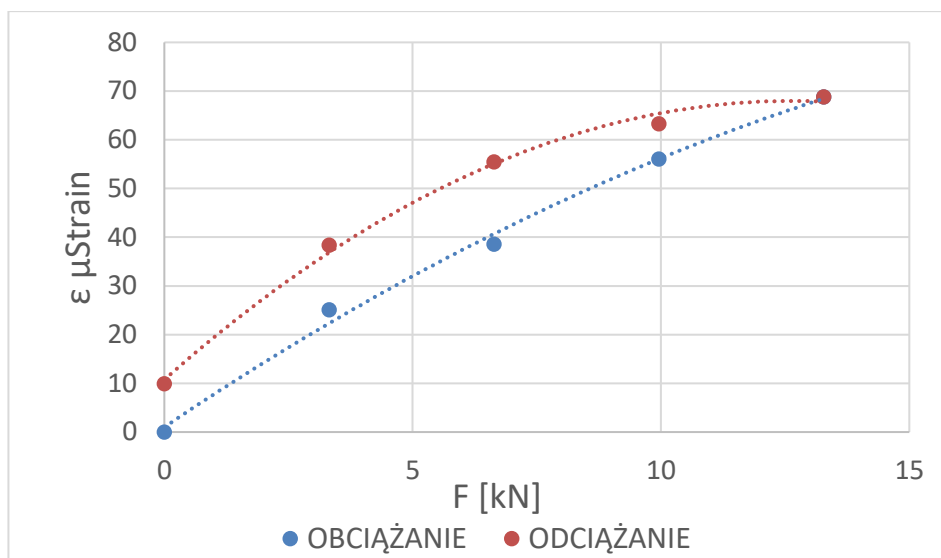
Test nr 2:

Następne próby obciążeniowe nadproża przedstawione na wykresie 7.61 określają, że dla największej wartości siły obciążenia $F_{\max} = 13,28$ kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi $\epsilon = 68,80$ μStrain . Po odciążeniu badane nadproże nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło $\epsilon_{\text{trw}} = 9,90$ μStrain .

Równocześnie wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń, przedstawione na wykresie 7.60, 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.

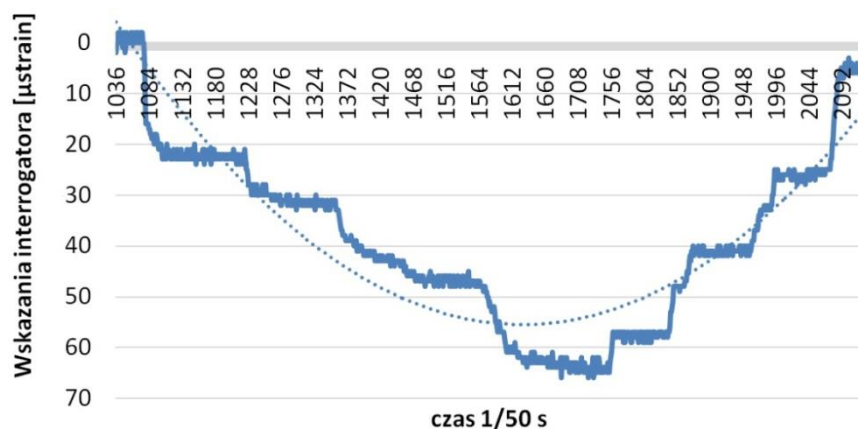


Wyk. 7.60. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniami czujnika cyfrowego (CCP) – eksperyment nr 2, test nr 2



Wyk. 7.61. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami interrogatora (FBG) – eksperyment nr 2, test nr 2

Faza badawcza eksperymentu trwała 38,26 s. W tym czasie interrogator optyczny wykonał 1.913 pomiarów, przypisując każdej analizowanej jednostce czasu (0,02 s) indywidualny wynik mierzonego odkształcenia badanego elementu w mikrostrainach. Wyniki pomiarów, odczytane przez czujniki FBG, prezentuje wykres 7.62 (jednostki czasu na osi odciętych, wartości odkształcenia w mikrostrainach na osi rzędnych).



Wyk. 7.62. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych w ramach eksperymentu nr 2

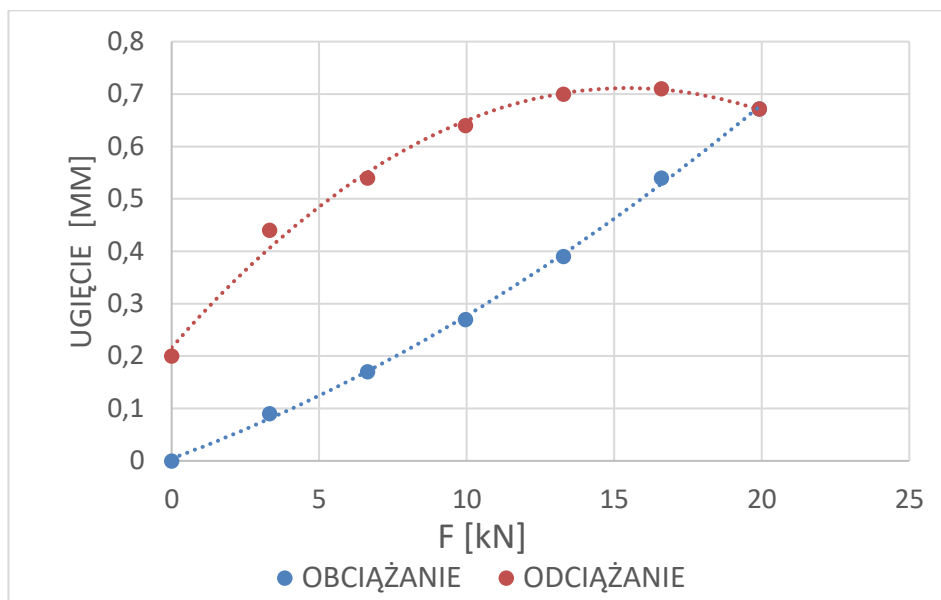
Biorąc pod uwagę, że newralgiczną strefą w analizowanym nadprożu jest jego dolny pas, dalsze pomiary koncentrowały się głównie na parze czujników światłowodowych na prętach nr 3 i 4 umieszczonych w dolnym pasie analizowanego nadproża. W ramach eksperymentu badany obiekt poddawano kolejnym obciążeniom, uzyskując następujące wyniki przedstawione na wykresach 7.63, 7.64.

a) Eksperyment nr 3 – II para światłowodów (czujniki FBG na prętach nr 3 i 4)
Test nr 3:

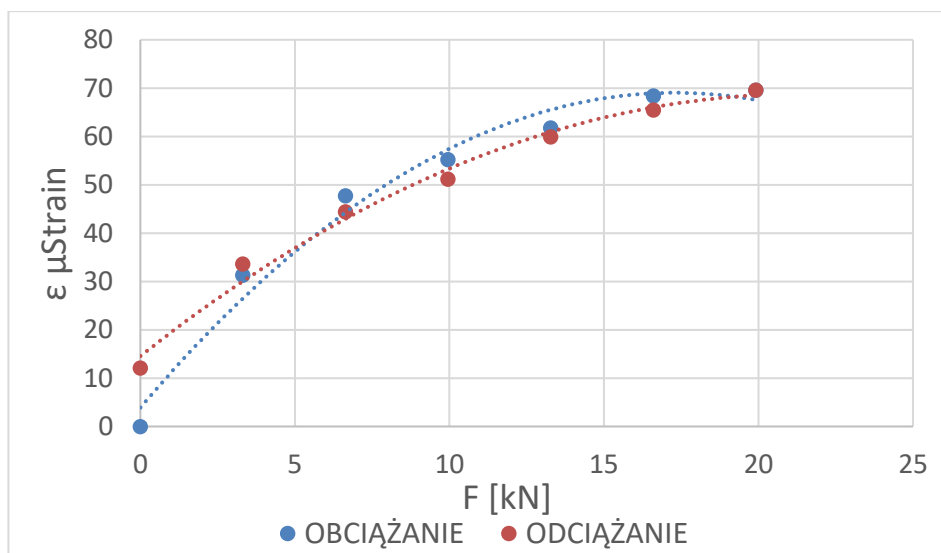
W czasie prób obciążeniowych nadproża przedstawionych na wykresie 7.64 zarejestrowano, że dla największej wartości siły obciążenia $F_{\max} = 19,92$ kN interrogator odczytał odkształcenie które wynosi $\epsilon = 69,60$ μStrain . Po odciążeniu nadproże również nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwale wyniosło $\epsilon_{\text{trw}} = 12,10$ μStrain .

Wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń, przedstawione na wykresie 7.63 wykazują dla największej wartości siły ugięcie $f = 0,672$ mm. W czasie procesu odciążania czujnik cyfrowy wskazał większe ugięcie na poziomie $f = 0,71$ mm wynikające z opóźnionej reakcji materiału. Po odciążeniu wartość ugięcia nie powróciła do stanu początkowego ($f = 0$ mm)

zatrzymując się na poziomie $f=0,20$ mm.



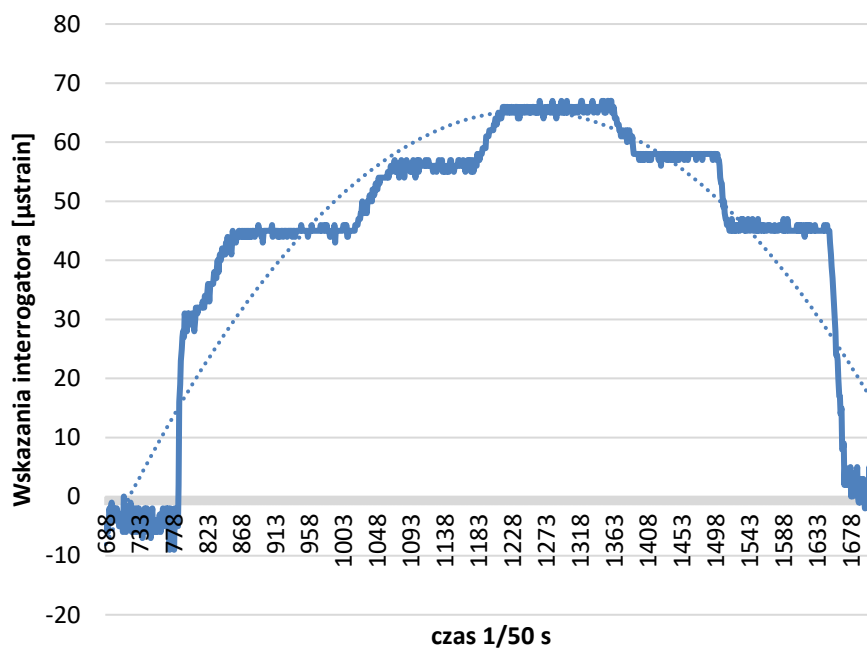
Wyk. 7.63. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami czujnika cyfrowego (CCP) – eksperyment nr 3



Wyk. 7.64. Zależność pomiędzy siłą ściskającą, a wskazaniami interrogatora (FBG) – eksperyment nr 3

Sprawdzono również histerezę dla pomiarów wykonanych czujnikiem cyfrowym przemieszczeń, która wyniosła 57 % natomiast dla czujników światłowodowych FBG 7 %.

Faza badawcza eksperymentu trwała 25,32 s. W tym czasie interrogator optyczny wykonał 1266 pomiarów, przypisując każdej analizowanej jednostce czasu (0,02 s) indywidualny wynik mierzonego odkształcenia badanego elementu w mikrostrainach. Wyniki pomiarów, zarejestrowane przez czujniki FBG prezentuje wykres 7.65 (jednostki czasu na osi odciętych, wartości odkształcenia w mikrostrainach na osi rzędnych).

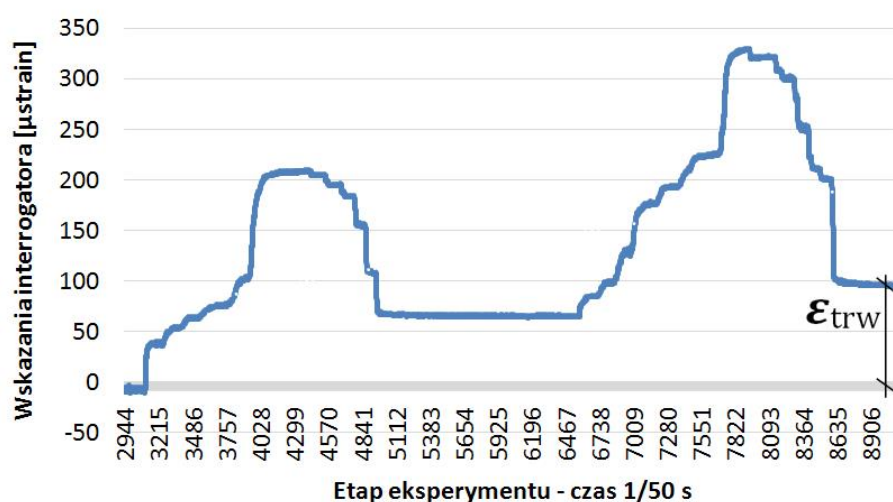


Wyk. 7.65. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych w ramach testu nr 3

W ramach kolejnego eksperymentu (nr 4) zwiększono dodatkowo nacisk, wywierany na badany obiekt – do poziomu 370 barów (122840 N). Uzyskano wówczas następujące wyniki przedstawione na wykresach 7.66, 7.67, 7.68.

Faza badawcza eksperymentu trwała 124,3 s. W tym czasie interrogator

optyczny wykonał 6215 pomiarów, przypisując każdej analizowanej jednostce czasu (0,02 s) indywidualny wynik mierzonego odkształcenia badanego elementu w mikrostrainach. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych przez system (interrogator optyczny, analizujący dane z czujnika, umieszczonego w nadprożu) prezentuje wykres 7.66 (jednostki czasu na osi odciętych, wartości odkształcenia w mikrostrainach na osi rzędnych).

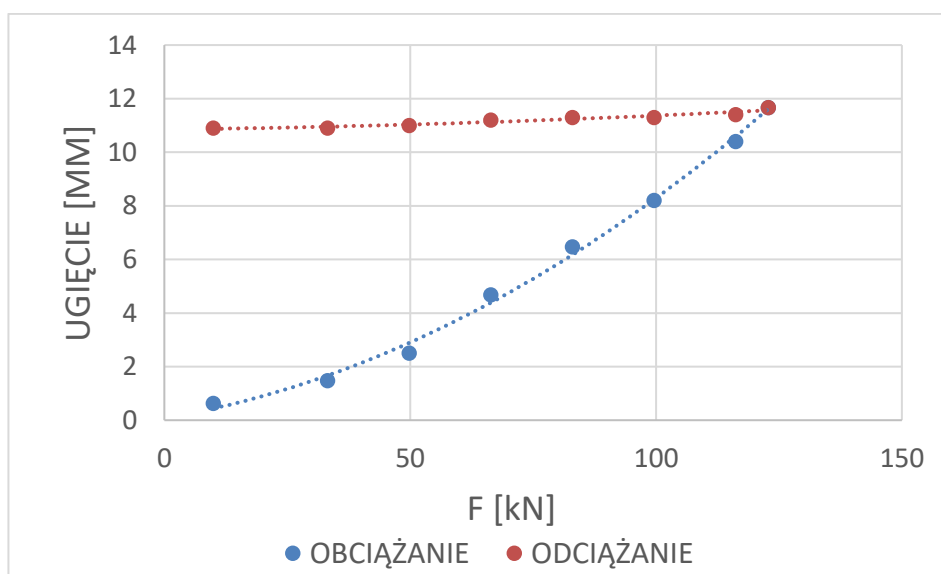


Wyk. 7.66. Wyniki pomiarów, przeprowadzonych w ramach obciążenia nr 4

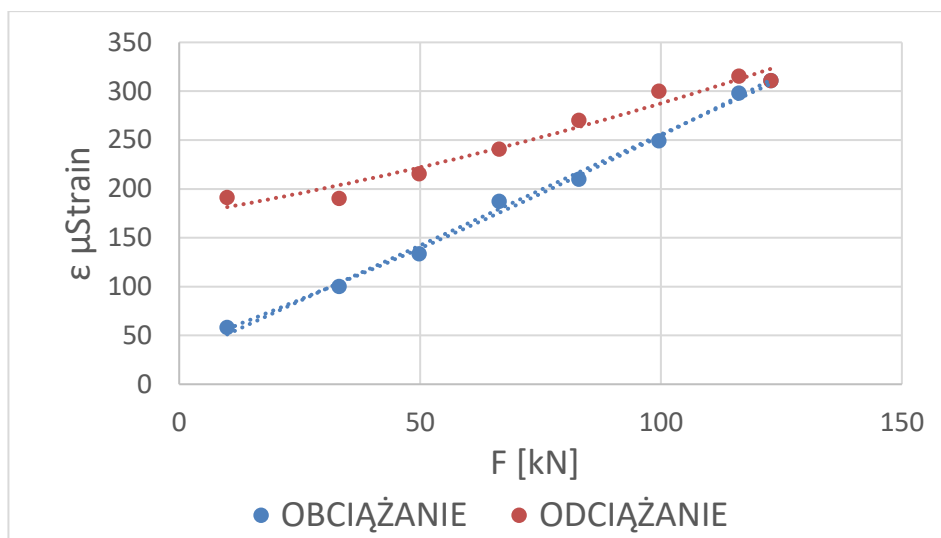
a) Eksperyment nr 4 – II para światłowodów (czujniki FBG na prętach nr 3 i 4)
Obciążenie nr 4:

Wykonując ponownie próby obciążeniowe na wykresie 7.68 odnotowano, że dla największej wartości siły obciążenia $F_{\max} = 122,84$ kN interrogator zarejestrował odkształcenie, które wynosi $\epsilon = 310,80$ µStrain. Badane nadproże uległo uszkodzeniu i po odciążeniu nie powróciło do punktu początkowego, a odkształcenie trwałe wyniosło $\epsilon_{\text{trw}} = 191,30$ µStrain.

Wykonane pomiary ugięć, za pomocą cyfrowego czujnika przemieszczeń (przedstawione na wykresie 7.67) 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.



Wyk. 7.67. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniami czujnika cyfrowego (CCP) – eksperyment nr 4



Wyk. 7.68. Zależność pomiędzy siłą ściskającą a wskazaniem interrogatora (FBG) – eksperyment nr 4

Rezultatem przeprowadzonego, eksperymentu było zniszczenie badanego elementu przy nacisku rzędu 350 – 370 barów. Wystąpiły wówczas liczne pęknięcia w okolicy lewego narożnika badanego nadproża. Skalę tych zniszczeń oraz ostateczny wygląd badanego elementu przedstawiono na fotografiach, które zostały wykonane natychmiast po zakończeniu badania (fot. 7.5 i 7.6). Sprawdzono także histerezę dla czujnika cyfrowego przemieszczeń, która wyniosła 641 %, a dla czujnika FBG 9 %.



Fot. 7.5. Badany element po zniszczeniu w rezultacie przyłożenia obciążenia



Fot. 7.6. Fragment badanego elementu po zniszczeniu w rezultacie przyłożenia obciążenia

7.4 PREFABRYKOWANA ŚCIANA Z NADPROŻEM W SYSTEMIE „POLYTECH” ZAMONTOWANA W BUDYNKU MODELOWYM

Wyprodukowany prefabrykowany panel ścienny z otworem okiennym i nadprożem dostarczono na plac budowy. Następnie za pomocą żurawia wieżowego został posadowiony na fundamencie budynku modelowego. W następnej kolejności zamontowano ściany boczne. Między ścianami, a przedmiotowym panelem ściennym powstał szalunek tracony w postaci sześciokątnego zamka. W szalunku ułożono mieszankę betonową. Czas realizacji poszczególnych etapów budowy został znacznie skrócony ze względu na zastosowanie prefabrykowanych elementów.

Na etapie badań laboratoryjnych analizowano możliwości lokalizacji czujników światłowodowych. Po przeprowadzeniu szeregu doświadczeń wstępnych okazało się, że jedyną możliwością umieszczenia czujników wewnątrz nadproża tak aby nie uległy one zniszczeniu było przymocowanie ich do prętów zbrojeniowych.

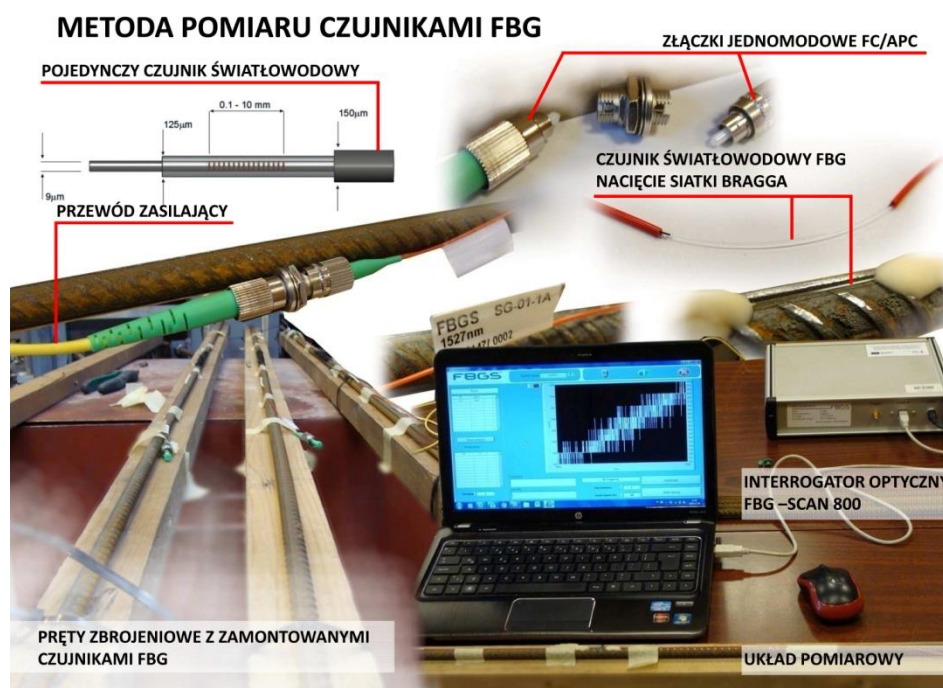
Następnie w tym celu zbudowano układ pomiarowy (fot. 7.7) składający się z elementów takich jak:

- dwóch czujników SG-01 czyli światłowodów z siatką Bragga, zakończonych złączkami jednomodowymi FC/APC,
- przewodu zasilającego, zakończonego obustronnie złączkami jednomodowymi FC/APC,
- interrogatora optycznego (dynamiczny) model S-line 800D,
- rejestratora z odpowiednim oprogramowaniem (fot. 7.9).

Interrogator optyczny zasila światłem cały system pomiarowy, a następnie analizuje zmianę długości fali w wyniku rozszczepienia się jej na siatce Bragga. Zastosowany interrogator FBG 800 umożliwia prowadzenie analiz dla fal świetlnych o długościach zawartych w przedziale 1515-1590 μm z częstotliwością 2 kHz. Sygnał przekazywany jest dalej do rejestratora

wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie [61], [62], [63].

Nadproże w badanej ścianie posiada cztery pręty zbrojeniowe ze stali żebrowanej $\varnothing 10$ o długości 2 m rys. 7.21. Dwa pręty w strefie dolnej zostały wyposażone w czujniki światłowodowe z siatką Bragga. Światłowody przymocowano w strefie rozciąganej na środku długości pręta (rys. 7.20), (fot. 7.8). Pręty zostały ponumerowane, czujniki FBG indywidualnie skalibrowano, a naciąg wstępny czujników światłowodowych dobrano na podstawie badań doświadczalnych w taki sposób by czujnik zawsze był rozciągany. W zakładzie przygotowującym prefabrykaty pręty zbrojeniowe z czujnikami FBG zalano zaprawą „POLYTECH”. Elementy prefabrykowane były 28 dni sezonowane zanim je przewieziono na plac budowy i zamontowano.



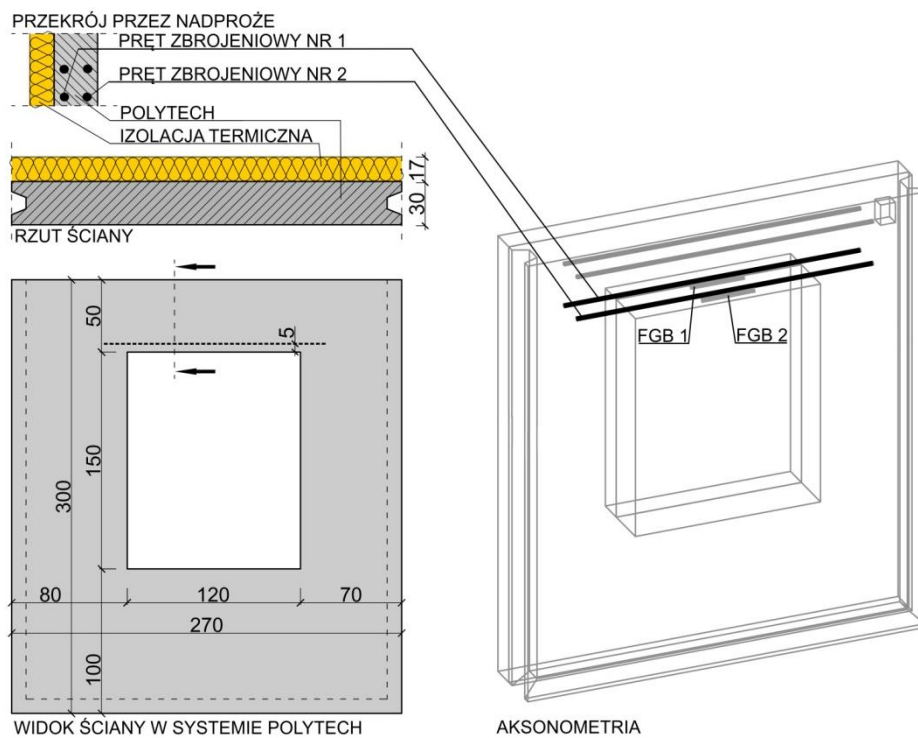
Fot. 7.7. Układ pomiarowy zastosowany do badania systemu „POLYTECH”



Fot. 7.8. Panel ścienny z nadprożem w systemie „POLYTECH” - lokalizacja czujników

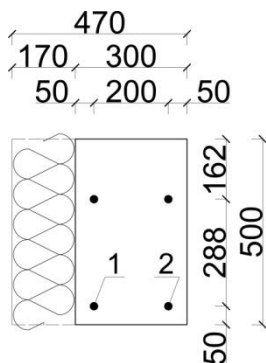


Fot. 7.9. Układ pomiarowy - interrogator i rejestrator



Rys. 7.20. Nadproże w systemie „POLYTECH” - rysunki (wymiarowanie w cm)

Szczegółowe informacje dotyczące rozmieszczenia prętów zbrojeniowych badanego nadproża i lokalizację czujników FBG przedstawiono na rysunkach 7.20 i 7.21. Prefabrykowany panel ścienny jest szeroki na 270 cm i wysokości na 300 cm. W ścianie znajduje się otwór okienny o szerokości 120 cm i wysokości 150 cm. Czujniki światłowodowe rozmieszczono w taki sam sposób jak w przypadku nadproża badanego w laboratorium koncentrując się na strefie dolnej elementu ze względu, iż jest to najbardziej newralgiczna część.



Rys. 7.21. Nadproże w systemie "POLYTECH" - przekrój (wymiarowanie w cm)

Po zamontowaniu badanej prefabrykowanej ściany i ścian bocznych na fundamencie ustalono, że cały okres obserwacji zostanie podzielony na sześć etapów.

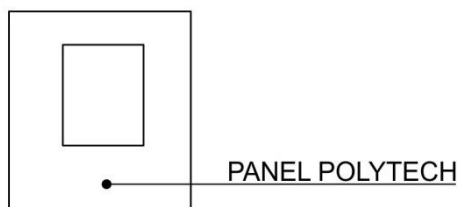
Etap 0 - po zamontowaniu prefabrykowanej ściany na fundamencie, zarejestrowano odpowiadające temu etapowi długości fali w czujnikach światłowodowych FBG oraz przyjęto odkształcenia początkowe równe $\varepsilon=0$.

Początkowe odkształcenie prętów zbrojeniowych przedstawiono w tabeli 7.19.

Tabela 7.19. Parametry czujników - przed ułożeniem betonu w wieńcu i stropie (etap 0)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	0 μ Strain	0 μ Strain

Schemat na rysunku 7.22 przedstawia panel ścienny prefabrykowany z otworem okiennym na początkowym etapie realizacji budynku.



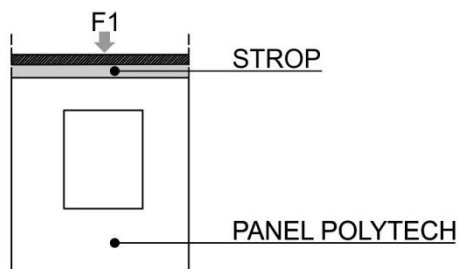
Rys. 7.22. Schemat zamontowanego panelu „POLYTECH” (etap 0)

Etap 1- wykonano wieńiec i strop. Te dwa elementy spowodowały nowy stan obciążeniowy (F1) nadproża analizowanego elementu prefabrykowanego. Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 7.20. Wartość obciążenia po wykonaniu wieńca i stropu (na panel ścienny z nadprożem) wynosiła około 8,02 kN/m.

Tabela 7.20. Parametry czujników - po ułożeniu betonu w wieńcu i stropie (etap 1)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	6,37 μ Strain	5,59 μ Strain

Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w etapie 1 czujniki FBG wykazały prawie równomierne odkształcenie prętów zbrojeniowych nadproża. Średnia wartość wynosiła 5,98 μ Strain. Na schemacie z rysunku 7.23 zaznaczono strop, który spoczywa za pośrednictwem wieńca żelbetowego na prefabrykowanej ścianie.



Rys. 7.23. Schemat zamontowanego panelu „POLYTECH” (etap 1 i 1')

Etap 1' - po dziesięciu dniach sezonowania betonu w wieńcu i stropie wykonano pomiary. Wyniki pomiarów przedstawia tabela 7.21.

Tabela 7.21. Parametry czujników - po dziesięciu dniach sezonowania betonu w wieńcu i stropie (etap 1')

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	13,03 μ Strain	11,32 μ Strain

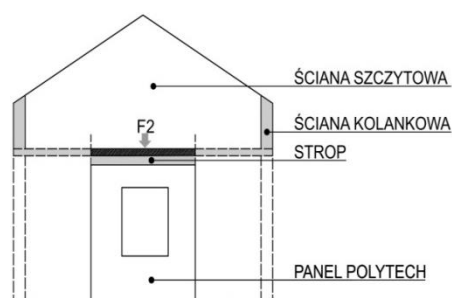
Kolejny pomiar przeprowadzony na etapie 1' potwierdził, iż pod wpływem obciążenia, które oddziałuje na badane nadproże, badane pręty odkształcały się w sposób niemal równomierny - wartość średnia odkształcenia wynosiła 12,17 μ Strain.

Etap 2 - dalszy etap robót budowlanych polegał na zamontowaniu ścian szczytowych i kolankowych, co spowodowało dalszy wzrost obciążenia nadproża do stanu (F2). Wartości które zostały odczytane z czujników FBG zawiera tabela 7.22. Obciążenie (panelu ściennego z nadprożem) po montażu ścian szczytowych i kolankowych wynosiło około 14,96 kN/m.

Tabela 7.22. Parametry czujników - po montażu ścian szczytowych i kolankowych (etap 2)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	22,74 μ Strain	17,59 μ Strain

Postęp robót na etapie 2 spowodował wzrost odkształcenia kontrolowanego zbrojenia, a wartość średnia odkształcenia wyniosła 20,16 μ Strain. Elementy budynku zamontowane nad obiektem badań zilustrowano na rysunku 7.24.



Rys. 7.24. Schemat zamontowanego panelu „POLYTECH” - (etap 2)

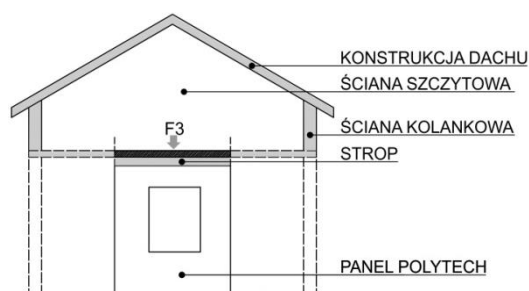
Etap 3 - kolejny etap to wykonanie drewnianej konstrukcji dachu, która dodatkowo obciążyla monitorowane nadproże (F3). Tabela 7.23 zawiera wyniki pomiarów na etapie 3 realizacji budynku. Wartość obciążenia (panelu ściennego

z nadprożem) po wykonaniu konstrukcji drewnianej dachu wynosiła około 15,26 kN/m.

Tabela 7.23. Parametry czujników - po wykonaniu więźby dachowej (etap 3)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	45,98 μ Strain	43,82 μ Strain

Zrealizowana konstrukcja dachu również wpłynęła na prawie równomierny wzrost odkształcenia prętów nadproża, gdyż wartość średnia odkształcenia była na poziomie 44,90 μ Strain. Na schemacie (rys. 7.25) wskazano konstrukcje dachu, której masa wywołała wzrost odkształceń.



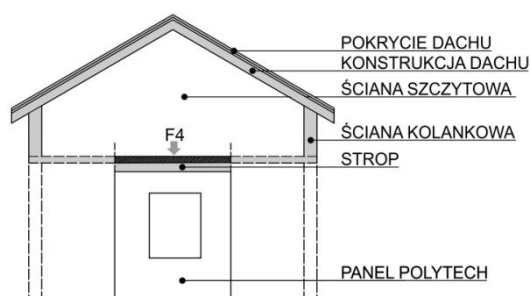
Rys. 7.25. Schemat zamontowanego panelu „POLYTECH” (etap 3)

Etap 4 - Ostatnim etapem budowy było wykonanie pokrycia dachu dachówkami ceramicznymi, które spowodowało dodatkowe obciążenie (F4). W trakcie budowy zaobserwowano narastający proces obciążania nadproża. Pozyskane dane podczas pomiarów zamieszczono w tabeli 7.24. Obciążenie (panelu ściennego z nadprożem) po zamontowaniu pokrycia dachu wynosiło około 16,72 kN/m.

Tabela 7.24. Parametry czujników - po wykonaniu pokrycia dachu (dachówka ceramiczna) - (etap 4)

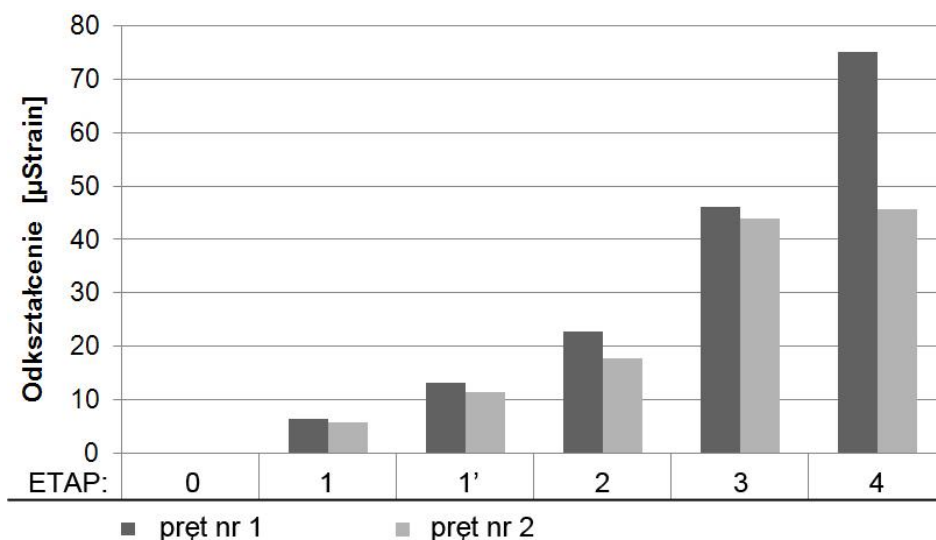
Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	75,03 μ Strain	45,48 μ Strain

Wyniki pomiarów przeprowadzonych po zamontowaniu pokrycia dachowego (rys. 7.26) wykazały znaczny przyrost nie równomiernego odkształcenia prętów zbrojeniowych nadproża. Pręt nr 1 zlokalizowany od strony zewnętrznej budynku wykazał większe odkształcenie w porównaniu z wartością odkształcenia pręta nr 2.



Rys. 7.26. Schemat zamontowanego panelu „POLYTECH” (etap 4)

Na wykresie 7.69 przedstawiono jak zwiększało się odkształcenie badanych prętów zbrojeniowych znajdujących się w nadprożu prefabrykowanej ściany na poszczególnych etapach realizacji budynku modelowego.



Wyk. 7.69. Odkształcenia prętów zbrojeniowych nadproża w czasie realizacji budynku

WYNIKI BADAŃ

Odształcenia prętów zbrojeniowych nadproża były mierzone równocześnie na poszczególnych etapach budowy (tabele 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24). Zaobserwowano narastające odkształcenie nadproża. Największą wartość odkształcenia zarejestrowano na pręcie nr 1 (rys. 7.21), która wyniosła 75,03 μ Strain. Po wykonaniu konstrukcji więźby dachowej i pokrycia dachu (tab. 7.24) w pręcie nr 2 zarejestrowano wartość odkształcenia 45,48 μ Strain. Na każdym etapie budowy elementy konstrukcyjne budynku, które były montowane nad badanym panelem ściennym z otworem okiennym i nadprożem oraz w jego pobliżu, wpływały na zwiększenie odkształcenia zbrojenia zastosowanego w nadprożu. Zbrojenie w badanych punktach nie odkształcało się w sposób jednakowy (tab. 7.24), ponieważ wystąpił nie równomierny rozkład sił działających na kontrolowany element.

7.5 SŁUP ŻELBETOWY JAKO ŁĄCZNIK ŚCIAN PREFABRYKOWANYCH W SYSTEMIE „POLYTECH”

Prefabrykowane ściany zamontowane na fundamencie posiadają odpowiednio wyprofilowane boki tworzące szalunek tracony w kształcie sześciokąta, który powstaje w miejscu łączenia poszczególnych paneli (fot. 7.10). Szalunek tracony formuje łącznik ścian w postaci słupa, który powstaje po ułożeniu betonu (rys. 7.27). W celu przeprowadzenia badań łącznika ścian w postaci słupa żelbetowego dobrano dwa czujniki światłowodowe FBG. Czujniki w warunkach laboratoryjnych przetestowano i zainstalowano na prętach zbrojeniowych przeznaczonych do zamontowania w szalunku traconym.

Następnie zbudowano układ pomiarowy (fot. 7.11), który składał się z elementów takich samych jak w przypadku przeprowadzonych badań prefabrykowanego nadproża.

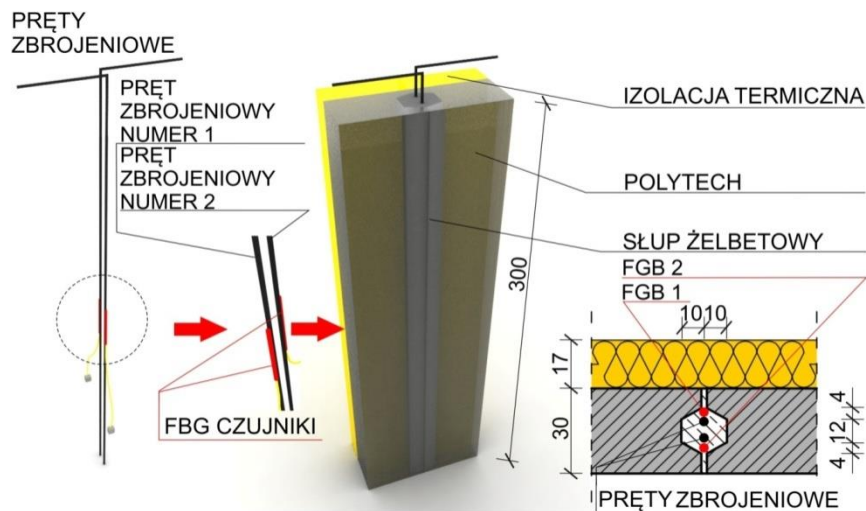
Na fotografii 7.10 przedstawiono lokalizację słupa żelbetowego.



Fot. 7.10. Słup żelbetowy w systemie „POLYTECH” - lokalizacja



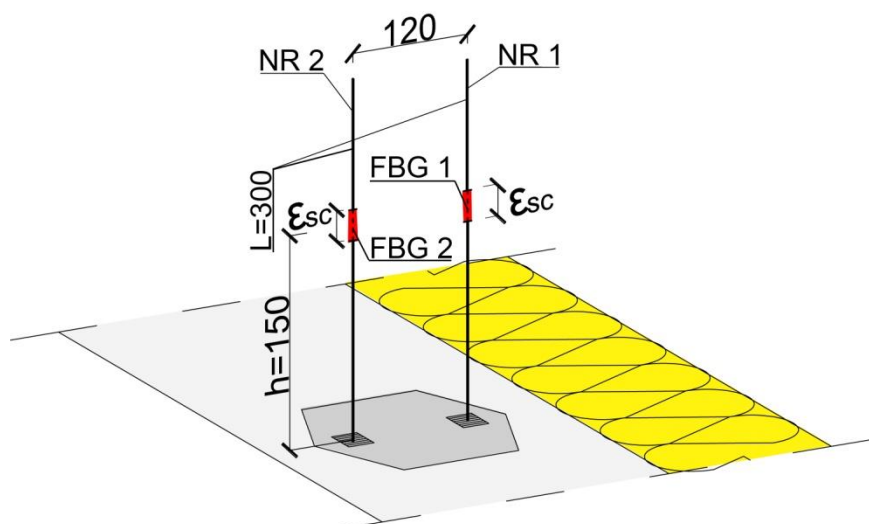
Fot. 7.11. Układ pomiarowy z rejestratorem i oprogramowaniem



Rys. 7.27. Słup żelbetowy w systemie „POLYTECH” - rysunki (wymiary w cm)

Do budowy słupa żelbetowego użyto dwa pręty zbrojeniowe o średnicy $\varnothing 10$ i długości 320 cm. Na prętach zostały zamontowane czujniki światłowodowe z siatką Bragga. Światłowody przymocowano na środku długości prętów (150 cm od podstawy) w strefach zewnętrznych łącznika (rys. 7.28), (fot. 7.11). Pręty zostały ponumerowane, a czujniki FBG indywidualnie sprawdzono i skalibrowano. Na kolejnym etapie przygotowane pręty zbrojeniowe zostały zamontowane w szalunku traconym, który powstał pomiędzy prefabrykowanymi panelami ściennymi. Po zamontowaniu prętów zbrojeniowych z czujnikami FBG

w szalunku traconym ułożono mieszankę betonową C16/20. Po 28 sezonowania słup osiągnął odpowiednią wytrzymałość.



Rys. 7.28. Lokalizacja czujników FBG i rozmieszczenie prętów zbrojeniowych słupa w szalunku oraz pomiar odkształcenia ϵ_{sc} — rysunek (wymiary w cm)

Po wykonaniu słupa żelbetowego objętego badaniami zaplanowano sześć etapów podczas których wykonano odczyty z czujników FBG.

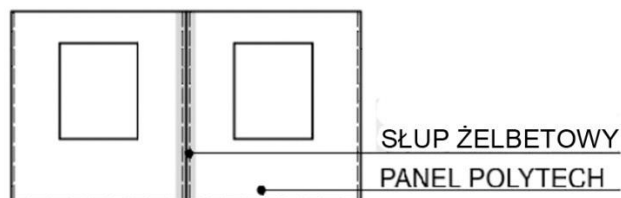
Na poszczególnych etapach budowy domu zarejestrowano odkształcenia prętów w słupie żelbetowym:

Etap 0 - obejmował montaż prefabrykowanych ścian na fundamencie, wykonanie łącznika ścian w postaci słupa żelbetowego. Przyjęto, że odkształcenia początkowe są równe $\epsilon=0$ (tab. 7.25).

Tabela 7.25. Parametry czujników — przed ułożeniem betonu w wieńcu i na stropie (etap 0)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	0 μ Strain	0 μ Strain

Rysunek 7.29 przedstawia lokalizację łącznika ścian prefabrykowanych na początkowym etapie budowy domu modelowego.



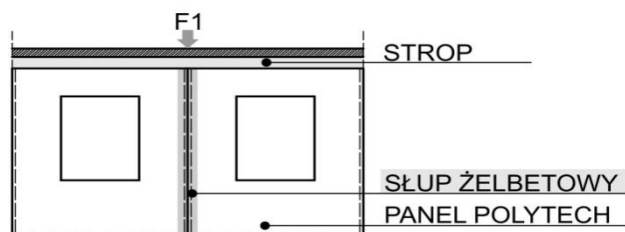
Rys. 7.29. Schemat lokalizacji słupa żelbetowego (etap 0).

Etap 1- polegał na wykonaniu wieńca i stropu, te dwa elementy spowodowały nowy stan obciążeniowy (F1) słupa żelbetowego. Odczytane wyniki pomiarów umieszczono w tabeli 7.26. Wartość obciążenia (słupa) po wykonaniu wieńca i stropu wynosiła około 1,60 kN.

Tabela 7.26. Parametry czujników — po ułożeniu betonu w wieńcu i stropie (etap 1)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	4,98 μ Strain	1,82 μ Strain

Wykonanie wieńca i stropu spowodowało pojawienie się odkształceń prętów zbrojeniowych słupa. Można oszacować, że początkowe pomiary wykonane na etapie 1 wykazały minimalne odkształcenie słupa żelbetowego w kierunku zewnętrznym budynku. Schemat na rysunku 7.30 pokazuje strop i wieńiec spoczywający na prefabrykowanych ścianach i słupie żelbetowym.



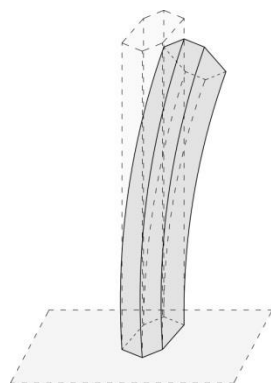
Rys. 7.30. Schemat lokalizacji słupa żelbetowego i elementów budynku (etap 1i 1')

Etap 1' - odczytano dane pobrane z czujników po dziesięciu dniach sezonowania betonu w wieńcu i stropie które przedstawiono w tabeli 7.27.

Tabela 7.27. Parametry czujników – po dziesięciu dniach sezonowania betonu w wieńcu i stropie (etap 1')

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	-0,69 μ Strain	3,65 μ Strain

Podczas procesu sezonowania betonu w wieńcu i stropie słup odkształcał się w kierunku zewnętrznym (rys. 7.31).



Rys. 7.31. Schemat odkształcenia słupa żelbetowego w kierunku zewnętrznym budynku (etap 1 i 1')

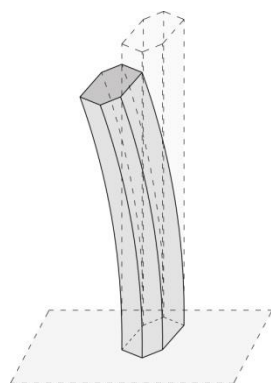
Etap 2 - zamontowano ściany szczytowe i kolankowe co spowodowało wzrost obciążenia słupa do stanu obciążeniowego (F2) odczytane dane z czujników FBG przedstawiono w tabeli 7.28. Obciążenie (słupa żelbetowego) po montażu ścian szczytowych i kolankowych wynosiło około 2,99 kN.

Tabela 7.28. Parametry czujników – po montażu ścian szczytowych i kolankowych (etap 2)

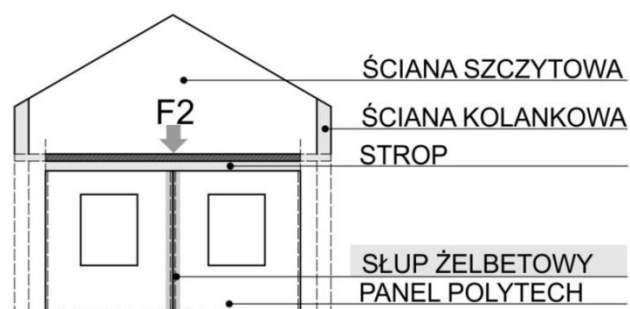
Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	0,27 μ Strain	-3,08 μ Strain

Po zamontowaniu ścian szczytowych i kolankowych zwiększyły się odkształcenia prętów zbrojeniowych powodujące odkształcenie słupa żelbetowego w kierunku wewnętrznym względem budynku (rys. 6.5).

Na rysunku 7.33 zilustrowano schemat przedstawiający elementy budynku zamontowane na etapie 2.



Rys. 7.32. Schemat odkształcenia słupa żelbetowego w kierunku wewnętrznym budynku (etap 2)



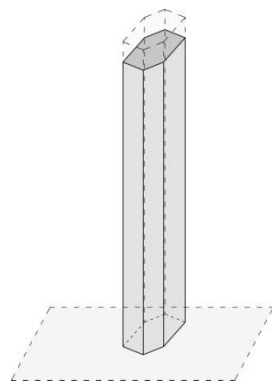
Rys. 7.33. Schemat zamontowanego słupa żelbetowego i elementów budynku (etap 2)

Etap 3 – na kolejny etapie zrealizowano drewnianą konstrukcję dachu, która obciążyła monitorowany słup (F3). Wyniki pomiarów na etapie 3 zawiera tabela 7.29. Wartość obciążenia (słupa) po wykonaniu konstrukcji drewnianej dachu wynosiła około 3,05 kN.

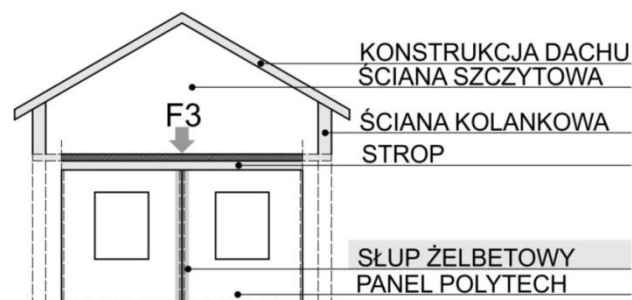
Tabela 7.29. Parametry czujników – po wykonaniu więźby dachowej (etap 3)

Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	-12,69 μ Strain	-13,04 μ Strain

Po wykonaniu więźby dachowej (rys. 7.34) zmieniły się odkształcenia prętów powodujące powrót kształtu słupa do pionu (rys. 7.33). Zaobserwowano korzystny stan obciążeniowy wskazujący na równomierne ściskanie słupa na całej jego objętości.



Rys. 7.33. Schemat odkształcenia słupa żelbetowego w budynku (etap 3)



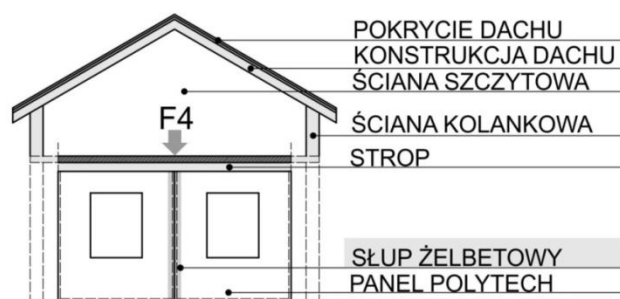
Rys. 7.34. Schemat zamontowanego słupa żelbetowego i elementów budynku (etap 3)

Etap 4 – Na ostatnim etapie budowy zrealizowano pokrycie dachu dachówkami ceramicznymi, które wpłynęło na zwiększone obciążenie (F4). Na poszczególnych etapach budowy zaobserwowano proces obciążania słupa żelbetowego, wyniki pomiarów zawiera tabela 7.30. Obciążenie (słupa) po zamontowaniu pokrycia dachu wynosiło około 3,34 kN.

Tabela 7.30. Parametry czujników – po wykonaniu pokrycia dachu (dachówka ceramiczna)-(etap 4)

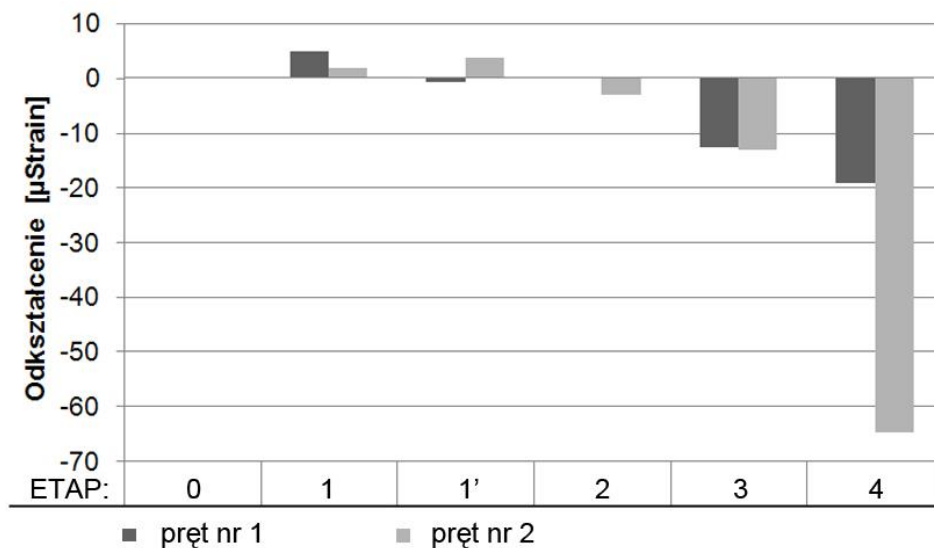
Opis parametru czujnika	Czujnik FBG na pręcie nr 1	Czujnik FBG na pręcie nr 2
1	2	3
odkształcenie	-19,25 μ Strain	-64,74 μ Strain

Po ułożeniu dachówek, odczytane dane z czujników FBG wykazały, iż słup żelbetowy odkształcił się w kierunku wewnętrznym budynku (rys. 7.36). Schemat na rysunku 7.35 przedstawia elementy budynku znajdujące się nad badanym łącznikiem ścian prefabrykowanych.

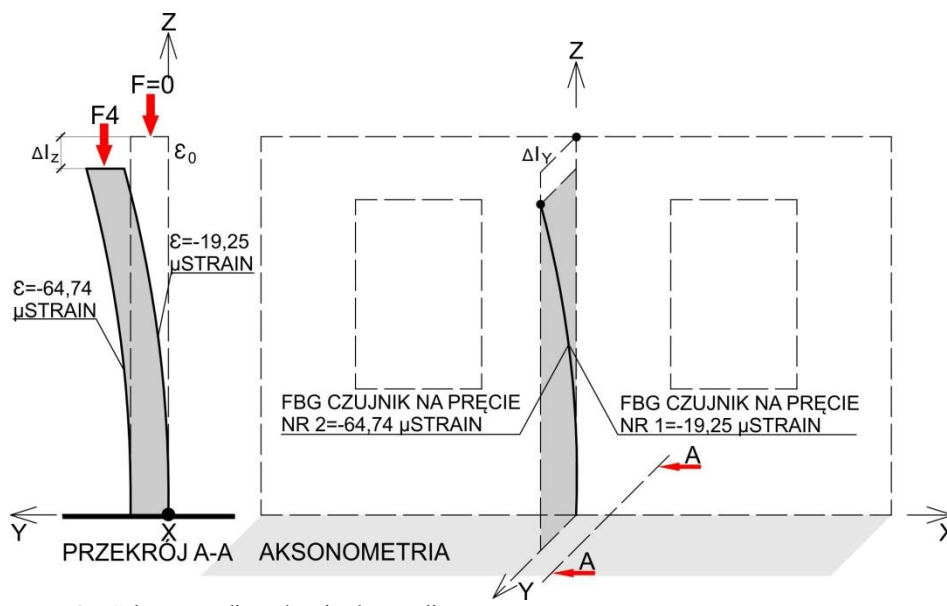


Rys. 7.35. Schemat zamontowanego słupa żelbetowego (etap 4)

Na wykresie 7.70 graficznie określono odkształcenie prętów zbrojeniowych przedmiotowego słupa na poszczególnych etapach realizacji budynku modelowego.



Wyk. 7.70. Odształcenie prętów zbrojeniowych słupa żelbetowego podczas realizacji budynku



Rys. 7.36. Schematy odkształcenia słupa żelbetowego

WYNIKI BADAŃ

Odształcenia prętów zbrojeniowych słupa żelbetowego były mierzone równocześnie na poszczególnych etapach budowy (tab. 7.25, 7.26, 7.27, 2.28, 7.29, 7.30). Zaobserwowano narastające obciążenie słupa. Największą wartość odkształcenia zarejestrowano w pręcie nr 2 (rys. 7.36) i wynosiła ona $-64,74 \mu\text{Strain}$. W pręcie nr 1 zarejestrowano wartość odkształcenia $-19,25 \mu\text{Strain}$ po wykonaniu konstrukcji więźby dachowej i pokrycia dachu. Na każdym etapie budowy elementy konstrukcyjne budynku, które były montowane nad badanym słupem żelbetowym i w jego pobliżu wpływały na zwiększenie odkształcenia zbrojenia zastosowanego w słupie. Zbrojenie w badanych punktach nie odkształcało się w sposób jednakowy. Niejednakowe odkształcanie się zbrojenia i całego słupa żelbetowego można przypuszczać, że zostało spowodowane zwiększającym się nierównomiernym oddziaływaniem obciążenia przekazanego na wieniec.

7.6 STROP ZESPOLONY ŻELBETOWY W SYSTEMIE „POLYTECH”

Następnym badanym elementem modelowego budynku był strop zespolony zastosowany w systemie prefabrykacji „POLYTECH” (fot. 7.12).

Na początku badań przygotowano urządzenia pomiarowe (fot. 7.13) i czujnik FBG typ SG-01.



Fot. 7.12. Strop zespolony na etapie budowy

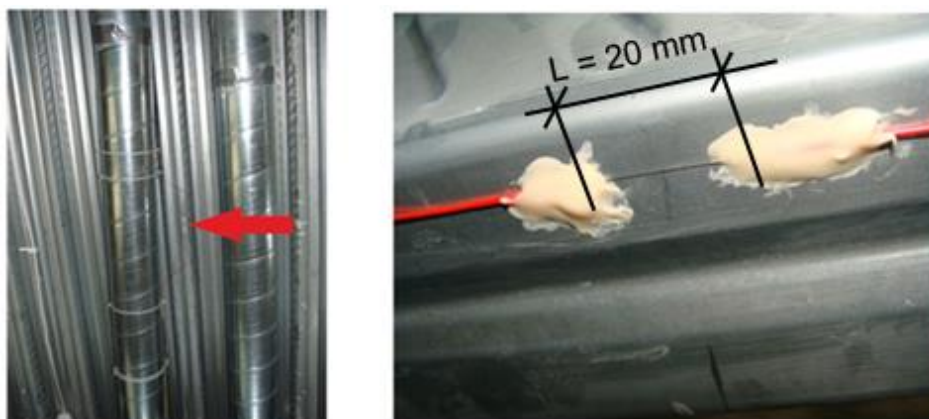


Fot. 7.13. Układ pomiarowy

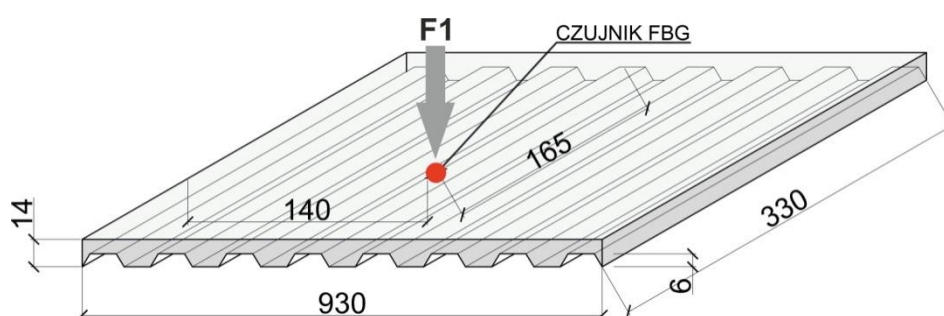
Do budowy stropu o rozpiętości 930 cm x 330 cm i grubości 14 cm użyto szalunek tracony z blachy trapezowej (cofra plus 60), pręty $\varnothing 8$ i siatkę przeciw skurczową 15cm x 15cm $\varnothing 6$ oraz beton klasy C20/25. Całość konstrukcji spoczywa na ścianach prefabrykowanych wykonanych zgodnie z systemem

„POLYTECH” za pośrednictwem wieńca żelbetowego [68]. Po 28 dniach sezonowania strop osiągnął odpowiednią wytrzymałość. Na środku rozpiętości stropu w udostępnionym pomieszczeniu przymocowano do blachy trapezowej czujnik światłowodowy z siatką Bragga. Światłowód został przymocowany w strefie zewnętrznej szalunku traconego (fot. 7.14).

W celu wyznaczenia rzeczywistej wartości odkształceń występujących w stropie przeprowadzono próby kontrolowanego obciążania i odciążania elementu konstrukcyjnego w badanym punkcie. Obciążenie ze stropu objętego badaniami określono na około $4,86 \text{ kN/m}^2$.



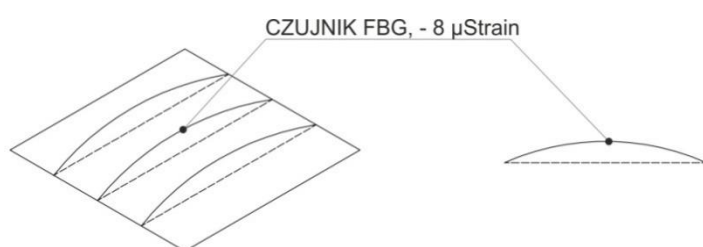
Fot. 7.14. Strop zespolony - lokalizacja czujnika FBG



Rys. 7.37. Schemat stropu zespolonego - lokalizacja czujnika FBG

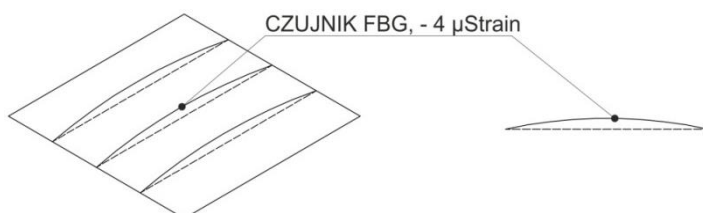
Na poszczególnych etapach badań zarejestrowano odkształcenia stropu, które przedstawiono na rysunkach: (rys. 7.38), (rys. 7.39), (rys. 7.40), (rys. 7.41), (rys. 7.42), (rys. 7.43), (rys. 7.44.), (rys. 7.45), (rys. 7.46), (rys. 7.47), (rys. 7.48), (rys. 7.49).

Etap 1 – Strop w stanie nie obciążonym wykazywał odkształcenie o wartości $-8 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.38).



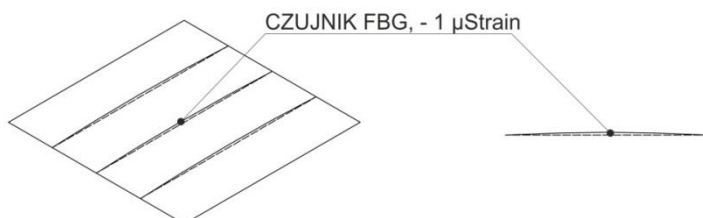
Rys. 7.38. Schemat stropu etap 1 – obciążenie stropu $0,00 \text{ kN} = - 8 \mu\text{Strain}$

Etap 2 – Strop obciążono masą o wartości $3,75 \text{ kN}$, element wykazał odkształcenie na poziomie $-4 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.39).



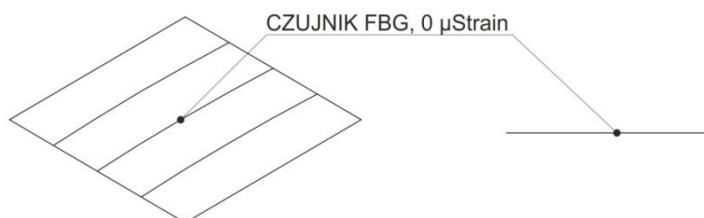
Rys. 7.39. Schemat stropu etap 2 – obciążenie stropu $3,75 \text{ kN} = - 4 \mu\text{Strain}$

Etap 3 – Zwiększono obciążenie stropu do wartości $6,75 \text{ kN}$ i zarejestrowano odkształcenie równe $-1 \mu\text{Strain}$ (7.40).



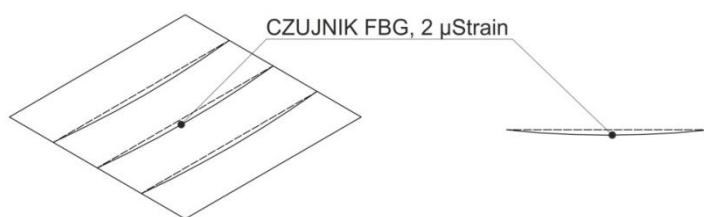
Rys. 7.40. Schemat stropu etap 3 – obciążenie stropu $6,75 \text{ kN} = - 1 \mu\text{Strain}$

Etap 4 – Ponownie przyłożono większe obciążenie stropu do wartości 7,5 kN rejestrując odkształcenie 0 μStrain (rys. 7.41).



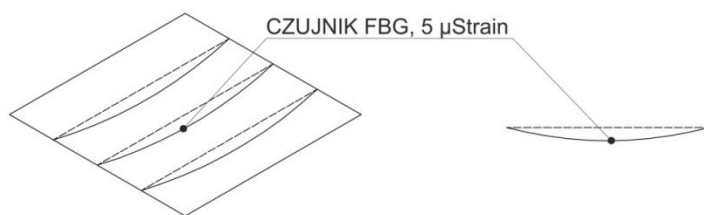
Rys. 7.41. Schemat stropu etap 4 – obciążenie stropu 7,50 kN = 0 μStrain

Etap 5 – Nadal zwiększano obciążenie stropu aż do wartości 10,00 kN, odczytano odkształcenie elementu wynoszące 2 μStrain (rys. 7.42).



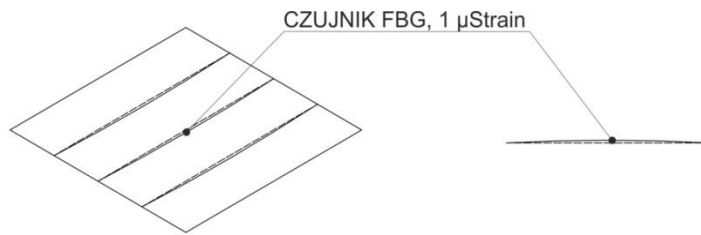
Rys. 7.42. Schemat stropu etap 5 – obciążenie stropu 10,00 kN = 2 μStrain

Etap 6 – Na kolejnym etapie wartość przyłożonego obciążenia wzrosła do 11,00 kN, a odkształcenie się zwiększyło do 5 μStrain (rys. 7.43).



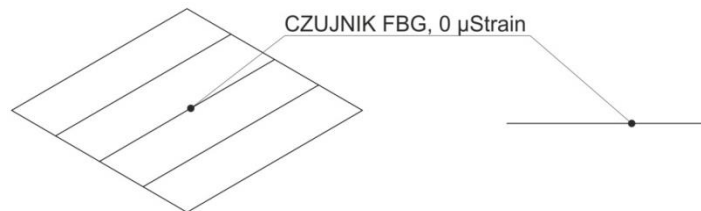
Rys. 7.43. Schemat stropu etap 6 – obciążenie stropu 11,00 kN = 5 μStrain

Etap 7 – Strop odciążono do masy 7,5 kN, równocześnie odkształcenie się zmieniło do poziomu 1 μStrain (rys. 7.44).



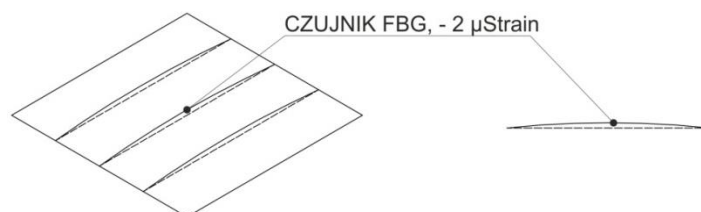
Rys. 7.44. Schemat stropu etap 7 – obciążenie stropu 7,5 kN = 1 μ Strain

Etap 8 – Ponownie zmniejszono wartość obciążenia stropu do 6,00 kN i odczytano odkształcenie równe 0 μ Strain (rys. 7.45).



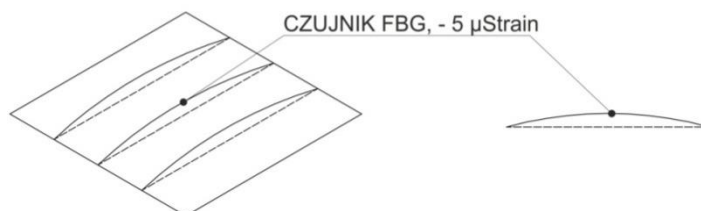
Rys. 7.45. Schemat stropu etap 8 – obciążenie stropu 6,00 kN = 0 μ Strain

Etap 9 – Kolejne odciążenie stropu do wartości 3,50 kN spowodowało zmianę odkształcenia do -2 μ Strain (rys. 7.46).



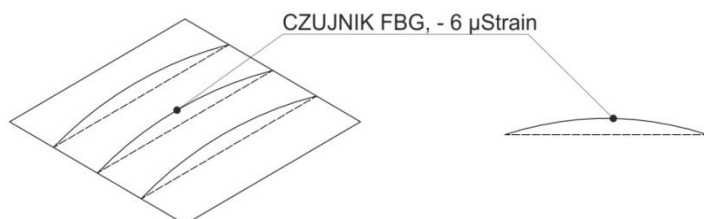
Rys. 7.46. Schemat stropu etap 9 – obciążenie stropu 3,50 kN = -2 μ Strain

Etap 10 – Wartość obciążenia stropu obniżono do 2,25 kN i zarejestrowano odkształcenie na poziomie -5 μ Strain (rys. 7.47).



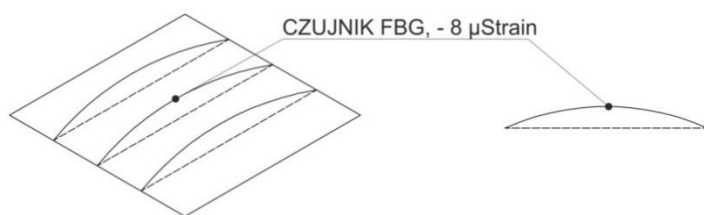
Rys. 7.47. Schemat stropu etap 10 – obciążenie stropu 2,25 kN = -5 μ Strain

Etap 11– Zredukowano obciążenie stropu do 1,00 kN i odnotowano odkształcenie wynoszące $-6 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.48).



Rys. 7.48. Schemat stropu etap 11 – obciążenie stropu 1,00 kN = $-6 \mu\text{Strain}$

Etap 12 – Strop nie obciążony wrócił do stanu początkowego wykazując odkształcenie równe $-8 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.49).



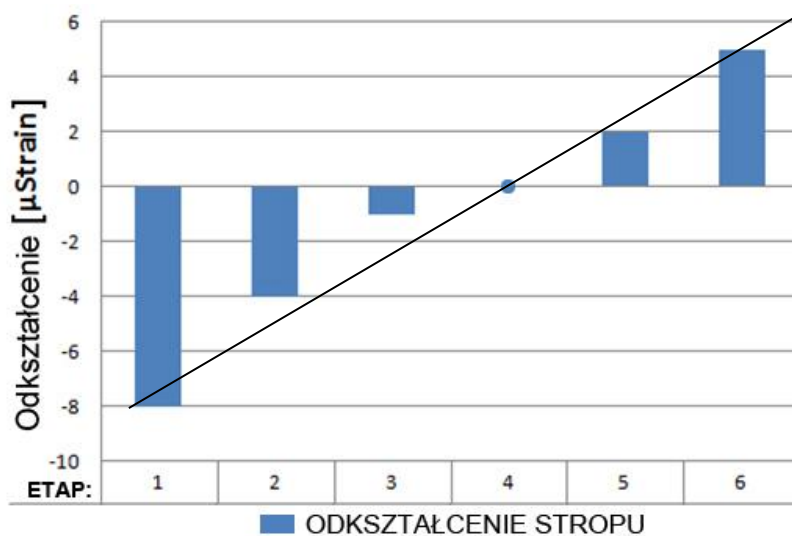
Rys. 7.49. Schemat stropu etap 12 – obciążenie stropu 0,00 kN = $-8 \mu\text{Strain}$

WYNIKI BADAŃ

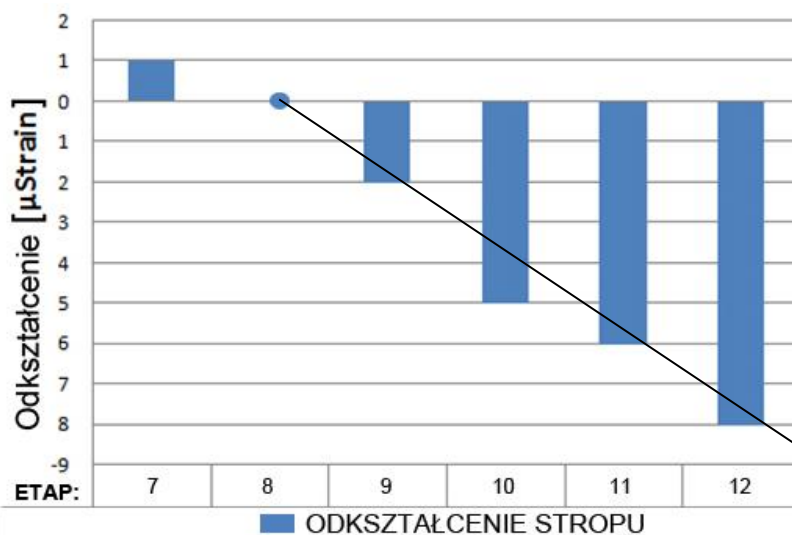
Odształcenie stropu zespolonego było mierzone na poszczególnych etapach obciążania i odciążania. Zaobserwowano narastające odkształcenie stropu podczas zwiększania obciążenia. Największą wartość odkształcenia zarejestrowano przy obciążeniu 11,00 kN i wynosiła ona $5 \mu\text{Strain}$. Na każdym etapie podczas badań zwiększające się obciążenie stropu wpływało na jego odkształcenie w badanym punkcie. Podczas badań w trakcie odciążania można było zauważyć, iż odkształcenie stropu zmniejszało się proporcjonalnie wraz z malejącym obciążeniem konstrukcji. W początkowej fazie przy braku obciążenia zarejestrowano w badanym punkcie $-8 \mu\text{Strain}$ co oznaczało, iż strop powstał z ujemną strzałką ugięcia (wstępną imperfekcją). Po odciążeniu stropu konstrukcja wróciła do kształtu bazowego jaki miał przed

przeprowadzeniem badań. Można więc stwierdzić, że strop pracuje poprawnie, a przyłożone obciążenie $Q = 11,00 \text{ kN}$ nie powoduje powstania odkształceń trwałych.

Na wykresach 7.71 i 7.72 zilustrowano odkształcenie stropu na poszczególnych etapach badań podczas prób obciążania i odciążania.



Wyk. 7.71. Odkształcenie stropu podczas próby obciążania



Wyk. 7.72. Odkształcenie stropu podczas próby odciążania

7.7 ŚCIANA PREFABRYKOWANA W SYSTEMIE „POLYTECH”

Badaniami objęta została również ściana prefabrykowana znajdująca się w budynku modelowym. Do analizy ściany zastosowano specjalnie zaprojektowany czujnik odkształceń typ SC-01 (fot. 7.17) o bazie pomiaru $L = 300$ mm. Na początku badań zamontowano czujnik FBG do wieńca żelbetowego i ściany systemowej „POLYTECH”. Czujnik został przymocowany do ściany za pomocą zaprojektowanych uchwytów systemowych (fot. 7.15).

Przed implementacją zewnętrznego czujnika światłowodowego do ściany i wieńca stropu zespolonego w systemie „POLYTECH”, przygotowano zestaw urządzeń stanowiący układ pomiarowy tak jak w przypadku wcześniej przeprowadzonych badań (fot. 7.16).



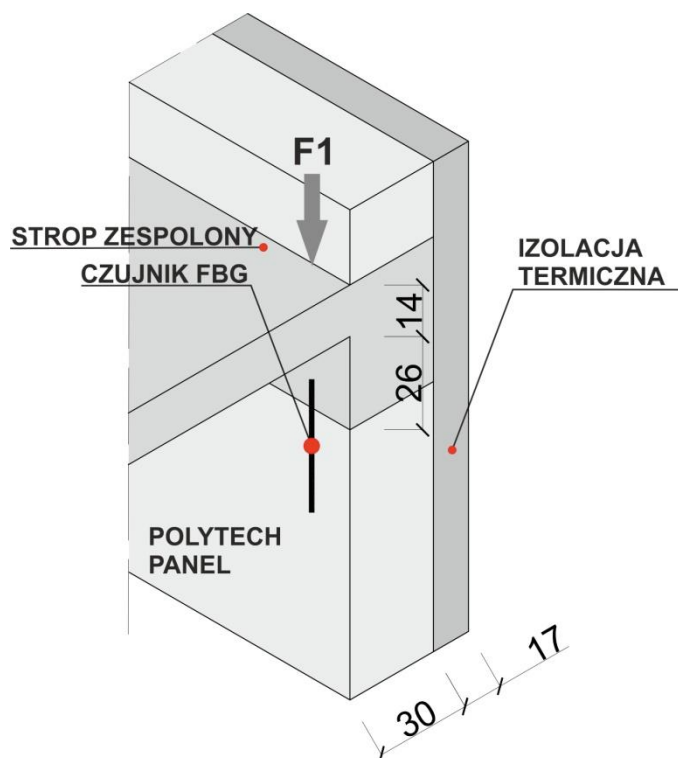
Fot. 7.15. Fragment badanej ściany w systemie „POLYTECH”



Fot. 7.16. Układ pomiarowy

Czujnik FBG przed implementacją został sprawdzony w laboratorium. Wartość obciążeni spoczywającego na badanej ścianie określono na około 12,04 kN/m.

Na kolejnym etapie badań przeprowadzono próbę obciążania ściany, zrealizowanej w systemie „POLYTECH”, za pośrednictwem stropu zespolonego i wieńca żelbetowego, który spoczywa na testowanej przegrodzie [69] (rys. 7.50).



Rys 7.50. Schemat ściany w systemie „POLYTECH”.



Fot. 7.17. Czujnik światłowodowy SC-01 do zastosowań zewnętrznych.

Analizowana przegroda była obciążana w sposób kontrolowany masą od 2,00 kN do 11,00 kN. Na poszczególnych etapach badań zarejestrowano odkształcenia prefabrykowanej ściany, które przedstawiono na rysunkach:

(rys. 7.51), (rys. 7.52), (rys. 7.53), (rys. 7.54), (rys. 7.55), (rys. 7.56), (rys. 7.57), (rys. 7.58), (rys. 7.59), (rys. 7.60).

Na poszczególnych etapach badania przykładano następujące wartości obciążenia:

Etap 1 - 2,00 kN

Etap 2 - 3,00 kN

Etap 3 - 4,00 kN

Etap 4 - 5,00 kN

Etap 5 - 6,00 kN

Etap 6 - 7,00 kN

Etap 7 - 8,00 kN

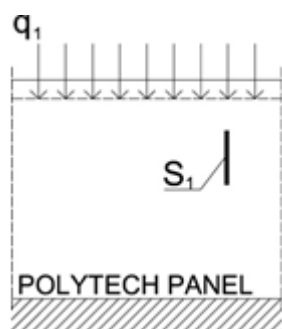
Etap 8 - 9,00 kN

Etap 9 - 10,00 kN

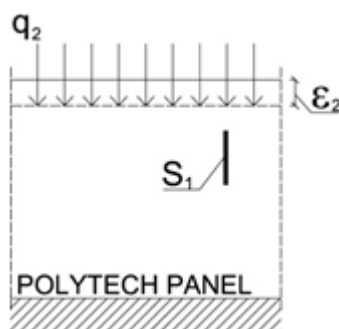
Etap 10- 11,00 kN

Etap 1 – Nad badaną ścianą prefabrykowaną przyłożono obciążenie równe 2 kN oraz odczytano dane dotyczące odkształcenia przedmiotowego elementu wynoszące $-2 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.51).

Etap 2 – Zwiększono obciążenie badanego elementu do 3,00 kN i zarejestrowano odkształcenie równe $-6 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.52).



Rys. 7.51. Schemat ściany punkt 1 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 2,00 kN = $-2 \mu\text{Strain}$ (etap 1)

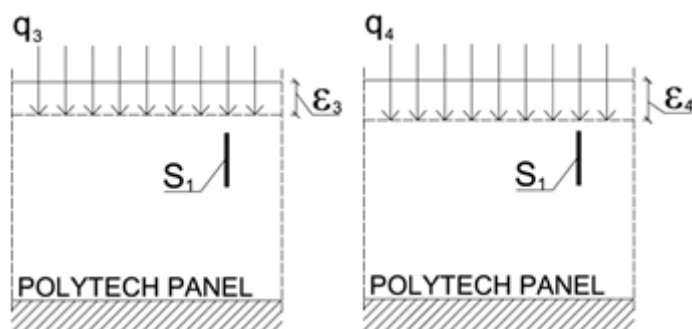


Rys. 7.52. Schemat ściany punkt 2 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 3,00 kN = $-6 \mu\text{Strain}$ (etap 2)

ϵ - odkształcenie
 q - obciążenie
 $S1$ - FBG czujnik

Etap 3 – Przyłożono kolejne obciążenie nad analizowaną ścianą zwiększając masę nad elementem do 4,00 kN, następnie odnotowano wartość odkształcenia przegrody $-7 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.53).

Etap 4 – Prefabrykowaną ścianę nadal obciążono aż do uzyskania 5,00 kN oraz zarejestrowano odkształcenie równe $-8 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.54).

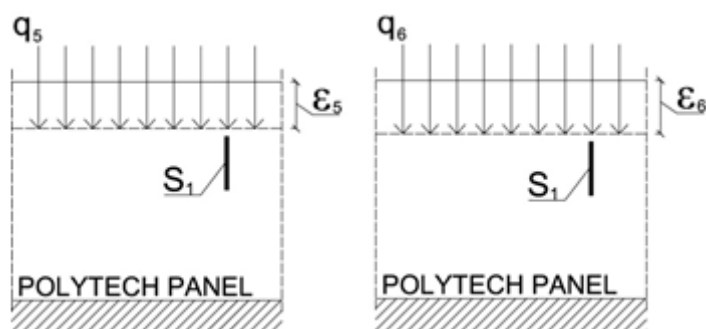


Rys. 7.53. Schemat ściany punkt 3 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 4,00 kN = $-7 \mu\text{Strain}$ (etap 3)

Rys. 7.54. Schemat ściany punkt 4 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 5,00 kN = $-8 \mu\text{Strain}$ (etap 4)

Etap 5 – Ponownie zwiększono wartość obciążenia ściany do 6,00 kN i odczytano zarejestrowane odkształcenie wynoszące $-9 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.55).

Etap 6 – Wartość obciążenia badanej przegrody została zwiększona do 7,00 kN, a odkształcenie wzrosło do $-10 \mu\text{Strain}$ (rys. 7.56).

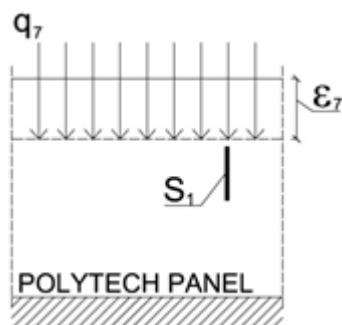


Rys. 7.55. Schemat ściany punkt 5 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 6,00 kN = $-9 \mu\text{Strain}$ (etap 5)

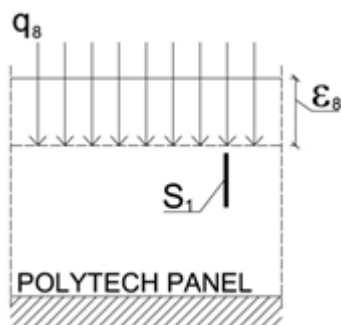
Rys. 7.56. Schemat ściany punkt 6 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 7,00 kN = $-10 \mu\text{Strain}$ (etap 6)

Etap 7 – Kontynuowano zwiększanie obciążenia ściany i przy wartości 8,00 kN badany element wykazał odkształcenie na poziomie -11 μ Strain (rys. 7.57).

Etap 8 – Dalsze obciążanie prefabrykowanej ściany do wartości 9,00 kN zwiększyło jej odkształcenie do -12 μ Strain (rys. 7.58).



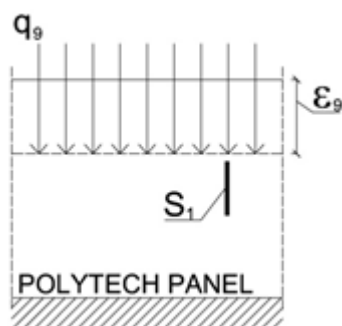
Rys. 7.57. Schemat ściany punkt 7 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 8,00 kN = - 11 μ Strain (etap 7)



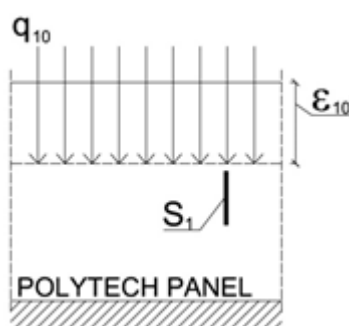
Rys. 7.58. Schemat ściany punkt 8 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 9,00 kN = - 12 μ Strain (etap 8)

Etap 9 – Wartość obciążenia nad przedmiotowym elementem zwiększono do 10 kN następnie odczytano zarejestrowane odkształcenie na poziomie -13 μ Strain (rys. 7.59).

Etap 10 – Na ostatnim etapie zwiększono obciążenie analizowanej ściany do 11 kN, które wywołało odkształcenie elementu wynoszące -14 μ Strain (rys. 7.60).



Rys. 7.59. Schemat ściany punkt 9 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 10,00 kN = - 13 μ Strain (etap 9)

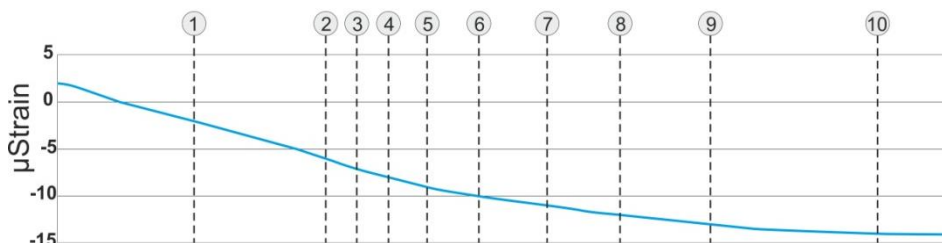


Rys. 7.60. Schemat ściany punkt 10 na wykresie (wyk. 2) – obciążenie stropu 11,00 kN = - 14 μ Strain (etap 10)

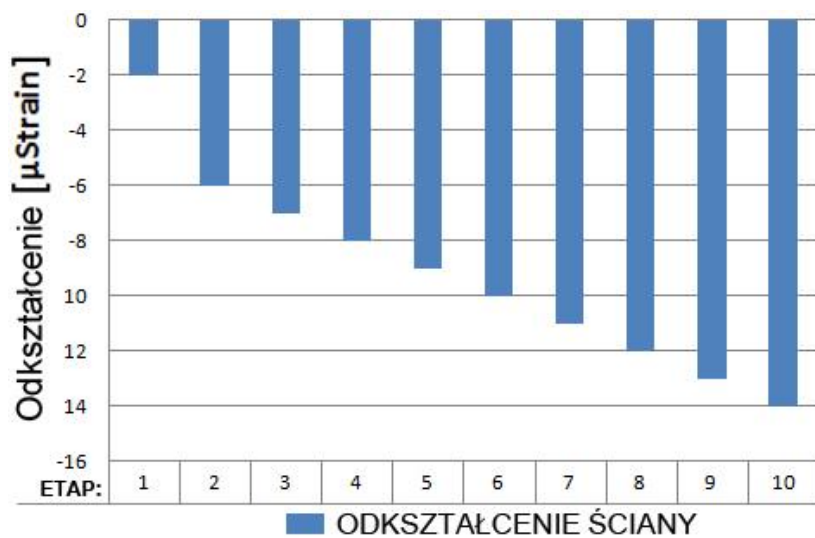
Na wykresach 7.73, 7.74, 7.75, przedstawiono odkształcenia ściany prefabrykowanej zarejestrowane przez czujnik FBG i interrogator podczas próby obciążania.



Wyk. 7.73. Wykres odkształceń ściany prefabrykowanej zarejestrowanych podczas badań przez interrogator.



Wyk. 7.74. Wykres liniowy wyznaczony przez interrogator na podstawie danych uzyskanych z czujnika FBG przedstawiający odkształcenia ściany prefabrykowanej na poszczególnych etapach badań



Wyk. 7.75. Odkształcenie ściany podczas prób obciążania na poszczególnych etapach

WYNIKI BADAŃ

Odształcenie ściany prefabrykowanej w systemie „POLYTECH” było mierzone równocześnie na poszczególnych etapach obciążania. Zaobserwowano zwiększające się odkształcenie wieńca żelbetowego i monitorowanej ściany, (rys. 7.50) wynosiło ono od $-2 \mu\text{Strain}$ do $-14 \mu\text{Strain}$. Odształcenie badanej ściany było proporcjonalne i równomierne do zwiększającego się obciążenia. Obciążenie ściany zwiększano o $1,00 \text{ kN}$, które wywoływało zazwyczaj odkształcenie na poziomie $1 \mu\text{Strain}$ w badanym punkcie. Czujnik FBG działał stabilnie wskazując precyzyjnie pojawiające się odkształcenia badanego elementu.

8. WALIDACJA

Szczególnie interesującym etapem przeprowadzonych eksperymentów było wykorzystanie precyzyjnego urządzenia pomiarowego – systemu „ARAMIS”, wyprodukowanego przez firmę GOM (model: ARAMIS ADJUSTABLE). Urządzenie jest zintegrowane z trójwymiarowym systemem do dynamicznej oceny współrzędnych 3D, przemieszczeń 3D powierzchniowych. Służy do wyznaczania odkształceń w wybranych obszarach [70]. Możliwości tego urządzenia obejmują także analizę pełnego pola oraz analizę punktową elementów obciążanych statycznie lub dynamicznie (z tego względu urządzenie to optymalnie kwalifikowało się do wykorzystania w ramach testów wytrzymałości prefabrykatów, przeznaczonych do późniejszego zastosowania w budownictwie). Jego wysoka rozdzielczość przestrzenna pozwala na detekcję lokalnych efektów odkształcenia na dużych przestrzeniach pomiarowych, jak również precyzyjny pomiar niskich efektów odkształcenia [101]. W przypadku próbek i części obciążanych statycznie i dynamicznie wykorzystany do przeprowadzonego eksperymentu system dostarcza dokładnych danych o:

- współrzędnych 3D różnych lokalizacji na analizowanych detalach,
- przemieszczeniach 3D, do których dochodzi w przypadku badanych elementów,
- prędkości oraz przyspieszeniach, które towarzyszą analizowanym przemieszczeniom,
- właściwościach materiałów do symulacji (np. moduł Younga),
- ocenie 6-ciu stopni swobody (6 DoF).

Opisywane urządzenie wykorzystuje najnowszą technologię kamer stereoskopowych [71], w tym:

- kamery 6-cio megapikselowe (1.936 x 1.216 pikseli) z częstotliwością zapisu obrazu 25 Hz w pełnej rozdzielczości (25 klatek), dedykowane do określania parametrów materiałowych i oceny efektów lokalnych w przypadku bardzo małych przestrzeni pomiarowych. Maksymalny obszar pomiarowy, możliwy do objęcia tym urządzeniem to od 10 x 8 mm do 5000 x 4000 mm [72],
- kamery 2,3 mega pikselowe (2.752 x 2.200 pikseli) z maksymalną szybkością zapisu obrazu 130 Hz w pełnej rozdzielczości (130 klatek), dedykowane do szerszego, bardziej uniwersalnego w porównaniu do 6-cio mega pikselowych zakresu zastosowań. Maksymalny obszar pomiarowy, możliwy do objęcia tym urządzeniem to 10 x 6 mm do 4000 x 2500 mm,

Zasadniczo ograniczanie wysokości rejestrowanego przez kamery obrazu pozwala na zwiększanie częstotliwości zapisu obrazu, maksymalnie do poziomu 450 Hz [73], [103].

Integralnym elementem systemu są podwójne diody LED, zainstalowane na głowicy urządzenia. Są one przeznaczone do oświetlania z różnych kierunków trudnodostępnych obiektów badań (przede wszystkim małych i średniej wielkości obiektów). Fotografie systemu „ARAMIS”, który wykorzystano do badań, przeprowadzonych w ramach opisanych eksperymentów zaprezentowano na fotografiach 8.1, 8.2 i 8.3.



Fot. 8.1. Urządzenie pomiarowe „ARAMIS”



Fot. 8.2. Urządzenie pomiarowe „ARAMIS” podczas badań wytrzymałościowych nadproża wykonanego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”



Fot. 8.3. Urządzenie pomiarowe „ARAMIS” podczas badań wytrzymałościowych nadproża wykonanego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”

Zasada działania opisywanego systemu opiera się na triangulacji. Wykonując do 450 zdjęć na sekundę jest on przeznaczony do zaawansowanych zastosowań przede wszystkim przemysłowych. W przedmiotowym przypadku został on wykorzystany do analizy procesu zniszczenia badanych elementów (m.in. wyznaczenia momentu eksperymentu, w którym doszło do powstania pierwszych rys, pęknięć oraz analizy ich rozwarcia). Urządzenia typu „ARAMIS” dostarczają użytkownikom precyzyjnych informacji o właściwościach materiałowych różnych detali, produkowanych w przemyśle (np. maszynowym, czy samochodowym) [74]. Dane te są w praktyce wykorzystywane jako parametry wejściowe do obliczeń symulacyjnych oraz jako wielkości odniesienia do optymalizacji procesów produkcyjnych i weryfikacji ich produktów.

Systemy „ARAMIS” można łączyć ze sobą w całe zespoły tych urządzeń, pracujące wspólnie. Pozwala to na dokonywanie pomiarów z różnych perspektyw oraz analizę danych z różnych obszarów pomiarowych. W takim przypadku zachowanie odkształceniowe danego komponentu jest rejestrowane jednocześnie ze wszystkich stron i podlega ono analizie we wspólnym układzie

współrzędnych. Urządzenia te zapewniają także możliwość prowadzenia z ich wykorzystaniem długotrwałych pomiarów online (testowanie elementów online jest wykorzystywane np. w przypadku testów wytrzymałościowych, testów zmęczeniowych, jak również w przypadku testów w tunelach aerodynamicznych oraz w przypadku analizy drgań) [104]. Opisywane urządzenie oferuje użytkownikom możliwość przeglądania wyników dokonywanych podczas pomiarów online, a także przesyłania ich do innych programów, za pośrednictwem interfejsów cyfrowych i analogowych oraz następnie przetwarzania na bieżąco za pomocą tych programów. W pomiarach prowadzonych online części i ich ruchy są specjalnie dopasowane i skonfigurowane zgodnie z CAD [75], [100]. Przykładowe typowe zastosowanie opisywanej funkcjonalności polega na przekształceniu układu współrzędnych symulacji w rzeczywistą konfigurację pomiarową.

System „ARAMIS” współpracuje także z dodatkowym, dotykowym czujnikiem stykowym (GOM touchprobe). Jest to dodatkowy system pomiarowy dedykowany do wykorzystania w ramach przypadków, w których analizowane detale są trudno dostępne dla optycznych elementów urządzenia (zasada działania czujnika polega na optycznym śledzeniu przez system „ARAMIS”) [76].

Funkcjonalności oferowane przez system „ARAMIS” znajdują najczęściej zastosowanie przy badaniu materiałów, w próbach i wielokierunkowych analizach elementów, w branży motoryzacyjnej, w przemyśle lotniczym, w biomechanice oraz szeroko pojętych pracach badawczo – rozwojowych.

Procedura dokonywania pomiarów z wykorzystaniem systemu „ARAMIS” jest taka, że badany element pokrywa się gęstą siatką odrębnych, nie łączących się ze sobą punktów, których precyzyjna lokalizacja jest wczytywana do wewnętrznej pamięci urządzenia [77], [101]. W praktyce punkty te nanoszone są na powierzchnię badanego elementu w formie natrysku farby z puszki pod

ciśnieniem, za pomocą dyszy. Wzajemne relacje pomiędzy naniesionymi na element punktami są przez system wykorzystywane jak sieć mikro ekstensometrów – ewentualna zmiana położenia jednego z punktów, względem pozostałych (będąca rezultatem odkształcenia badanego elementu) jest natychmiast wykrywana, fotografowana oraz prezentowana w ramach sekwencji materiałów zdjęciowych. Kluczowymi pomiarami, które podczas wykonywania precyzyjnych materiałów fotograficznych wykonuje urządzenie są:

- długość analizowanego (zadanego przez prowadzącego badania) odcinka pomiarowego – wybrany odcinek zlokalizowany na powierzchni analizowanego elementu,
- odkształcenia włókien badanego elementu w poziomie (rezultat rozciągania),
- liczba pęknięć,
- rozwarcie pęknięć [78].

Przeprowadzono pomiary systemem „ARAMIS” elementów z materiału „POLYTECH” w postaci belki oraz nadproża. Rezultaty badań w opisanym zakresie pomiarów są następujące:

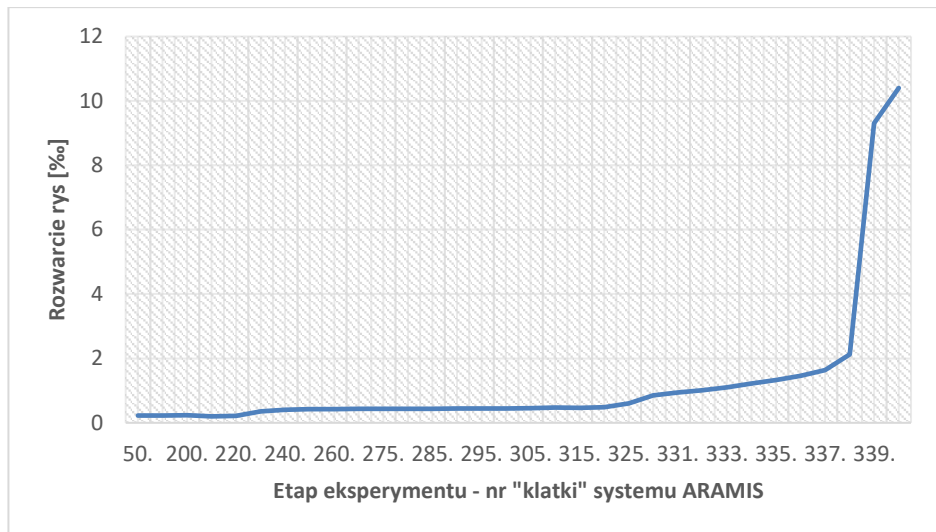
Eksperyment I: Belka z materiału „POLYTECH”

Eksperyment I polegał na analizie belki z materiału „POLYTECH” systemem „ARAMIS” (belka z czujnikiem FBG umieszczonym wewnątrz próbki) podczas próby zginania opisanej w rozdziale 7.2.1. W tabeli 8.1 zamieszczono wyniki pomiarów.

Tabela 8.1. Zestawienie wyników uzyskanych w ramach przeprowadzonego eksperymentu nr I z wykorzystaniem systemu ARAMIS

Etap eksperymentu nr „klatki” wykonanej przez system ARAMIS	Dł. odcinka pomiarowego [mm]	Rozwarcie rys odkształcenia w poziomie [%]	Działająca siła [N]
50	146,54	0,221	103,28
160	146,55	0,226	330,53
200	146,56	0,24	413,16
210	144,29	0,20	433,82
220	146,55	0,22	454,47
230	146,56	0,36	475,14
240	146,56	0,405	495,79
250	146,56	0,42	516,44
260	144,30	0,42	537,11
270	144,30	0,43	557,76
275	144,30	0,43	568,09
280	144,30	0,43	578,42
285	144,31	0,43	588,75
290	146,56	0,44	599,08
295	137,51	0,44	609,41
300	144,30	0,44	619,74
305	144,31	0,45	630,07
310	146,56	0,47	640,39
315	146,56	0,46	650,72
320	146,57	0,48	661,05
325	146,57	0,6	671,38
330	146,58	0,85	681,71
331	144,32	0,94	683,77
332	144,32	1,01	685,84
333	146,58	1,1	687,91
334	146,58	1,22	689,97
335	146,58	1,33	692,04
336	144,33	1,46	694,11
337	144,34	1,64	696,17
338	146,61	2,13	698,24
339	146,90	9,3	700,30
380	82,08	-	785,00

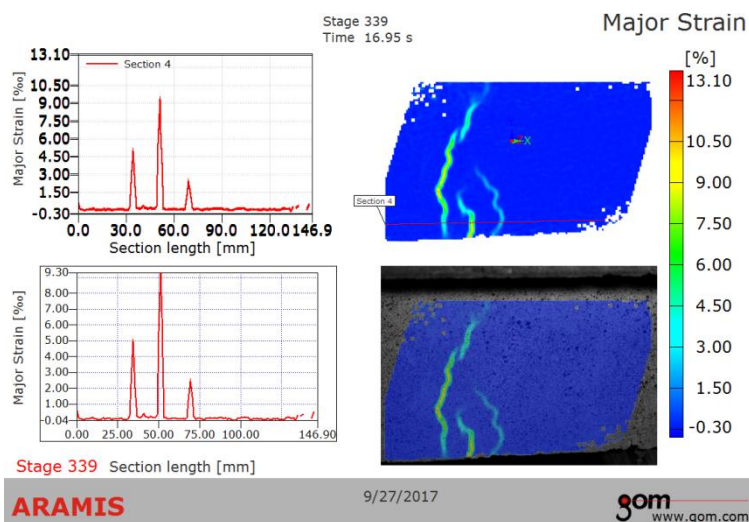
Wielkości rozwarcia rys badanej belki określono prowadząc testy polegające na oddziaływaniu na przedmiotowy element przyłożoną siłą. Na wykresie 8.1 przedstawiono rezultaty pomiarów.



Wyk. 8.1. Rozwarcie rys na powierzchni badanego elementu na poszczególnych etapach przeprowadzania eksperymentu - wykres liniowy

Analiza przedmiotowej belki wykazała, iż w momencie przyłożenia siły $F=785,00$ N zarejestrowano rozwarcie rys na poziomie 9,3 %.

Na rysunku 8.1 zobrazowano wygenerowany raport z przeprowadzonego badania elementu systemem „ARAMIS”.



Rys. 8.1. Raport z systemu Aramis – rozwarcie rys badanej belki z materiału „POLYTECH”

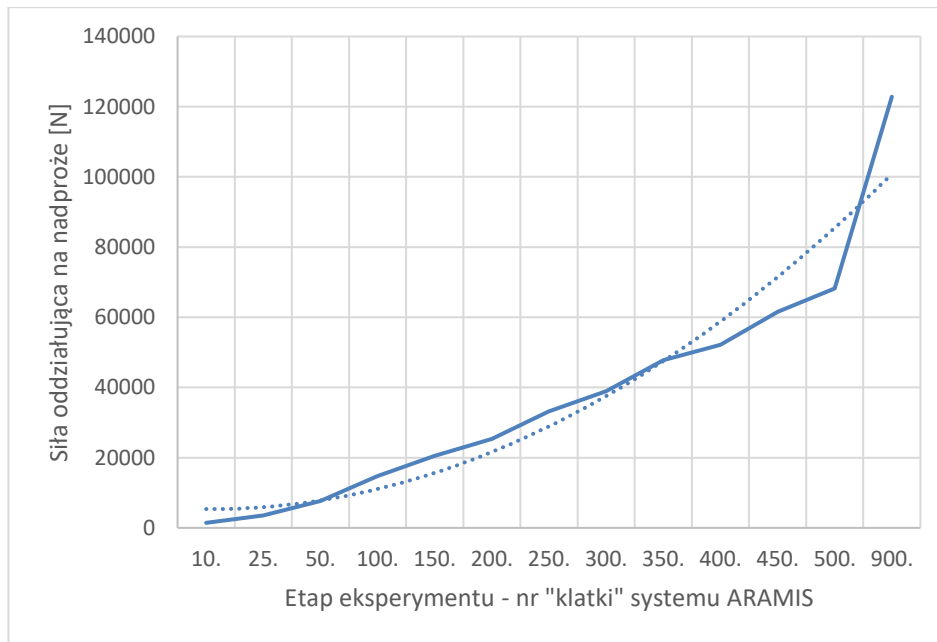
Eksperyment II: Nadproże z materiału „POLYTECH”

Eksperyment II przeprowadzono systemem „ARAMIS” podczas badań laboratoryjnych prefabrykowanego nadproża „POLYTECH” z czujnikami FBG opisanego w rozdziale 7.3. Tabela 8.2 zawiera wyniki przeprowadzonych analiz.

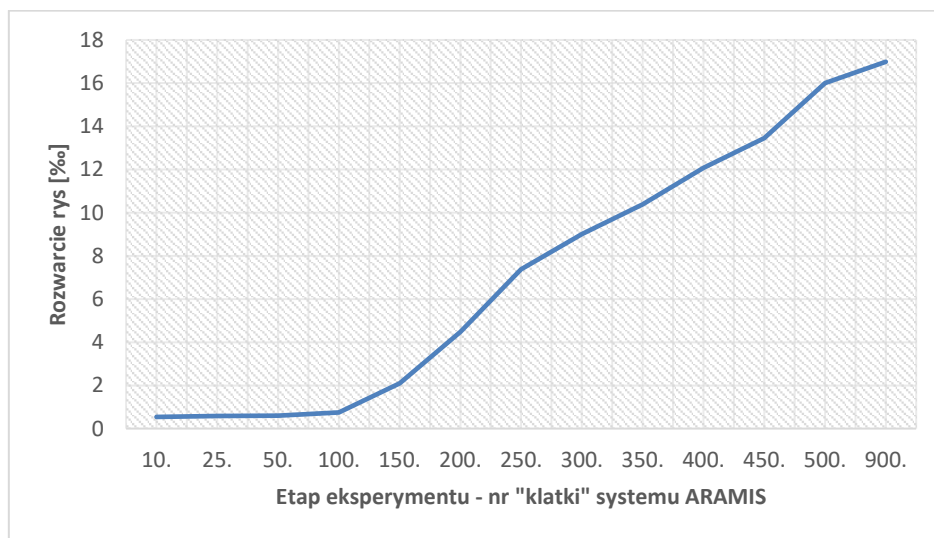
Tabela 8.2. Zestawienie wyników uzyskanych w ramach przeprowadzonego eksperymentu nr II z wykorzystaniem systemu ARAMIS

Etap eksperymentu nr „klatki” wykonanej przez system ARAMIS	Dł. odcinka pomiarowego	Rozwarcie rys odkształcenia w poziomie [%]	Działająca siła [N]
10	294,7	0,54	1437,22
25	294,7	0,58	3518,90
50	294,8	0,6	7654,98
100	294,8	0,75	14763,70
150	294,9	2,1	20541,33
200	295,0	4,49	25300,85
250	295,1	7,38	33211,22
300	295,2	9,01	38971,55
350	295,3	10,38	47776,12
400	295,5	12,08	52148,94
450	293,2	13,45	61588,94
500	293,3	16,0	68250,66
900	290,2	11,99	122840

Na poszczególnych etapach przeprowadzanego eksperymentu zbadano wielkości rozwarcia rys nadproża, pojawiających w wyniku oddziaływania przyłożonej siły. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresach 8.2 i 8.3.



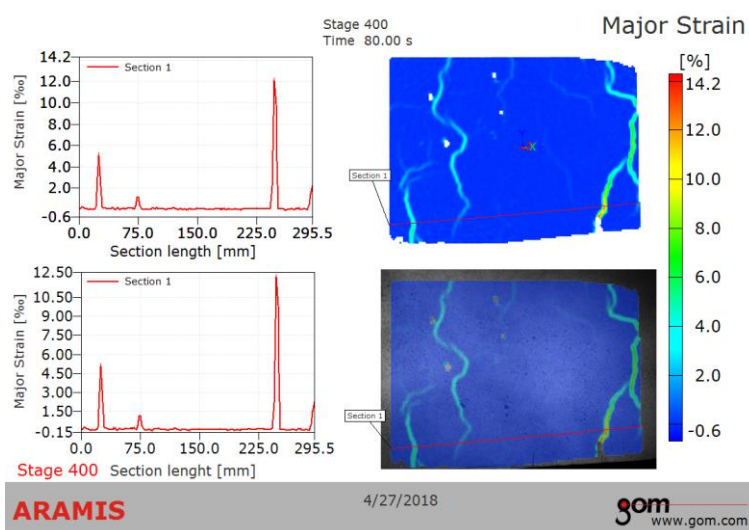
Wyk. 8.2. Skala oddziaływania siły na badany element podczas poszczególnych etapów eksperymentu



Wyk. 8.3. Rozwarcie rys na powierzchni badanego elementu na poszczególnych etapach przeprowadzania eksperymentu

Prefabrykowane nadproże uległo zniszczeniu po przyłożeniu siły $F=122840\text{ N}$, w tym czasie zauważono rozwarście rys o wielkości $11,99\%$.

Po przeprowadzonym badaniu przedmiotowego nadproża wygenerowano raport z systemu „ARAMIS” (rys. 8.7) który przedstawia moment w którym widoczne były wyraźnie zarysowania po przyłożeniu siły $F=52148,94\text{ N}$.



Rys. 8.7. Raport z systemu Aramis – rozwarście rys badanego nadproża z materiału „POLYTECH”

9. WNIOSKI

W rozprawie wykazano, że za pomocą światłowodowych czujników z siatkami Bragga można wyznaczyć rzeczywiste wartości odkształceń występujących w wybranych węzłach konstrukcyjnych budynku wykonanego z nowego materiału „POLYTECH”.

Parametrem charakteryzującym odkształcalność badanego elementu w zakresie przenoszenia odkształceń jest moduł Younga. Podjęto próbę wyznaczenia wartości tego parametru w przypadku badanego elementu oraz analizę jego zmienności w zależności od obciążenia. Moduł Younga badanego elementu wyznaczono przy tym dwoma niezależnymi sposobami:

- na podstawie wzoru analitycznego na strzałkę ugięcia belki pod działaniem siły F (w sytuacji, gdy znane były wartości ugięcia badanego elementu);
- w oparciu o odkształcenia badanego elementu wyznaczone doświadczalnie za pomocą czujnika FBG.

Wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych w ten sposób obliczeń nie pokrywają się ze sobą. Wynika to z faktu, że wartości wyznaczone na podstawie wzoru analitycznego na ugięcie belki określają średnią wartość modułu Younga w przekroju poprzecznym belki. Z kolei wyniki uzyskane na podstawie pomiarów odkształceń za pomocą czujnika FBG dają pogląd na wartość modułu Younga badanego elementu lokalnie – w miejscu, w którym umieszczony był światłowód z siatkami Bragga.

Podczas badań belki wykonanej z materiału „POLYTECH” analizie poddano także dane o odkształceniu (ugięciu belki) uzyskiwane z dwóch niezależnych urządzeń pomiarowych: klasycznego czujnika cyfrowego umieszczonego pod dolną krawędzią belki oraz nowoczesnego, innowacyjnego sprzętu – optycznego interrogatora, podłączonego do umieszczonego wewnątrz badanego elementu czujnika z siatkami Bragga.

Kolejnym zbadanym elementem było prefabrykowane nadproże. Do przeprowadzenia badań nadproża wykonanego w systemie „POLYTECH” wykorzystano specjalistyczny sprzęt – prasę wyposażoną w oprzyrządowanie pomiarowe. Dzięki temu na każdym etapie prowadzonego eksperymentu można było precyzyjnie określić siłę oddziałującą na nadproże (do 122,840 kN czyli momentu ostatecznej destrukcji, jakiej w rezultacie przeprowadzonego eksperymentu uległ badany element).

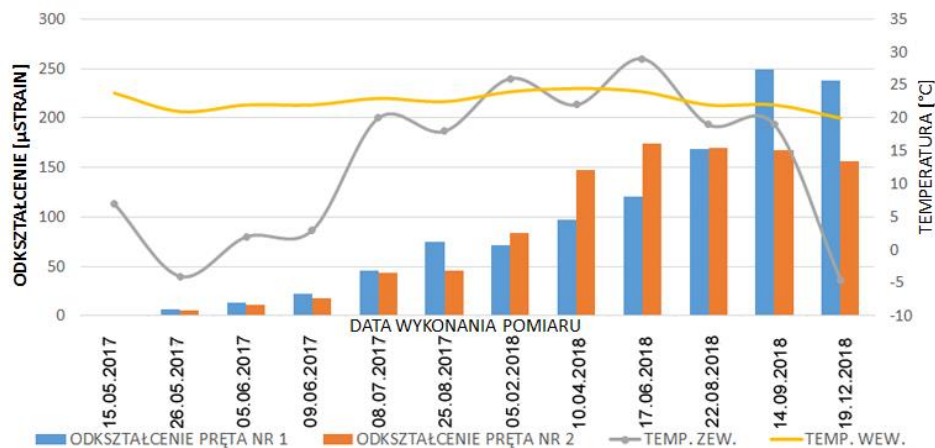
Przeprowadzony eksperyment wspomagany był nowoczesnym i innowacyjnym urządzeniem „ARAMIS” zintegrowanym z trójwymiarowym systemem do dynamicznej oceny współrzędnych 3D.

Przeprowadzone badania umożliwiły również analizę panelu ściennego systemowego z nadprożem, którego użyto do budowy budynku modelowego. Pomiar przeprowadzone z zastosowaniem sensorów FBG pomogły pozyskać istotne informacje o pracy nadproża w badanym obiekcie na poszczególnych etapach realizacji i użytkowania. Dane przedstawione w tabeli 9.1 określają odkształcenia badanych prętów nadproża. Szczegółowe dane ułatwiły wprowadzenie odpowiednich korekt, aby poprawić działanie konstrukcji budynku i podnieść bezpieczeństwo eksploatacyjne.

Tabela 9.1. Zarejestrowane odkształcenia pręta nr 1 i nr 2 w prefabrykowanym nadprożu „POLYTECH” oraz pomiar temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku modelowego w określonych dniach

Lp.	Data wykonania pomiaru	Temperatura na zewnątrz budynku [°C]	Temperatura wewnątrz budynku [°C]	Odształcenie pręta nr 1 [μStrain]	Odształcenie pręta nr 2 [μStrain]
1	15.05.2017	19,10	19,10	0	0
2	26.05.2017	20,20	20,20	6,37	5,59
3	05.06.2017	24,00	24,00	13,03	11,32
4	09.06.2017	23,00	23,00	22,74	17,59
5	08.07.2017	26,00	25,00	45,98	43,82
6	25.08.2017	22,00	22,00	75,03	45,48
7	05.02.2018	-4,00	21,00	71,71	83,80
8	10.04.2018	20,00	23,00	96,77	147,57
9	17.06.2018	26,00	24,00	121,01	173,80
10	22.08.2018	29,00	24,00	169,15	169,48
11	14.09.2018	19,00	22,00	249,00	167,66
12	19.12.2018	-4,50	20,00	237,38	156,37

Podczas przygotowywania światłowodowych czujników odkształceń istotna była lokalizacja sensorów w wybranych elementach. Przeprowadzona kalibracja i testy potwierdziły dużą stabilność systemu. Badania przeprowadzone za pomocą czujników światłowodowych umożliwiły wyznaczenie rzeczywistego stanu odkształcenia badanych prętów zbrojeniowych zastosowanych w nadprożu systemowym „POLYTECH”. Podczas pomiarów zarejestrowano odkształcenie pręta zbrojeniowego nr 1, które zwiększało się od 6,37 μStrain do 249,00 μStrain, a w przypadku pręta nr 2 – od 5,59 μStrain do 173,80 μStrain. Zaobserwowano, iż zbrojenie nie odkształcało się w sposób jednakowy w wyniku nierównomiernego oddziaływania obciążenia przekazanego na nadproże. Rejestrowano również temperaturę na zewnątrz i wewnątrz budynku. Temperatura wewnątrz budynku kształtowała się na poziomie od 19,10°C do 25,00°C, a na zewnątrz zmieniała się w zależności od pory roku, wahając się od -4,50°C do 26,00°C (w czasie prowadzonych odczytów). Na wykresie 9.1 zestawiono dane dotyczące odkształcenia analizowanych prętów zbrojeniowych oraz temperaturę wewnątrz i na zewnątrz budynku w czasie odczytu danych.



Wyk. 9.1. Odkształcenia badanych prętów zbrojeniowych nadproża w czasie realizacji oraz użytkowania budynku, temperatura wewnątrz budynku i na zewnątrz podczas pomiarów

Zmiany temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku nie wpływały w sposób znaczący na poziom odkształceń badanego elementu. Przedstawione wyniki stanowią wstęp do analizy rzeczywistych odkształceń konstrukcji oraz ich ciągłego monitorowania w trakcie eksploatacji. System pomiarowy zainstalowany wewnątrz badanych elementów może zwiększyć poziom bezpieczeństwa na etapie budowy i w trakcie użytkowania zrealizowanego obiektu.

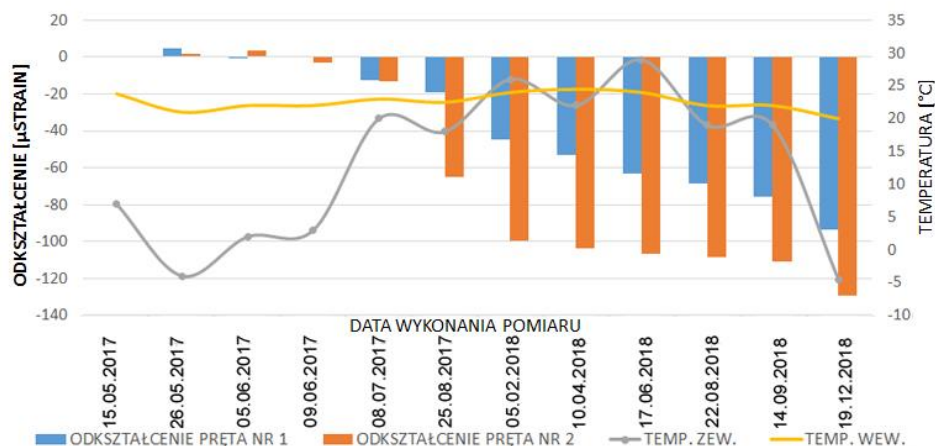
Monitoring za pomocą sensorów światłowodowych FBG umożliwił analizę odkształceń słupa żelbetowego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”. Przeprowadzone pomiary pomogły pozyskać informacje o pracy badanego elementu konstrukcyjnego. Odczyty przeprowadzane podczas realizacji i użytkowania potwierdziły, iż odkształcenia prętów zbrojeniowych słupa zmieniały się. Odnotowano odkształcenia pręta nr 1 wynoszące od 4,98 μStrain do -93,29 μStrain, a pręta nr 2 – od 1,82 μStrain do -129,48 μStrain. W trakcie badań zauważono minimalne odkształcenie słupa żelbetowego w kierunku wewnętrznym budynku. Dokładne dane dotyczące pracy elementu ułatwiły wprowadzenie modyfikacji w celu zwiększenia wytrzymałości konstrukcji. Podczas montażu czujników FBG istotne było ich rozmieszczenie na prętach

zbrojeniowych. Dzięki przeprowadzonym badaniom ustalono rzeczywisty stan odkształcenia prętów zbrojeniowych i słupa żelbetowego w systemie „POLYTECH”. Podczas prowadzonych odczytów danych z czujników zwracano również uwagę na temperaturę zewnętrzną i wewnętrzną, tak jak w przypadku panelu ściennego systemowego z nadprożem. Zarejestrowane odczyty są przedstawione w tabeli 9.2. W czasie najniższych temperatur na zewnątrz budynku słup odkształcał się w kierunku wewnętrznym budynku. Dalsze analizy potwierdziły, iż niezależnie od temperatury wewnątrz i na zewnątrz budynku element odkształcał się cały czas w tym samym kierunku.

Tabela 9.2. Zarejestrowane odkształcenia pręta nr 1 i nr 2 w słupie żelbetowym oraz pomiar temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku modelowego w określonych dniach

Lp.	Data wykonania pomiaru	Temperatura na zewnątrz budynku [°C]	Temperatura wewnątrz budynku [°C]	Odkształcenie pręta nr 1 [μStrain]	Odkształcenie pręta nr 2 [μStrain]
1	15.05.2017	19,10	19,10	0	0
2	26.05.2017	20,20	20,20	4,98	1,82
3	05.06.2017	24,00	24,00	-0,69	3,65
4	09.06.2017	23,00	23,00	0,27	-3,08
5	08.07.2017	26,00	25,00	-12,69	-13,04
6	25.08.2017	22,00	22,00	-19,25	-64,74
7	05.02.2018	-4,00	21,00	-44,65	-99,26
8	10.04.2018	20,00	23,00	-52,95	-103,58
9	17.06.2018	26,00	24,00	-62,91	-106,73
10	22.08.2018	29,00	24,00	-68,39	-108,39
11	14.09.2018	19,00	22,00	-75,53	-110,72
12	19.12.2018	-4,50	20,00	-93,29	-129,48

Wykres 9.2 przedstawia wyniki pomiarów uzyskane na poszczególnych etapach realizacji i użytkowania budynku.



Wyk. 9.2. Odkształcenie prętów zbrojeniowych słupa żelbetowego podczas realizacji i użytkowania budynku oraz temperatura wewnątrz i na zewnątrz budynku podczas pomiarów

Wyniki badań zapoczątkowały analizę elementu budynku i jego monitoring w całym cyklu eksploatacji. Stała kontrola modelowego budynku zrealizowanego na podstawie indywidualnego projektu w technologii nietestowanej w warunkach użytkowych była możliwa dzięki niezawodności czujników FBG. Sensory przekazywały dane o pracy elementu z dużą dokładnością, eliminując możliwość pojawienia się nieprzewidzianych zagrożeń podczas budowy i użytkowania budynku.

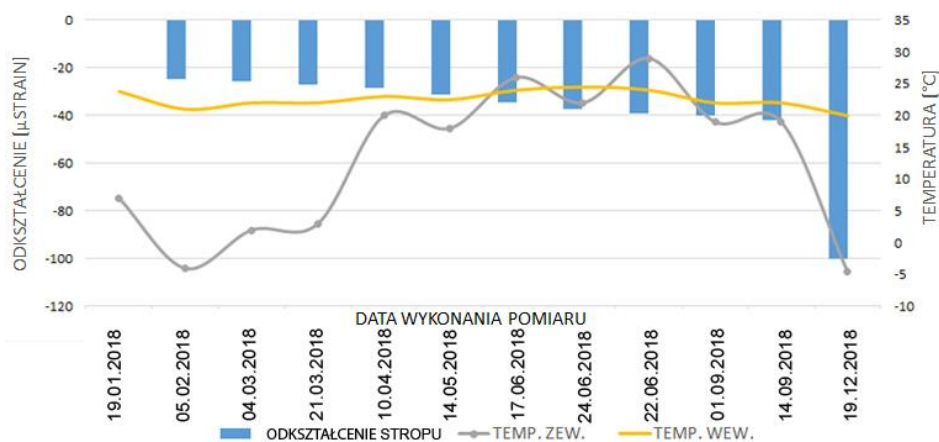
System pomiarowy bazujący na czujniku światłowodowym FBG został także zastosowany do analizy odkształceń stropu zespolonego żelbetowego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”. Przeprowadzone pomiary pomogły pozyskać informacje o pracy badanego elementu konstrukcyjnego. Podczas badań zauważono, iż strop odkształcał się proporcjonalnie do zwiększającego się obciążenia działającego na konstrukcję. Na etapie montażu czujnika FBG istotne było właściwe jego zlokalizowanie na szalunku traconym z blachy trapezowej. Dzięki przeprowadzonym badaniom ustalono rzeczywisty stan odkształcenia stropu zespolonego w systemie „POLYTECH” w czasie próby obciążania i odciążania konstrukcji. Na początku badań przy braku obciążenia czujnik

wykazał odkształcenie $-8 \mu\text{Strain}$, a przy obciążeniu $11,00 \text{ kN}$ największa wartość odkształcenia wynosiła $5 \mu\text{Strain}$. Po zdemontowaniu obciążenia strop wrócił do kształtu bazowego. Analiza stropu obejmowała również monitoring odkształceń elementu na poszczególnych etapach użytkowania budynku modelowego. Przedmiotowy strop odkształcał się w tym samym kierunku od wartości $-24,00 \mu\text{Strain}$ do $-100,00 \mu\text{Strain}$ o czym zdecydowała wstępna imperfekcja. Odczyty potwierdziły, iż kształt stropu wykazywał ujemną strzałkę ugięcia w czasie całego cyklu pomiarowego. Rejestrowano także temperaturę wewnątrz budynku i na zewnątrz, tak jak w przypadku monitoringu panelu ściennego z nadprożem i słupa żelbetowego. Po przeanalizowaniu zachowania stropu nie zauważono wpływu temperatury na powstawanie odkształceń elementu. W tabeli 9.3 zestawiono wyniki pomiarów odkształcenia i temperatury na poszczególnych etapach użytkowania badanego elementu.

Tabela 9.3. Zarejestrowane odkształcenia stropu oraz pomiar temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku modelowego w określonych dniach

Lp.	Data wykonania pomiaru	Temperatura na zewnątrz budynku [°C]	Temperatura wewnątrz budynku [°C]	Odkształcenie stropu [μStrain]
1	19.01.2018	7,00	23,80	0
2	05.02.2018	-4,00	21,00	-24,60
3	04.03.2018	2,00	22,00	-25,70
4	21.03.2018	3,00	22,00	-27,00
5	10.04.2018	20,00	23,00	-28,50
6	14.05.2018	18,00	22,50	-31,40
7	17.06.2018	26,00	24,00	-34,60
8	24.06.2018	22,00	24,50	-37,50
9	22.06.2018	29,00	24,00	-39,30
10	01.09.2018	19,00	22,00	-40,00
11	14.09.2018	19,00	22,00	-42,40
12	19.12.2018	-4,50	20,00	-100,00

Na wykresie 9.3 przedstawiono odczytane dane dotyczące odkształcenia i zmian temperatury badanego elementu w czasie pomiarów.



Wyk. 9.3. Odkształcenie stropu zespolonego podczas użytkowania budynku oraz temperatura na zewnątrz i wewnątrz budynku podczas pomiarów

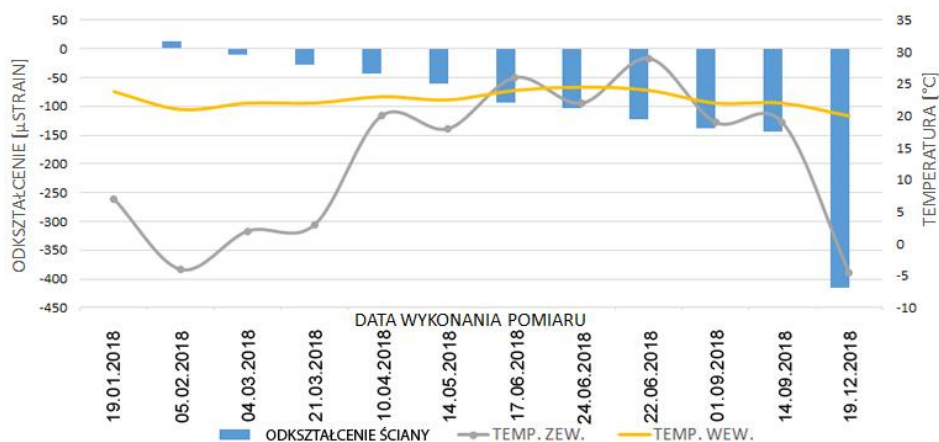
System pomiarowy działał stabilnie podczas przeprowadzanych badań. Sensor przekazywał dane o pracy elementu z dużą dokładnością, eliminując możliwość pojawienia się nieprzewidzianych zagrożeń w czasie całego cyklu badania i użytkowania budynku. Rzeczywiste wartości odkształcenia stropu żelbetowego, stanowiącego element konstrukcyjny przenoszący obciążenia w budynku modelowym, mogą być pomocne przy wprowadzeniu stosownych modyfikacji, które obniżą poziom naprężeń w stropie, co z kolei wpłynie na trwałość konstrukcji. W trakcie prób obciążania i odciążania zespolony strop żelbetowy pracował w zakresie sprężystym. Prace badawcze przeprowadzone za pomocą czujnika światłowodowego umożliwiły wyznaczenie początkowej imperfekcji stropu oraz rzeczywisty stan odkształcenia stropu.

Odpowiedni czujnik FBG pomógł określić parametry odkształcenia zamontowanej w budynku ściany prefabrykowanej wykonanej z materiału „POLYTECH”. Światłowód FBG umożliwił monitoring techniczny i analizę odkształceń w badanym elemencie konstrukcyjnym. Testy przeprowadzone z zastosowaniem czujnika pomogły uzyskać bardzo istotne i do tej pory nieznanne informacje o pracy ściany podczas kontrolowanego obciążania. Czujnik FBG wykazał, iż nawet przy dodatkowym obciążeniu na poziomie 11 kN ściana

odkształciła się tylko o $-14 \mu\text{Strain}$. Wynik pomiaru potwierdził odpowiednią wytrzymałość i nośność. Ściana prefabrykowana została również objęta monitoringiem na etapie użytkowania, jak testowany równocześnie strop zespolony. Dane z czujnika FBG zarejestrowane podczas cyklicznych pomiarów wykazały odkształcenie od $12,00 \mu\text{Strain}$ do $-415,00 \mu\text{Strain}$. Wynik ostatniego pomiaru potwierdził stały kierunek odkształcenia ściany, wynikający ze zwiększającego się obciążenia znajdującego się nad badanym panelem ściennym. Tak jak w przypadku stropu, sprawdzano temperaturę wewnątrz budynku i na zewnątrz. Wyniki pomiaru przedstawiono w tabeli 9.4 i na Wykresie 9.4. Prefabrykowana ściana systemowa nie wykazała tendencji do odkształcania się pod wpływem zmian temperatury.

Tabela 9.4. Zarejestrowane odkształcenia ściany oraz pomiar temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku modelowego w określonych dniach

Lp.	Data wykonania pomiaru	Temperatura na zewnątrz budynku [°C]	Temperatura wewnątrz budynku [°C]	Odkształcenie ściany [μStrain]
1	19.01.2018	7,00	23,80	0
2	05.02.2018	-4,00	21,00	12,60
3	04.03.2018	2,00	22,00	-9,70
4	21.03.2018	3,00	22,00	-28,00
5	10.04.2018	20,00	23,00	-43,50
6	14.05.2018	18,00	22,50	-60,70
7	17.06.2018	26,00	24,00	-93,60
8	24.06.2018	22,00	24,50	-104,00
9	22.06.2018	29,00	24,00	-122,00
10	01.09.2018	19,00	22,00	-139,00
11	14.09.2018	19,00	22,00	-145,40
12	19.12.2018	-4,50	20,00	-415,00



Wyk. 9.4. Odkształcenie ściany prefabrykowanej podczas użytkowania budynku

Pozyskane szczegółowe dane umożliwiły wprowadzenie właściwych zmian w celu poprawy działania elementu konstrukcyjnego budynku i zwiększenia bezpieczeństwa użytkowego i eksploatacyjnego. Podczas przygotowania światłowodowego czujnika odkształceń istotną była lokalizacja na testowanym elemencie. Po przeprowadzonej kalibracji i symulacjach działania czujnika FBG system pomiarowy działał stabilnie. W czasie badań światłowod FBG umożliwił wyznaczenie rzeczywistego stanu odkształcenia analizowanej ściany prefabrykowanej w systemie „POLYTECH”. Uzyskane wyniki służą jako wstępne dane do dalszej analizy rzeczywistych odkształceń konstrukcji oraz ciągłego jej monitorowania w trakcie eksploatacji przy równoczesnej kontroli temperatury na zewnątrz i wewnątrz budynku. System pomiarowy na zewnątrz badanego elementu zwiększa poziom bezpieczeństwa w trakcie użytkowania zrealizowanego obiektu, biorąc pod uwagę fakt, iż system „POLYTECH” jest w trakcie badań, które potwierdzają odpowiednią jakość rozwiązań i wytrzymałość użytych materiałów.

Wstępna faza badań potwierdziła, iż konstrukcja modelowego budynku jest bezpieczna. Prefabrykowana ściana objęta monitoringiem przenosi obciążenia i nie wykazuje pęknięć ani zarysowań. Zaobserwowano również

dobrą współpracę materiału „POLYTECH” ze słupem żelbetowym w postaci łącznika ścian systemowych, który znajduje się na styku dwóch paneli ściennych.

WNIOSKI KOŃCOWE

Badania odkształceń elementów budynku, w którym zastosowano nowy materiał upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- Zastosowany system światłowodowych czujników FBG umożliwił wyznaczenie rzeczywistych wartości odkształceń w elementach budynku, w którym zastosowano nowy materiał – „POLYTECH”. Teza postawiona w niniejszej dysertacji została udowodniona. System sprawdził się zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i trudnych warunkach na placu budowy.
- System światłowodowy umożliwił również wyznaczenie wartości modułu Younga na podstawie prób zginania cztero- i trójpunktowego belek wykonanych z materiału „POLYTECH”. Wartości modułu Younga były niewielkie, mieściły się w przedziale od 1442,62 MPa do 3776,97 MPa. Potwierdza to również konieczność podjęcia działań w celu zwiększenia sztywności materiału.
- Testy laboratoryjne prefabrykowanego nadproża pozwoliły na wyznaczenie wartości odkształcenia i ugięcia w zakresie sprężystym. Przeprowadzono również próbę niszczącą, umożliwiającą określenie największej wartości siły, jaką jest w stanie przenieść nadproże. Wyniosła ona 122,84 kN.
- Przeprowadzono badania na obiekcie rzeczywistym – budynku mieszkalnym zlokalizowanym w miejscowości Zabrzeg. Badania rozpoczęto w dniu 15.05.2017 r. a zakończono 19.12.2018 r. Wykonano pomiary odkształceń następujących elementów:

- Prętów zbrojeniowych **nadproża** w prefabrykowanym panelu z otworem okiennym – zarejestrowano największe odkształcenie na pręcie nr 1 wynoszące 237,38 μStrain , natomiast na pręcie nr 2 odczytano 173,80 μStrain (Rys. 7.20 i 7.21). Wartości odkształcenia prętów świadczą o nierównomiernym oddziaływaniu obciążenia na nadproże.
- Prowadzono monitoring **słupa żelbetowego** stanowiącego łącznik ścian prefabrykowanych, który wykazał, iż pręt nr 1 odkształcił się do wartości -93,29 μStrain , a pręt nr 2 do wartości -129,48 μStrain (Rys. 7.27 i 7.28). Wyniki pomiarów umożliwiły stwierdzenie iż, słup minimalnie odkształcił się do wnętrza budynku.
- Zrealizowano również kontrolowane próby obciążania **stropu zespolonego** zastosowanego w systemie prefabrykacji „POLYTECH”. Przy przyłożonym obciążeniu 11,00 kN największa wartość odkształcenia wynosiła 5 μStrain . Po zdemontowaniu obciążenia strop wrócił do kształtu bazowego. Kontrola stropu była prowadzona również na poszczególnych etapach użytkowania budynku modelowego. Element odkształcał się w tym samym kierunku od wartości -24,00 μStrain do -100,00 μStrain . Wynika to z jego wstępnej imperfekcji.
- Próby kontrolowanego obciążania przeprowadzono również w przypadku badań prefabrykowanego panelu ściennego. Czujnik FBG wykazał, iż przy obciążeniu na poziomie 11 kN ściana odkształciła się tylko o -14 μStrain . Wykonywano również cykliczne pomiary, które pomogły określić największe odkształcenie wynoszące -415,00 μStrain . Wynikało ono ze

zwiększającego się obciążenia użytkowego zlokalizowanego nad badanym elementem.

Przeprowadzono również badania wytrzymałości na ściskanie na próbkach pobranych z materiału „POLYTECH”: średnia wytrzymałość na ściskanie wynosiła 1,80 MPa. Podjęto próby wzmocnienia materiału „POLYTECH” za pomocą ekologicznego surowca odpadowego.

Materiał „POLYTECH” zawierający do 60% EPS (polistyren ekspandowany) pochodzącego z recyklingu i 40% modyfikowanej zaprawy sprawdził się w systemie prefabrykacji elementów konstrukcyjnych. Rozwijający się system budowy potwierdza, iż możliwości wykorzystania EPS są coraz większe. Zastosowanie granulatu EPS umożliwia skuteczne zagospodarowanie odpadu oraz zmniejszenie zużycia kruszywa naturalnego w mieszance, co wpływa na skuteczniejszą ochronę środowiska naturalnego.

10. LITERATURA

- [1] Kisała P., 2012. Periodyczne struktury światłowodowe w optoelektronicznych czujnikach do pomiaru wybranych wielkości nieelektrycznych. Monografie Politechniki Lubelskiej, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki.
- [2] Romaniuk R., 2001. Miernictwo światłowodowe. Politechnika Warszawska, Instytut Systemów elektronicznych, wydanie II uzupełnione.
- [3] Grzywa A., Kania J., 2016. Możliwości monitorowania konstrukcji mostowych z zastosowaniem czujników światłowodowych. Materiały Budowlane nr 9, Sigma – Not.
- [4] Zhao X., Lv X., Wang L., Zhu Y., Dong H., Chen W., Li J., Ji B., Ding Y., 2015. Research of concrete residual strains monitoring based on WLI and FBG following exposure to freeze–thaw tests, China
- [5] Raport AEA Ricardo, 2015. The potential for mass reduction of passenger cars and light commercial vehicles in relation to future CO2 regulatory requirements, Komisja Europejska.
- [6] Gaoa W., Li X., Wang P., Chen L., Nia C., Chen L., Chen X., Zhoua Y., Zhanga W., Hua J., Hub J., Liaoc M., 2018. Investigation on sensing characteristics of fiber Bragg gratings based on soft glass fibers, China
- [7] Błoński M. 10 rzeczy, które warto wiedzieć o światłowodach , portal dobre programy, dostęp kwiecień 2017 r. (<https://www.dobreprogramy.pl/10-rzeczy-ktore-warto-wiedziec-o-swiatlowodach-a-o-ktore-boisz-sie-zapytac,News,79657.html>).
- [8] Rogowski T., 2016. Historia światłowodów, OPTOMER Technika Światłowodowa, Łódź.

- [9] Manuvinakurakea M., Gandhib U., Mangalanathanb U., Nayakaa M., Centre for Nano Science and Engineering, IISc, Department of Instrumentation and Control Engineering, National Institute of Technology, 2017. Design, fabrication and testing of fiber bragg grating based fixed guided beam pressure sensor, India
- [10] Publikacja, 2017. Cyfryzacja nowej generacji” Klaster Fotoniki i Światłowodów.
- [11] Xiaolin Weng, Jianxun Chen, Jun Wang, 2017. Fiber Bragg Grating-Based Performance Monitoring of Piles Fiber in a Geotechnical Centrifugal Model Test.
- [12] 2015 Monitoring the Corrosion Process of Reinforced Concrete Using BOTDA and FBG Sensors.
- [13] Jaworowska M., 2011. Światłowody w przemyśle, część 2 – czujniki światłowodowe” – portal branżowy Automatyka B2B.
(<https://automatykab2b.pl/tematmiesiaca/4231-swiatlowody-w-przemysle-czesc-2-czujniki-swiatlowodowe?start=0&showall=1#.WIKDz7zibIX>)
- [14] Szperna P., 2017. Stabilne wzrosty na rynku czujników światłowodowych, portal branżowy Automatyka B2B, dostęp marzec 2017. (<https://automatykab2b.pl/gospodarka/10333-stabilne-wzrosty-ryнку-czujnikow-swiatlowodowych#.WIKKE97zibIU>)
- [15] Szperna P., Rośnie popyt na światłowodowe czujniki temperatury, portal branżowy Automatyka B2B, dostęp czerwiec 2015.
(<https://automatykab2b.pl/gospodarka/8275-rosnie-popyt-na-swiatlowodowe-czujniki-temperatury#.WIKFILzibIV>)
- [16] Giera P., 2011. Nowoczesne sensory i czujniki, Napędy i sterowanie, nr 5.
- [17] Nowosielska K., 2015. Kowalczyk P., Wykrywanie, lokalizacja i identyfikacja uszkodzeń w wysokowytrzymałych konstrukcjach kompozytowych, Instytut Lotnictwa.

- [18] Sundaram B. A., Kesavan K., Parivallal S., Ahmed A. K., Ravisankar K., Structural Health Monitoring Laboratory, Structural Engineering Research Centre, CSIR, 2011. Monitoring of FRP Strengthened Concrete Structures Using FBG Sensors, India
- [19] Yang S., Jun Li, Tang Y., Sun M., Gao G., Liu X., Shi B., Dong F., 2017. Analysis of the performance of strain magnification using uniform rectangular cantilever beam with fiber Bragg gratings, China
- [20] Lee M.J., Hwang Y., 2008. A novel online rotor condition monitoring system using fiber Bragg grating (FBG) sensors and a rotary optical coupler” – Meas. Sci. Technol.
- [21] Yazdizadeh Z., Marzouk H., Hadianfard M. A., 2016. Monitoring of concrete shrinkage and creep using Fiber Bragg Grating sensors, Iran
- [22] Osuch T., Kossek T., Bożycki K., Zawisłański A., 2005. Badania światłowodowych siatek Bragga, nanoszonych metodą skanowania maski fazowej” – Instytut Łączności, Państwowy Instytut Badawczy, Centralna Izba Pomiarów Telekomunikacyjnych, Warszawa.
- [23] Krysiak P., Gąsior P., Kaleta J., Rybczyński R., 2012. Metodyka pomiaru odkształceń w warstwie zewnętrznej kompozytu nawijanego. Politechnika Wrocławska, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Przetwórstwo Tworzyw nr 4.
- [24] Zasada M., Wilde K., Banach K., 2007. Eksperymentalne badania ciągłych światłowodowych czujników odkształceń, wykorzystujących rozpraszanie Brillouin’a” – materiały XXIII konferencji naukowo – technicznej Awaria Budowlane 2007 – zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje.
- [25] Wójcik J., Makara M., Poturaj K., Czyżewska J., Mergo P., Klimek J., 2008. Technologia włókien fotonicznych z zawieszonym rdzeniem do konstrukcji czujników światłowodowych, Uniwersytet Marii Curie Skłodowskiej, Wydział Chemii, Lublin.

- [26] Dziuda Ł., Krej M., 2011, „Światłowodowy czujnik czynności oddechowej oraz pracy serca” – Wojskowy Instytut Medycyny Lotniczej, Polski Przegląd Medycyny i Psychologii Lotniczej nr 3 tom 17, Warszawa.
- [27] Czapliński T., Gąsior P., Przygoda A., 2010. Modelowanie optycznego systemu monitorowania procesu pęknięcia kompozytu długowłóknistego, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej, Wrocław.
- [28] Krysiak M., 2014 „Światłowody będą coraz lepsze, Polski Przemysł.
- [29] Kisała P., Niedziałek T., 2016. Światłowodowe sensory FBG – od projektu do prototypu, Politechnika Lubelska, Lublin.
- [30] Kisała P., Klimek J., Skorupski K., 2015. W pełni optyczny przełącznik wykorzystujący jednorodne światłowodowe siatki Bragg’a, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, Przegląd Elektrotechniczny nr 11/2015, Lublin.
- [31] Hannuscha S., Stockmanna M., Ihlemanna J., Technische Universität Chemnitz, Department of Solid Mechanics, 2015. Experimental method for residual stress analysis with fibre Bragg grating sensors, Germany
- [32] Publikacja, 2006. System Dynamicznego Zarządzania Przesyłem, w ramach kampanii edukacyjno – promocyjnej projektu Dynamiczne zarządzanie zdolnościami przesyłowymi sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu innowacyjnych technik pomiarowych – Elektroenergetyka, nr 1 (49).
- [33] Wilde K., 2012. Systemy ciągłego monitoringu technicznego konstrukcji – innowacyjne technologie w budownictwie. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Gdańsk.
- [34] Howiacki T., 2017. Światłowody w pomiarach inżynierskich, Builder - - nauka i budownictwo, nr 70.

- [35] Park J., Kwon Y. S., OckKo M., Jeon M.Y., 2017. Department of Physics, Chung Nam National University, Dynamic fiber Bragg grating strain sensor interrogation with real-time Measurement, Republic of Korea
- [36] Zhou Z., Wang B, OuJ., 2004. Local damage detection of RC structures with distributive FRP – OFBG sensors. Second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures, Winnipeg, Canada.
- [37] Delepine-Lesoille S., Merliot E., Boulay C., Quetel L., Delaveau M., Courteville A., 2006. Quasi – distributed optical fibre extensometers for continuous embedding into concrete: design and realization” – Smart Materials and Structures 15.
- [38] K. Samrajyam & R. L. N. SaiPrasad& T. D. GunneswaraRao& B. Sobha, 2015. FIBER Bragg Grating (FBG) sensor for estimation of Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) in concrete.
- [39] D. H. Sigurdardottir, B. Glisic, 2015. On-site validation of fiber-optic methods for structural health monitoring: Streicker Bridge
- [40] Kisała P., 2013. Detection of material defects with indirect method by determining the linear expansion with FBG sensor, Poland.
- [41] Li W., Bao X., 2013. High spatial resolution distributed fiber optic technique for strain and temperature measurements in concrete structures, International Workshop on Smart Materials and Structures, SHM and NDT for the Energy Industry, Calgary, Alberta, Canada October 7-10.
- [42] Sieńko R., Howiacki T., Szydłowski R., Maślak M., Pazdanowski M., 2016. Application of distributed optical fiber sensor technology for strain measurements in concrete structures, COST TU 1402: Quantifying the Value of Structural Health Monitoring, Copenhagen, 24th August 2016.

- [43] Jiang M., Sai Y., Geng X., Sui Q., Liu X., Jia L., School of Control Science and Engineering, Shandong University, 2016. Development of an FBG Sensor Array for Multi-Impact Source Localization on CFRP Structures, China
- [44] Kaleta D., Rajchel M., Siwowski T., Sieńko R., 2017. Odkształcenia mostu z kompozytów FRP w świetle różnych metod pomiarowych” – Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, nr 24.
- [45] Jarominiak A., 2014. Rozmycia przy mostach i ich monitorowanie – część 2” – Drogownictwo nr 1.
- [46] Publikacja ESIM, 2017. Systemy Diagnostyki Kolejowej, Bari, Włochy.
- [47] Bednarek Ł., Ulaszek A., 2012. Zastosowanie technologii światłowodowej w pomiarach deformacji tuneli, Akademia Górniczo – Hutnicza, Kraków.
- [48] Wosniok A., Krywult Ł., Leibr S., Krebber K., Wendt M., Chrost A. 2011. Monitoring konstrukcji ziemnych przy zastosowaniu rozłożonych przestrzennie światłowodowych sensorów optycznych, zintegrowanych w geosyntetykach, Górnictwo i Inżynieria, zeszyt 2.
- [49] Y. Sun & H.-S. Lee & B. Han, 2016. Measurement of Elastic Properties of Epoxy Molding Compound by Single Cylindrical Configuration with Embedded Fiber Bragg Grating Sensor, China.
- [50] Arhant, M., Meek, N., Penumadu, D., Davies, P., Garg, N., 2017. Residual Strains using Integrated Continuous Fiber Optic Sensing in Thermoplastic Composites and Structural Health Monitoring.
- [51] R. Prussak, D. Stefaniak, C. Hühne, M. Sinapius, 2018. Evaluation of residual stress development in FRP-metal hybrids using fiber Bragg grating sensors.
- [52] Rębosz D., 2015. Światłowody w monitoringu” – Inżynier budownictwa, nr 134, grudzień 2015.

- [53] Montanini R., Recupero A., Domenico F. D., Freni F., 2016. Strain Sharing Assessment in Woven Fiber Reinforced Concrete Beams Using Fiber Bragg Grating Sensors, Italy.
- [54] He J., Yang J., Wang Y., Waisman H., Zhang W., 2016. Probabilistic Model Updating for Sizing of Hole-Edge Crack Using Fiber Bragg Grating Sensors and the High-Order Extended Finite Element Method Xueyuan Road, China.
- [55] Skłodowski M., Pawłowski P., Wójcicki P., 2013. Materiały XL Jubileuszowego Ogólnopolskiego Sympozjum „Diagnostyka Maszyn” – Politechnika Śląska / Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Katowice.
- [56] Kowalczyk P., Nowosielska K., 2012. Analiza możliwości wykrywania uszkodzeń konstrukcji za pomocą technik światłowodowych, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 201, Instytut Lotnictwa.
- [57] 2013 Experimental Mechanics of Composite, Hybrid, and Multifunctional Materials, Volume 6 Proceedings of the 2013 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics.
- [58] Juraszek J., Grzywa A., 2017. Monitorowanie odkształceń kładki dla pieszych za pomocą światłowodów FBG, Materiały Budowlane nr 5, Sigma-Not.
- [59] Bednarski Ł., Sieńko R., 2013. Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, Inżynieria i Budownictwo, nr 11, Warszawa.
- [60] Wróblewski R., Zając M., Kopij Ł., 2013, Monitorowanie dachów związane z obciążeniem śniegiem, Przegląd Budowlany, nr 11, Warszawa.
- [61] Skłodowski M., 2013. Współczesny monitoring obiektów budowlanych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Pracownia Adaptroniki, Warszawa.

- [62] 2016. Optymalizacja a podzycacji czujnika odkształceń FBG dla Quasi-Distributed Sensing Measurement Applications.
- [63] Segawa T., Suzuki D., Fujino T., Jukes T., Matsunuma T., 2017. Feedback Control of Flow Separation Using Plasma Actuator and FBG Sensor.
- [64] Barcik W., Sieńko R., Bilszczyk J. 2011. System monitorowania konstrukcji Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu, materiały z seminarium Wrocławskie Dni Mostowe – Aktualne realizacje mostowe, Wrocław.
- [65] Dziubiński G., Harasim D., Skorupski K., Mussabekov K., Kalizhanova A., Toigozhinova A., 2016. Optymalizacja parametrów światłowodowych czujników do pomiaru temperatury, Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Rocznik Ochrony Środowiska, tom 18, Koszalin.
- [66] Dong-Sheng Xu, 2017. A New Measurement Approach for Small Deformations of Soil Specimens Using Fiber Bragg Grating Sensors, China.
- [67] Roberto Marsili ID. , Gianluca Rossi and Emanuela Speranzini ID Department of Engineering, University of Perugia, via Duranti, 2017. Fibre Bragg Gratings for the Monitoring of Wooden Structures, Italy.
- [68] Wala A. „Wejście SMOK-a” – geoforum.pl, Geodezja, Edukacja, dostęp marzec 2017.
(<https://geoforum.pl/?page=news&id=23283&link=wejście-smok-a&menu=46812,46820>)
- [69] Shao L-Y., hang M., Xie K., Zhang X., Wang P., Yan L., 2017. The Longitudinal Force Measurement of CWR Tracks with Hetero-Cladding FBG Sensors: A Proof of Concept, Chengdu, China
- [70] Kang D., Chung W., 2013. Estimation of Curvature Changes for Steel-Concrete Composite Bridge Using Fiber Bragg Grating Sensors, Republic of Korea

- [71] Dokumentacja przedsięwzięcia pod nazwą: „Informatyczny system monitorowania obwałowań przeciwpowodziowych”, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (Projekt PBS1/B9/18/2013), Kraków, dostęp luty 2013.
(<http://www.ismop.edu.pl/sites/ismop.edu.pl/files/ISMOP-ulotkaA4.pdf>)
- [72] Wójcik W., Kisała P., Ciężczyk S., 2007. Czujnik rozkładu naprężenia ze światłowodową siatką Bragga, Politechnika Lubelska, Katedra Elektroniki, PAK vol. 53, nr 11, Lublin.
- [73] 1 School of Engineering, Nazarbayev University, 2017. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors, Kazakhstan.
- [74] Song X., Zhang Y., Liang D., 2017. Load Identification for a Cantilever Beam Based on Fiber Bragg Grating Sensors, China.
- [75] Zhuo Pang, Mei Yuan, Hao Song, and Zongxia Jiao, 2017. Impact Localization Method for Composite Plate Based on Low Sampling Rate Embedded Fiber Bragg Grating Sensors, China.
- [76] Karsznia K., Podawca K., 2017. Koncepcja zastosowania technologii światłowodowej w geodezyjnym monitoringu obiektów inżynierskich, Uniwersytet Zielonogórski, Zeszyty Naukowe, Inżyniera Środowiska nr 166, Zielona Góra.
- [77] Enciu D., Tudose M., Munteanu C. E., Ursu I., 2017. Strain measurements using Fiber Bragg Grating sensors in Structural Health Monitoring, Bucharest, Romania.
- [78] Materiały: Agenda Badawcza Wspólnego Przedsięwzięcia Województwa Lubelskiego oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju p.n. „Lubelska Wyżyna Technologii Fonicznych” – 2017, Lublin.

- [79] Lamberti A., Luyckx G., Paepegem W.V., Rezayat A., Vanlanduit S., 2017. Detection, Localization and Quantification of Impact Events on a Stiffened Composite Panel with Embedded Fiber Bragg Grating Sensor Networks, Belgium.
- [80] Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej, Innowacyjne technologie geodezyjne – zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki, Kamionka, czerwiec 2015.
- [81] Kim J-M., Kim C-M., Choi S-Y., Lee B. Y., 2017. Enhanced Strain Measurement Range of an FBG Sensor Embedded in Seven-Wire Steel Strands, Korea
- [82] Chiu Y-D., Wu C-W., Chiang C-C., 2017. Tilted Fiber Bragg Grating Sensor with Graphene Oxide Coating for Humidity Sensing, Taiwan;
- [83] Wydra M., Kisala P., Harasim D., Kacejko P., 2017. Overhead Transmission Line Sag Estimation Using a Simple Optomechanical System with Chirped Fiber Bragg Gratings. Part 1: Preliminary Measurements, Poland.
- [84] School of Engineering, Nazarbayev University, 2017. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors, Kazakhstan.
- [85] Song X., Zhang Y., Liang D., 2017. Load Identification for a Cantilever Beam Based on Fiber Bragg Grating Sensors, China.
- [86] Zhuo Pang, Mei Yuan, Hao Song, and Zongxia Jiao, 2017. Impact Localization Method for Composite Plate Based on Low Sampling Rate Embedded Fiber Bragg Grating Sensors, China.
- [87] Tłumaczenie Patentu Europejskiego PL/EP 1902923 – Europejski Biuletyn Patentowy 2010/15
- [88] Shea A., Wall K., Walker P., 2012. Evaluation of the thermal performance of an innovative prefabricated natural plant fibre building system.

- [89] Shewchuk J. P., Guo C., 2012. Panel Stacking, Panel Sequencing, and Stack Locating in Residential Construction: Lean Approach.
- [90] Khalili A., Chua D. K., 2013. Integrated Prefabrication Configuration and Component Grouping for Resource Optimization of Precast Production.
- [91] Orkisz M., Święch Ł., Zacharzewski J., 2012. Badania zmęczeniowe kompozytowego dźwigara skrzydła motoszybowca, Eksploatacja i niezawodność, vol. 14, nr 3, Warszawa.
- [92] Mąka W., 2012. Techniki Światłowodowe, sylabus Polsko – Japońskiej Akademii Technik Komputerowych, Warszawa.
- [93] Sokalski K., 2006. Linie Światłowodowe – metodologia łączenia i wstępnej certyfikacji, Cz. 1, Interlab.
- [94] Kilinçarslan S., Davraza M., Korua M., Ekiztasb F. P., 2016. Investigation of Properties of Foam Concretes Produced Using Pumice at Different Ratios.
- [95] Nisticò N., Gkagka E. E., Gantes C. J., 2015. Roof Isolation with Tuned Mass-based Systems and Application to a Prefabricated Building.
- [96] Józwik M., 2009. Wybrane zagadnienia technologii światłowodów” – na podstawie wykładu prof. dr hab. inż. M. Kujawińskiej „Technika światłowodowa”, Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [97] Anastasopoulos D., De Smedt M., De Roeck G., Vandewalle L., Reynders E. P. B., 2018. Damage Identification Using Sub-Microstrain FBG Data from a Pre-Stressed Concrete Beam During Progressive Damage Testing, Belgium.
- [98] Mec P., Stolarik M., Zabka S., Novak M., 2018. Application of FBG in the experimental measurements of structural elements deformation from cement composites, Germany.

- [99] Bester J., Engelbrecht J. G., Grobler M., 2018. Smart Monitoring of Movement and Internal Temperature Changes Within Polymer Modified Concrete Repair Patches, Switzerland.
- [100] S. Sivapriya, K. Kesavan, K. Ravisankar, S. Parivallal, M. Mmetro, 2018. Studies on Embeddable Type Packaged Strain-Temperature FBG Sensor for Concrete Structures.
- [101] Zhang Q., Xiong Z., 2018. Crack Detection of Reinforced Concrete Structures Based on BOFDA and FBG Sensors, China.
- [102] Artykuł p.n. „Okna transmisji w instalacjach światłowodowych” – ULTIMODE SYSTEM, data dostępu 12.11.2015 r.
(<http://ultimode.com.pl/blog/2015/11/12/okna-transmisji-w-instalacjach-swiatlowodowych/>).
- [103] Botici A., Ungureanu V., Ciutina A., Dubina D., Nagy Z., Riihimaki M. J., Talja A., Fülöp A. L., 2014. Sustainably Challenges Of Residential Reinforced - Concrete Panel Buildings.
- [104] Hertz K., Castberg A., Christensen J., University of Denmark, 2014 Super-light concrete decks for building floor slabs.
- [105] Kowalewski Z., Szymczak T., 2013. Podstawy tensometrii elektrooporowej oraz praktyczne jej zastosowania – materiały XIX-go Seminarium „Nieniszczące badania materiałów”, Zakopane.
- [106] Oferta firmy HBM (dostęp październik 2018 r.)
- <https://www.hbm.com/en/6702/k-op-configurable-optical-measurement-chain/>
- [107] Norma IEC 61757 (PN-EN 61757) „Czujniki światłowodowe”, część 1-1 „Pomiar naprężenia”,

11. STRESZCZENIE

11.1 STRESZCZENIE W JĘZYKU POLSKIM

Streszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Hubert Walusiak

Temat: MONITOROWANIE ODKSZTAŁCEŃ WYBRANYCH WĘZŁÓW KONSTRUKCYJNYCH BUDYNKU WYKONANEGO W SYSTEMIE POLYTECH ZA POMOCĄ ŚWIATŁOWODÓW Z SIATKAMI BRAGGA

Tworzenie coraz bardziej innowacyjnych i coraz większych konstrukcji jest procesem trudnym i niezwykle czasochłonnym. Wielkość tworzonych budowli jednoznacznie przekłada się na konieczność stosowania bardziej rygorystycznych wymagań wytrzymałościowych. Poszukiwanie jak najdokładniejszych sposobów monitoringu pozwoliło na powstanie prężnie rozwijającej się techniki wykorzystującej czujniki ze światłowodami optycznymi. Nowoczesne budowle dużej i małej skali oraz materiały stosowane do ich wznoszenia, muszą spełniać coraz bardziej restrykcyjne standardy bezpieczeństwa. Uzyskanie dokładnych wyników z zakresu monitoringu konstrukcji umożliwia zastosowanie techniki wykorzystującej światłowody optyczne z czujnikami.

Przedmiotowe badania przedstawione w dysertacji obejmują system prefabrykacji budynków „POLYTECH”, który jest nowo opracowaną metodą budowy. Nowy materiał „POLYTECH”, który został zastosowany w systemie prefabrykacji składa się w 60% z granulatu EPS pochodzącego z recyklingu i w 40% z odpowiednio modyfikowanej zaprawy.

W pracy doktorskiej zaprezentowano eksperymentalną metodę monitoringu elementów konstrukcji budynku przy użyciu światłowodów z siatką Bragga.

Celem niniejszej dysertacji było wykazanie, że zastosowanie czujników światłowodowych z siatką Bragga (z ang. *FBG Fiber Bragg Grating*) umożliwia wyznaczenie rzeczywistych wartości odkształceń występujących w elementach budynku i prefabrykacjach wykonanych z materiału budowlanego „POLYTECH”.

Badania przeprowadzono na wybranych prefabrykowanych elementach konstrukcyjnych z polimerobetonu – tzw. materiału „POLYTECH”, przeznaczonych do wykorzystania w branży budownictwa ogólnego.

Elementy i badane próbki to:

- próbki sześciennie z materiału „POLYTECH”,
- belki z materiału „POLYTECH”,
- nadproże w systemie „POLYTECH”,
- panel ścienny z nadprożem w systemie „POLYTECH”,
- słup żelbetowy w systemie „POLYTECH”,
- strop zespolony w systemie „POLYTECH”,
- panel ścienny w systemie „POLYTECH”.

Wymienione obiekty poddano pomiarom w zakresie odkształceń, jakim ulegają one pod wpływem występujących obciążeń. Następnie przeprowadzono walidację uzyskanych wyników za pomocą systemu „ARAMIS”. Badania odkształceń elementów budynku, w którym zastosowano nowy materiał upoważniają do sformułowania wniosku, iż materiał „POLYTECH” sprawdził się w systemie prefabrykacji elementów konstrukcyjnych. Rozwijający się system budowy potwierdza, iż możliwości wykorzystania EPS są coraz większe. Zastosowanie granulatu EPS umożliwia skuteczne zagospodarowanie odpadu oraz zmniejszenie zużycia kruszywa naturalnego w mieszance, co wpływa na skuteczniejszą ochronę środowiska naturalnego.

11.2 STRESZCZENIE W JĘZYKU ANGIELSKIM

Subject: USING FIBER BRAGG GRATING TO MONITOR DEFORMATIONS OF THE SELECTED STRUCTURAL NODES IN A BUILDING MADE IN POLYTECH SYSTEM

Development of ever more innovative and greater constructions is a difficult and a very time-consuming process. The size of buildings translates directly into the necessity to apply increasingly strict strength requirements. Explorations to find the most possible monitoring methods have contributed to the dynamic development of a technology which uses sensors with fiber optics. Modern large and small objects as well as materials used for the construction must meet the increasingly restrictive strength requirements and adequate safety standards. The technology using the fiber optics sensors allows to obtain precise results from object monitoring.

The research presented in this dissertation involve a system of building prefabrication called “POLYTECH” which is a new construction method. The new material “POLYTECH” which was used in the prefabrication system contains 60% of EPS granulate from recycling and 40% of properly modified mortar.

This doctoral dissertation presents an experimental method of monitoring the structural elements of a building by means of fiber Bragg grating sensors.

The purpose of this dissertation was to prove that using fiber Bragg grating (FBG) sensors enables determination of the real values of deformations in the elements of the building and the prefabricated components made of “POLYTECH”.

The tests were performed in the selected prefabricated construction elements made from polymer concrete – “POLYTECH”, designed for the general construction industry.

The following elements and samples were tested:

- cubic samples of the “POLYTECH” material
- beams made from “POLYTECH”
- lintel in the „POLYTECH” system
- wall panel with a lintel in the „POLYTECH” system
- reinforced concrete pillar in the „POLYTECH” system
- composite slab in the „POLYTECH” system
- wall panel in the „POLYTECH” system

The above listed object were subject to measurements regarding deformations the undergo due to the existing loads. Then, the results obtained were validated using the “ARAMIS” system. The studies of deformations in the building where the new material was introduced allow the conclusion that “POLYTECH” proved to work well in the prefabrication system of the structural elements. The developing construction system proves that the possibilities of application of EPS are increasing. Thanks to the use of EPS granulate the waste can be successfully utilized and amount of the natural aggregate in the mixture can be reduced. This, in turn, facilitates the effectiveness of environmental protection.