

---

**mgr inż. Tomasz Howiacki**  
Nauki Techniczne, Budownictwo  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Politechnika Krakowska



# **STRESZCZENIE**

**Analysis of cracks in concrete structures  
with the use of distributed optical fibre measurements**

**Analiza zarysowań w konstrukcjach betonowych  
przy zastosowaniu światłowodowych  
pomiarów rozłożonych**

Promotor: dr hab. inż. Marek Słoński, prof. PK  
Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Sieńko

Kraków, 2022  
Politechnika Krakowska

---

# Streszczenie

Światłowodowa technika pomiarów rozłożonych DFOS (*ang. distributed fibre optic sensing*) jest obecnie jedną z najbardziej obiecujących w kontekście monitorowania stanu technicznego konstrukcji inżynierskich i geotechnicznych. Jej podstawową zaletą, a jednocześnie przewagą nad tradycyjnymi technikami (np. tensometryczną), jest możliwość realizowania pomiarów wybranych wielkości fizycznych w sposób geometrycznie ciągły na całej długości liniowego czujnika. Dzięki temu uzyskiwana jest informacja o wszystkich lokalnych zdarzeniach występujących na długości trasy pomiarowej (np. zarysowaniach w konstrukcjach betonowych), co nie jest możliwe w ramach konwencjonalnych pomiarów punktowych. Fakt ten stanowi przełom w jakości uzyskiwanych informacji pomiarowych, m.in. z uwagi na możliwość bezpośredniej detekcji uszkodzeń wewnątrz elementu konstrukcyjnego.

Początki światłowodowej techniki DFOS związane są z rozwojem przemysłu lotniczego i kosmicznego. Pozyskiwanie kompleksowych i obiektywnych informacji na temat pracy maszyny, przy jednoczesnej minimalizacji objętości i masy czujników, a także towarzyszącego im okablowania, było dla inżynierów kluczowe z punktu widzenia optymalizacji, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. To właśnie zarządzanie ryzykiem z wykorzystaniem teorii prawdopodobieństwa i niezawodności konstrukcji jest obecnie dziedziną wiedzy szczególnie silnie rozwijaną w zagadnieniach inżynierskich w celu optymalnego podejmowania decyzji. Podstawowym aspektem minimalizującym ryzyko popełniania błędów (a tym samym wystąpienia awarii) jest pozyskanie obiektywnej wiedzy na temat pracy danej konstrukcji. Współcześnie wiedzę taką zdobywa się poprzez pomiary wykonywane z wykorzystaniem odpowiednich technik pomiarowych. Z uwagi na unikatowe zalety pomiarów światłowodowych DFOS, coraz częściej znajdują one zastosowanie w zagadnieniach inżynierii lądowej. Prace nad ich udoskonaleniem oraz dostosowaniem do specyfiki projektów budowlanych trwają obecnie na całym świecie. Badania przedstawione w treści rozprawy wpisują się zatem w aktualne, światowe trendy związane z monitorowaniem stanu technicznego konstrukcji.

Warto podkreślić, że pomiary realizowane wewnątrz elementu w sposób geometrycznie ciągły mają szczególne zastosowanie do konstrukcji wykonanych z betonu. Materiał ten jest znacznie bardziej wymagający do poprawnego monitorowania niż np. jednorodna stal. Powodem tego stanu rzeczy jest m.in. powstawanie nieciągłości geometrycznych (rys),

---

w obrębie których teoretyczne odkształcenia dążą do nieskończoności, powodując jednocześnie uszkodzenia tradycyjnych tensometrów. Dodatkowymi trudnościami są m.in. niejednorodność betonu, losowość rozmieszczenia ziaren kruszywa, efekty reologiczne czy też lokalne imperfekcje (w tym pory wewnętrzne i powierzchniowe).

W Rozdziale 1, w ramach wprowadzenia, omówione zostały podstawowe wymagania stawiane obecnie systemom monitorowania, przede wszystkim w odniesieniu do konstrukcji betonowych, uwzględniające m.in. możliwość bezpośredniej detekcji lokalnych uszkodzeń. Przedstawiono podstawowe zalety i ograniczenia technik pomiarowych stosowanych do pomiarów i analizy zarysowań. Wszystkie techniki punktowe charakteryzują się podstawowym, wspólnym ograniczeniem: mogą być stosowane dopiero w momencie, kiedy obecność rysy została zidentyfikowana uprzednio w inny sposób (np. poprzez wizualną ocenę). Przewagę pomiarów geometrycznie ciągłych nad metodami konwencjonalnymi przedstawiono i wyjaśniono na gruncie probabilistycznym, ale także zobrazowano na przykładzie statystyk potwierdzających dynamiczny rozwój rynku DFOS w ostatnich latach. Wszystkie rozważania w Rozdziale 1 uzasadniały motywację autora do podjęcia tematu związanego z wykorzystaniem światłowodowych pomiarów rozłożonych DFOS do analizy rys w konstrukcjach betonowych.

Rozdział 2 stanowi obszerny przegląd aktualnego stanu wiedzy związanego z podejmowanym tematem. W ramach analizy literatury polskiej i światowej (przede wszystkim anglojęzycznej), stworzona została interaktywna baza literaturowa, uwzględniająca m.in. artykuły, książki, patenty czy też materiały firmowe. Baza liczy ponad 500 pozycji, z czego pozycje polskie stanowią ok. 11%. Ponad połowa zgromadzonych w bazie rekordów została przywołana w treści rozprawy.

Systemy pomiarowe budowane w oparciu o technikę DFOS składają się z dwóch podstawowych elementów: rejestratorów optycznych oraz czujników. Od jakości tych elementów zależy końcowa dokładność systemu. Stąd, w pracy omówiono podstawy teoretyczne zjawisk optycznych (m.in. rozpraszania Rayleigha) i urządzeń, pozwalających na realizację pomiarów geometrycznie ciągłych. Podano także konkretne specyfikacje techniczne popularnych na rynku rozwiązań w celu zobrazowania aktualnych możliwości w zakresie uzyskiwanych parametrów pomiarowych. Do parametrów tych należą przede wszystkim dokładność i rozdzielczość przestrzenna (liczba punktów pomiarowych na 1 metr światłowodu), determinujące jakość pomiarów związanych z detekcją i analizą rys. Z uwagi na dynamiczny rozwój światłowodowej techniki pomiarowej, parametry rejestratorów pomiarowych są nieustannie udoskonalane, a na rynku pojawiają się coraz to nowsze urządzenia.

---

Z punktu widzenia długoterminowych systemów monitorowania kluczowym aspektem są jednak czujniki instalowane w obrębie konstrukcji, np. zatapiane wewnątrz elementów betonowych. W przypadku awarii rejestratora, istnieje możliwość jego łatwej wymiany. Jednak czujniki powinny charakteryzować się wieloletnią trwałością i niezawodnością, co w przypadku zarysowanego betonu nie jest łatwe z uwagi na ekstremalnie duże wartości odkształceń generowane przez powstające rysy. To właśnie narzędziom pomiarowym DFOS (włóknom, kablom i czujnikom) poświęcona jest główna część prac badawczych zrealizowanych w ramach doktoratu.

W dalszej części Rozdziału 2 przedstawiano obszerny przegląd dostępnych na rynku narzędzi pomiarowych DFOS. Czyste włókno światłowodowe (bez żadnych dodatkowych warstw ochronnych) wykorzystywane jest zazwyczaj w warunkach laboratoryjnych z uwagi na wysokie ryzyko uszkodzenia na placu budowy bądź w trakcie instalacji na istniejącym obiekcie. Stąd, szerokie zastosowanie w rzeczywistych projektach znalazły kable warstwowe o rodowodzie telekomunikacyjnym. Analiza teoretyczna ich budowy wskazuje jednak na wiele wad ograniczających zasadność ich stosowania do pomiarów inżynierskich. Przede wszystkim obecność wielu warstw powoduje możliwość powstania poślizgu pomiędzy nimi, co uniemożliwia poprawne przenoszenie odkształceń z elementu konstrukcyjnego na światłowodowe włókno pomiarowe zlokalizowane wewnątrz kabla. Po drugie, zastosowanie materiałów takich jak plastik czy stal, uniemożliwia pracę kabla w szerokim zakresie liniowo-sprężystym. W przypadku powstania rysy dochodzi zarówno do poślizgu między warstwami, jak również do uplastycznienia poszczególnych warstw kabla, co w sposób znaczący wpływa na obniżenie jakości dostarczanej informacji pomiarowej. Wyniki prezentowane w wielu publikacjach naukowych jednoznacznie wskazują, że stosowanie kabli wielowarstwowych do monitorowania stanu technicznego konstrukcji (w szczególności betonowych), wbrew zapewnieniom producentów, ma wątpliwe uzasadnienie merytoryczne. Z drugiej strony brak było jednoznacznych badań doświadczalnych potwierdzających taką tezę.

Kable warstwowe znalazły zastosowanie w wielu praktycznych projektach przede wszystkim z uwagi na fakt, że do tej pory brak było na rynku satysfakcjonujących alternatyw. Jednak w ostatnich latach opracowane zostały i wprowadzone na rynek monolityczne, kompozytowe czujniki odkształceń DFOS, dedykowane specjalnie do zastosowań w inżynierii lądowej i geotechnice. Na uwagę zasługuje fakt, że ich projekt oraz produkcja w całości oparte są na polskiej myśli technicznej. Idea czujników opiera się na integracji włókna światłowodowego wewnątrz kompozytowego pręta produkowanego w procesie pultruzji. Dzięki temu wyeliminowane zostały podstawowe ograniczenia kabli sensorycznych. Trzy podstawowe różnice obejmują monolityczny przekrój poprzeczny (bez żadnych pośrednich warstw), wysoko-elastyczny materiał rdzenia (odpowiedni kompozyt) oraz uszorstniona

---

(z wykorzystaniem opłotu spiralnego) powierzchnia zewnętrzna czujnika, zapewniająca jego mechaniczne związanie z otaczającym betonem.

W związku z powyższym, zasadne stało się bezpośrednie porównanie wskazań czujników monolitycznych i kabli warstwowych w obrębie dokładnie tego samego elementu betonowego, pracującego w stanie zarysowanym. Tego typu badania nie były nigdy wcześniej prowadzone i publikowane.

Poza przeglądem światłowodowych włókien pomiarowych, wielowarstwowych kabli sensorycznych i monolitycznych czujników DFOS, w Rozdziale 2 omówiono także podstawowe metody ich instalacji, w tym metody powierzchniowe dla istniejących konstrukcji oraz dedykowane do zatapiania wewnątrz nowo wznoszonych obiektów. Przedstawiono podstawy teoretyczne związane z mechanizmem przenoszenia odkształceń z betonu na włókno pomiarowe wewnątrz czujnika (lub kabla) w obrębie rysy. Omówiono także podstawowe modele matematyczne stosowane do opisu tego zjawiska. Mają one zastosowanie przede wszystkim w odniesieniu do wielowarstwowych kabli sensorycznych. Na koniec, zaprezentowano na konkretnych przykładach możliwości techniki DFOS do detekcji rys w różnego rodzaju elementach betonowych oraz algorytmy obliczeniowe do szacowania szerokości rys na podstawie zarejestrowanego rozkładu odkształceń.

Na podstawie obszernego przeglądu literaturowego, ale także aktualnych specyfikacji dostępnych na rynku urządzeń pomiarowych oraz włókien, kabli i czujników, w Rozdziale 3 sformułowano podstawowe tezy pracy. Obejmują one po pierwsze możliwość zapewnienia odpowiedniej przyczepności pomiędzy betonem a światłowodowym włóknom pomiarowym, pozwalającej na jednoznaczną identyfikację powstających zarysowań. Po drugie założono, że możliwe jest obliczanie szerokości rys z dokładnością nie gorszą niż 0.05 mm na podstawie zarejestrowanego profilu odkształceń. Powyższe tezy należało zweryfikować z uwzględnieniem możliwości wystąpienia co najmniej kilku cykli obciążeniowych. Zaproponowano obszerny program badań laboratoryjnych, obejmujący badania przygotowawcze (Rozdział 4), oraz badania główne podzielone na trzy części. Pierwsza część (Rozdział 5) obejmuje badania drobnowymiarowych, betonowych próbek walcowych z powierzchniowymi włóknami światłowodowymi. Część druga (Rozdział 6) dotyczy pełnowymiarowych płyt sprężonych, wyposażonych w powierzchniowe włókna światłowodowe analogiczne jak w poprzedniej części, ale także w monolityczne czujniki zatopione wewnątrz płyt na wysokości cięgien sprężających. Ostatnia, trzecia część badań (Rozdział 7) obejmuje sześć belek żelbetowych, w których zainstalowane zostały monolityczne czujniki i kable warstwowe. Zostały one rozmieszczone równolegle do siebie zarówno w strefie ściskanej, jak i rozciąganej. Dzięki temu uzyskano możliwość bezpośredniego

---

porównania wskazań popularnych narzędzi DFOS. Przedstawione badania były pierwszymi tego typu na świecie, a uzyskane rezultaty nie były uprzednio nigdzie publikowane.

Badania wstępne przedstawione w Rozdziale 4 miały na celu przede wszystkim rozeznanie i wybranie podstawowych narzędzi DFOS, które wykorzystane zostały w badaniach głównych. Jednym z kryteriów wyboru było powszechne stosowanie danego narzędzia w rzeczywistych projektach z uwagi na fakt, że ważnym założeniem autora było odniesienie prowadzonych badań do praktycznych oczekiwań rynku.

Do pomiarów powierzchniowych wybrano włókno światłowodowe w powłoce akrylowej z uwagi na jej bardzo duży zakres pomiaru odkształceń (potrzebny w przypadku analizy zarysowań) oraz wysoką odporność na oddziaływanie alkalicznego środowiska betonu. Te same kryteria spowodowały o rezygnacji z powłoki polimidowej (ograniczony zakres odkształceń oraz brak odporności). Z kolei do pomiarów odkształceń wewnątrz betonu wybrano dwa czujniki monolityczne (EpsilonSensor, EpsilonRebar) oraz dwa popularne kable warstwowe (Brugg V1 oraz V9). Wybrane narzędzia DFOS zostały zweryfikowane i skalibrowane w teście osiowego rozciągania. Wstępne badania wykonane w najprostszym stanie odkształcenia wskazały na losowe poślizgi wewnątrz kabla warstwowego oraz poprawną (zgodną z przewidywaniami teoretycznymi) pracę czujnika monolitycznego.

W Rozdziale 4 omówiono także skrótowo wyniki prac prowadzonych przez autora w ramach większego zespołu badawczego, które już wcześniej zostały opublikowane, i które miały znaczenie dla zaprojektowania docelowych badań przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy. W badaniach tych analizowano m.in. możliwość zastosowania włókna światłowodowego w ściślej powłoce zewnętrznej do pomiarów powierzchniowych betonowego walca oraz do pomiarów wewnątrz rozciąganego, zarysowanego elementu żelbetowego.

Rozdział 5 stanowi opis pierwszej części badań, w których analizowano możliwość zastosowania światłowodowych włókien pomiarowych DFOS do powierzchniowych pomiarów odkształceń drobnowymiarowych elementów betonowych. Zdecydowano o przygotowaniu 20 standardowych walców, zróżnicowanych z uwagi na maksymalny wymiar kruszywa w betonie (10 walców z kruszywem 8 mm oraz 10 z kruszywem 16 mm). Miało to na celu sprawdzenie czy wielkość kruszywa może mieć znaczenie dla pomiarów wykonywanych w sposób geometrycznie ciągły z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Włókna światłowodowe zostały przyklejone do oczyszczonych powierzchni walców w taki sposób, że jedno włókno tworzyło trzy pionowe odcinki pomiarowe (pracujące w strefie ściskanej) oraz dwa obwodowe (pracujące w strefie rozciąganej). Do montażu wykorzystano dwuskładnikową żywicę epoksydową. Zaproponowano dwa sposoby instalacji: z uprzednim

---

przygotowaniem powierzchni (wypełnienie porów żywicą) oraz bez tego przygotowania (wypełnianie porów bezpośrednio w trakcie montażu włókna).

Walce betonowe zostały poddane próbie osiowego ściskania na maszynie wytrzymałościowej. W czasie całych badań przeanalizowano pracę włókna łącznie na 60 odcinkach pionowych oraz 40 odcinkach obwodowych, dzięki czemu uzyskano statystyczne potwierdzenie wyciągniętych wniosków. Jednym z parametrów, na podstawie których dokonywano oceny, był współczynnik zmienności rozkładu odkształceń w ramach danego odcinka i w danym kroku obciążeniowym. Wartość współczynnika była niewielka w strefie ściskanej, jednak średnio 4.5 razy większa w strefie rozciąganej z uwagi na rozwój mikrozarysowań (niewidocznych gołym okiem). Efekt ten był widoczny szczególnie w końcowych krokach obciążania, tj. tuż przed zniszczeniem elementu. Z uwagi na jednoczesną rejestrację odkształceń na kierunku głównym oraz prostopadłym do niego, możliwe było wyznaczenie współczynnika Poissona, którego wartość była stała w początkowych krokach i rosła w końcowych z uwagi na zarysowanie strefy rozciąganej. Podobne wnioski otrzymano dla analizy przyrostowej, w ramach której pomiary zerowe przyjmowane były na nowo w każdym kroku obciążeniowym. Tym samym zaproponowano metodę, na podstawie której możliwe jest identyfikowanie stanu zagrożenia elementu betonowego bez względu na moment rozpoczęcia pomiaru (nie jest potrzebna wiedza o początkowym stanie naprężeń). Zagadnienie to, zdaniem autora, powinno być przedmiotem dalszych badań teoretycznych i laboratoryjnych, w szczególności w odniesieniu do elementów ściskanych takich jak słupy.

Na podstawie analizy uzyskanych danych pomiarowych stwierdzono także, że wielkość kruszywa oraz metoda montażu włókna na powierzchni betonu mają pomijalne znaczenie z punktu widzenia interpretacji fizycznej wyników odkształceń. Analizie poddany został ponadto wpływ rozdzielczości przestrzennej, którą przyjmowano w procesie post-processingu równą 5, 10, 15, 20 i 50 mm. Ostatecznie zdecydowano (i zarekomendowano do dalszych badań) o przyjęciu rozdzielczości równej 10 mm (100 punktów pomiarowych na jeden metr włókna), co odpowiada zaleceniom producenta stosowanego reflektometru optycznego.

W ramach drugiej części badań, opisanych szczegółowo w Rozdziale 6, kontynuowano pomiary z wykorzystaniem powierzchniowych włókien w powłoce akrylowej. Tym razem badaniom zostały poddane trzy pełnowymiarowe, sprężone (strunobetonowe) płyty. Włókna DFOS przyklejono do górnej i dolnej powierzchni z uwzględnieniem wniosków przedstawionych w pierwszej części badań. Ponadto, wewnątrz płyt zainstalowano monolityczne czujniki na wysokości dolnych i górnych cięgien sprężających. W tym przypadku były to jeszcze prototypowe wersje czujnika EpsilonRebar, w których włókno integrowane było z kompozytowym rdzeniem nie na etapie jego produkcji (pultruzji), ale już

---

na gotowym pręcie z wykorzystaniem rowka wypełnionego żywicą. Docelowe wersje czujnika, z uwagi na czas prowadzenia pomiarów, zastosowane były dopiero w trzeciej części badań.

Dzięki instalacji czujników wewnątrz betonu, możliwe było analizowanie pracy płyty we wczesnym etapie dojrzewania betonu (odkształcenia termiczno-skurczowe w czasie hydratacji), a także szczegółowe kontrolowanie procesu sprężania. Najważniejszym etapem były jednak badania wytrzymałościowe w próbie czteropunktowego zginania. Analizowane były jednocześnie wskazania powierzchniowych włókien i czujników zlokalizowanych wewnątrz betonu pod kątem ich wrażliwości na powstające zarysowania. Z uwagi na pomijalną sztywność włókna światłowodowego i jego skrajne oddalenie od osi obojętnej elementu, okazało się być ono bardziej czułym rozwiązaniem. Jednak należy podkreślić, że możliwość zastosowania włókna DFOS ogranicza się wyłącznie do warunków laboratoryjnych. Oszacowane szerokości rys przez oba rozwiązania były jednak do siebie zbliżone, z uwzględnieniem korekty związanej z lokalizacją (wartości rys na wysokości ciągnięć sprężających były naturalnie mniejsze niż te na dolnej powierzchni). Maksymalne odkształcenia rozciągające zarejestrowane przez przyklejone włókno sięgały aż 3,2% (32 000  $\mu\epsilon$ ). Wartości takie są zazwyczaj nieosiągalne dla klasycznych technik punktowych, np. tensometri oporowe ulegają zniszczeniu w momencie powstania rysy w przekroju tensometru.

W przypadku płyt sprężonych stosowano referencyjne, punktowe czujniki strunowe (*ang. vibrating wire sensors*) zainstalowane na dolnej i górnej powierzchni płyty, równoległe do włókien światłowodowych. Uzyskano dobrą zbieżność wyników w początkowych krokach badaniach. Przy większym obciążeniu dochodziło jednak do odspajania czujników punktowych lub ich uszkodzenia.

Przy dużych deformacjach płyty spowodowanych dużym obciążeniem, widoczne były także lokalne efekty związane z odspajaniem włókna i/lub żywicy od powierzchni betonu. Jednak w dalszym ciągu istniała możliwość poprawnej interpretacji pracy konstrukcji na podstawie zarejestrowanych profili odkształceń. Na podstawie zdobytych doświadczeń zdecydowano o konieczności głębszej analizy zjawiska poślizgu międzywarstwowego, co zostało uwzględnione w kolejnej części badań.

Ta trzecia i ostatnia część została opisana w Rozdziale 7. Jest ona także najistotniejsza z punktu widzenia realizacji rzeczywistych projektów w ramach budowy długoterminowych systemów monitorowania konstrukcji betonowych. Co więcej, badania zrealizowane w części trzeciej były pierwszymi tego typu na świecie. W sposób bezpośredni porównane zostały cztery popularne narzędzia pomiarowe DFOS przeznaczone do montażu bezpośrednio w betonie:



---

1. Dwa czujniki monolityczne:

- a. **EpsilonSensor** – kompozytowy czujnik bez żadnych warstw pośrednich, charakteryzujący się bardzo małą sztywnością, dzięki czemu nie stanowi on zbrojenia dla monitorowanej konstrukcji ( $\varnothing = 3 \text{ mm}$ ,  $E = 3 \text{ GPa}$ ),
- b. **EpsilonRebar** – kompozytowy czujnik bez żadnych warstw pośrednich, charakteryzujący się bardzo dużą sztywnością, przez co może on stanowić zbrojenie dla monitorowanej konstrukcji ( $\varnothing = 5 \text{ mm}$ ,  $E = 50 \text{ GPa}$ ).

2. Dwa kable warstwowe:

- a. **Brugg V1** – kabel o średnicy 2.8 mm składający z trzech warstw pośrednich wykonanych z tworzywa sztucznego. Brak informacji na temat parametrów sztywnościowo-wytrzymałościowych,
- b. **Brugg V9** – kabel o średnicy 3.2 mm składający z trzech warstw pośrednich, z czego dwie wykonano z tworzywa sztucznego, a jedną ze stali (jako warstwę wzmacniającą). Brak informacji na temat parametrów sztywnościowo-wytrzymałościowych.

Badania obejmowały sześć belek żelbetowych o długości równej 4 m, zróżnicowanych z uwagi na zastosowane zbrojenie główne (3 belki z prętami o średnicy  $\varnothing = 10 \text{ mm}$  oraz 3 belki z prętami o średnicy  $\varnothing = 20 \text{ mm}$ ). Miało to na celu zróżnicowanie powstających zarysowań. Dla belek o mniejszym zbrojeniu rysy powstawały w większym rozstawie i były znacznie szersze niż w przypadku większego zbrojenia. Dzięki temu możliwe było przeanalizowanie pracy czujników w różnych warunkach zarysowania. W trakcie całych badań, przeanalizowano łącznie pagę 118 rys, dzięki czemu uzyskano statystyczną pewność co do poprawności przedstawionego wniosku.

Badania obejmowały pomiary odkształceń termiczno-skurczowych powstających w czasie dojrzewania młodego betonu. Górna powierzchnia belek w sposób celowy nie była w żaden sposób pielęgnowana, aby zintensyfikować proces powstawania rys skurczowych. Dzięki temu zabiegowi, w czasie testów pod obciążeniem mechanicznym, możliwe było analizowanie pracy czujników nie tylko w obliczu powstających, nowych zarysowań (oddziaływania o charakterze rozciągającym), ale także w czasie zamykania się istniejących rys na górnej powierzchni (oddziaływania o charakterze ściskającym).

W pierwszym miesiącu dojrzewania betonu, tj. w czasie, kiedy nie uzyskał on jeszcze swoich pełnych parametrów wytrzymałościowych, na kablu V1 uwidoczniły się lokalne efekty (zaburzenia) związane z dociskiem kabla do strzemion z wykorzystaniem opasek

---

zaciskowych. Powodem tego zjawiska była niewystarczająca sztywność poprzeczna kabla na tego typu oddziaływania, które jednak są nieodłącznym elementem instalacji. W związku z powyższym zalecono szczególną kontrolę tego procesu, co jest możliwe w warunkach laboratoryjnych, ale może nastroczać trudności na rzeczywistych placach budów.

Kolejnym etapem były badania wytrzymałościowe w teście czteropunktowego zginania. Jednocześnie wykonywano odczyty kabli i czujników zlokalizowanych zarówno w dolnej, jak i górnej części belek. W czasie jednej sesji pomiarowej, realizowanej przy ustalonej sile, uzyskiwano zatem informację na długości pomiarowej równej 32 m, co przy rozdzielczości przestrzennej rzędu 10 mm przekłada się na 3 200 punktów pomiarowych.

Do oceny jakości wykresu odkształceń w kontekście możliwości identyfikacji rys oraz szacowania ich szerokości, zaproponowano i zdefiniowano współczynnik kształtu rysy CSC (*ang. crack shape coefficient*). Wyraża on zmienność odkształceń na długości efektywnej, tj. długości, na której widoczny jest na wykresie odkształceń wpływ powstałego zarysowania. W przypadku wielu rys zlokalizowanych stosunkowo blisko siebie (jak w przypadku przedmiotowych badań), długość efektywną można przyjmować jako odległość pomiędzy środkami obszarów występujących pomiędzy rysami. Innym parametrem podlegającym ocenie była szerokość rysy, wyznaczana poprzez całkowanie wykresu odkształceń w granicach długości efektywnej. Pomiar referencyjny szerokości rys prowadzono z wykorzystaniem mikroskopów optycznych na bocznej powierzchni badanej belki. Mają one zatem charakter orientacyjny z uwagi na różne lokalizacje pomiarów oraz losowość przebiegu rysy zarówno po szerokości, jak i wysokości elementu konstrukcyjnego.

W obrębie strefy ściskanej, wszystkie czujniki i kable dały rozsądne wyniki, tj. takie, które pozwalają na poprawną ocenę pracy konstrukcji (identyfikację zarysowań oraz oszacowanie zmian szerokości rys, w tym przypadku zamykających się). Należy jednak podkreślić, że wnioski te dotyczą tylko i wyłącznie oddziaływania o charakterze ściskającym w bardzo niewielkim zakresie odkształceń (do  $-1200 \mu\epsilon$ ). Z punktu widzenia matematyki, najlepsze parametry uzyskano w każdej belce dla czujnika EpsilonSensor.

Znacznie bardziej zróżnicowane wyniki otrzymano dla strefy rozciąganej, którą analizowano w ekstremalnie dużym zakresie odkształceń. Z uwagi na bardzo szerokie zarysowania ( $>> 1,2 \text{ mm}$ ), maksymalna wartość odkształcenia w całych badaniach została zarejestrowana przez czujnik EpsilonSensor i wynosiła 2,9% ( $29\,000 \mu\epsilon$ ). Przegląd literatury światowej wskazuje, że takie wartości nie były uzyskiwane nigdy wcześniej. Prezentowane w publikacjach zakresy nie przekraczały 1%, choć najczęściej rysy analizowane były na podstawie odkształceń sięgających zaledwie 0,5% lub mniej.

---

W każdym przypadku zdecydowanie najlepsze parametry osiągane były przez monolityczny czujnik odkształceń EpsilonSensor o zredukowanej sztywności osiowej. Parametry te obejmowały w szczególności współczynnik kształtu rysy, szerokość rysy, maksymalną wartość odkształcenia czy też wskaźniki statystyczne obliczane na całej długości belki (w tym odchylenie standardowe czy współczynnik zmienności odkształceń). Przykładowo, dla belki z większym zbrojeniem średnie wartości współczynnika kształtu CSC wynosiły 75% dla kabla V1, 59% dla czujnika EpsilonRebar i zaledwie 26% dla kabla V9 w odniesieniu do wskazań czujnika EpsilonSensor. Z kolei średnie szerokości rysy były zaniżone odpowiednio o 0,04, 0,01 oraz 0,06 mm, przy maksymalnych różnicach dla kabla V9 przekraczających nawet 0,20 mm. Uzyskane wyniki były tego samego rzędu dla wszystkich analizowanych belek.

Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują, że najlepszym rozwiązaniem do pomiarów i analizy zarysowań są monolityczne czujniki o obniżonej sztywności (EpsilonSensor), które nie stanowią zbrojenia dla betonu. Czujniki o wysokiej sztywności (EpsilonRebar) pozwoliły jednak na poprawną identyfikację wszystkich rys i obliczenie ich szerokości. Brak poślizgów wewnętrznych zapewnił powtarzalność pomiarów oraz możliwość ich skutecznej interpretacji. Dlatego zalecono stosowanie tego typu czujników do monitorowania rzeczywistych, wielkogabarytowych konstrukcji inżynierskich, dla których obecność sztywnego czujnika jest bez znaczenia. Kolejnym argumentem przemawiającym za takim podejściem jest całkowita odporność na korozję czujników kompozytowych oraz ich odporność na trudne warunki instalacji i eksploatacji. Sztywne czujniki stanowiące zbrojenie betonu nie powinny być jednak wykorzystywane w niewielkich próbkach laboratoryjnych z uwagi na ich wpływ na pracę monitorowanego elementu.

Kabel warstwowy V1 składający się z trzech powłok z tworzywa sztucznego, pozwolił na poprawną analizę rys w zakresie nieprzekraczającym 1%. Wartość ta zgodna jest ze specyfikacjami technicznymi podawanymi przez producenta i jest możliwa do osiągnięcia dzięki dobremu zespoleniu warstw. Jednak po przekroczeniu tego progu, tj. w przypadku analizy szerokich rys ( $> 0,5$  mm), zaobserwowano zjawisko poślizgu. Lokalne ekstrema odkształceń w obszarze rysy obniżały się w stosunku do wskazań czujnika EpsilonSensor. Ponadto, w przypadku rys zlokalizowanych blisko siebie, dwa ekstrema zlewały się w jedno zdarzenie tj. utracona została informacja o faktycznym stanie elementu. Ryzyko wystąpienia poślizgu zaburzającego transfer odkształceń powinno być minimalizowane w przypadku monitorowania rzeczywistych konstrukcji. W sposób bezpośredni wpływa ono na niezawodność całego systemu. Na podstawie rejestrowanych profili odkształceń podejmowane są decyzje związane z bezpieczeństwem eksploatacji danej konstrukcji betonowej.

---

W przypadku pomiarów odkształceń termiczno-skurczowych w czasie hydratacji młodego betonu, zaobserwowano lokalne zakłócenia na kablu V1 spowodowane poprzecznym dociskiem opasek zaciskowych zakładanych w czasie instalacji. Zwrócono uwagę na konieczność szczegółowej kontroli tego procesu. W związku z powyższym, ostateczne rekomendacje dla kabla V1 stwierdzają, że może on być skutecznie stosowany do pomiarów zarysowań, jednak tylko w ograniczonym zakresie odkształceń oraz przy szczególnie kontrolowanym procesie instalacji. W praktyce powyższe założenia sprowadzają się do warunków laboratoryjnych.

Kabel warstwowy V9 wykorzystuje w swojej budowie stalową warstwę, której celem jest jego wzmocnienie. Jednak uzyskane wyniki badań jednoznacznie wskazują, że warstwa ta uniemożliwia poprawny transfer odkształceń z betonu na włókno zlokalizowane w środku kabla. Zaobserwowano występowanie poślizgów na całej długości już od pierwszych kroków obciążeniowych, dlatego poprawna identyfikacja zarysowań była niemożliwa. Wnioski takie, choć widoczne na wykresach gołym okiem, potwierdzone zostały z wykorzystaniem analizy statystycznej konkretnych parametrów, w tym współczynnika kształtu rysy. Przedstawiony w specyfikacjach kabla V9 zakres odkształceń sięgający 1% jest niemożliwy do osiągnięcia w praktyce. Maksymalne odkształcenie zarejestrowane w czasie badań wynosiło zaledwie 0,7%. Dla porównania, w tym samym kroku obciążeniowym wartość zarejestrowana przez czujnik EpsilonSensor była prawie 4 razy wyższa (2,9%).

Niepokojący jest fakt częstego wykorzystywania kabla V9 do monitorowania rzeczywistych konstrukcji inżynierskich. Jednym z argumentów marketingowych jest wysoka wytrzymałość związana z obecnością wkładki stalowej. Jednak jej obecność z punktu widzenia jakości pomiarów odkształceń jest niedopuszczalna. Uzyskane wyniki badań, potwierdzone statystyczną analizą, jednoznacznie wskazują, że kable ze zbrojącymi elementami stalowymi nie powinny być w żadnym wypadku stosowane do monitorowania zarysowanych konstrukcji betonowych. Stwarzają one bowiem istotne ryzyko błędnej interpretacji rzeczywistej pracy danej konstrukcji pracującej w stanie zarysowanym.

Przedstawione w Rozdziale 7 badania i wnioski dostarczyły zupełnie nowej wiedzy i naukowych dowodów na zjawiska, które uprzednio wyjaśniane były wyłącznie na drodze teoretycznej. Stosowanie kabli wielowarstwowych o rodowodzie telekomunikacyjnym w monitorowaniu konstrukcji stało się powszechne na świecie z uwagi na brak zweryfikowanych alternatyw. Monolityczne czujniki kompozytowe stanowią obecnie wypełnienie luki rynkowej. Zostały one zaprojektowane specjalnie do zastosowań w zagadnieniach inżynierii lądowej, a przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania potwierdzają ich skuteczność i niezawodność, nawet w przypadku pomiarów ekstremalnie dużych zarysowań.

---

W ostatnich latach zaobserwowano wyraźny wzrost zastosowania czujników monolitycznych w rzeczywistych konstrukcjach inżynierskich (kilkadziesiąt projektów w Polsce, ale także pilotażowe instalacje w Niemczech, Austrii, Szwajcarii, Japonii czy Stanach Zjednoczonych). Trend ten prawdopodobnie utrzymywać się będzie w niedalekiej przyszłości. Autor wyraża nadzieję, że przedstawione w niniejszej pracy badania i spostrzeżenia przyczynią się choć w niewielkim stopniu do popularyzacji dobrych praktyk w zakresie monitorowania zarysowanych konstrukcji betonowych.

W Rozdziale 8 przedstawiono w sposób syntetyczny najważniejsze wnioski uzyskane w trakcie wszystkich prowadzonych prac, obejmujących analizę literatury polskiej i zagranicznej, badania wstępne oraz trzy części docelowych badań doświadczalnych. W sposób szczególny zwrócono uwagę na wnioski o charakterze praktycznym, tj. związanym z wyborem konkretnych narzędzi pomiarowych czy też sposobów ich instalacji. Celem autora było przedstawienie problematyki pomiarów zarysowanych konstrukcji betonowych w sposób kompleksowy tj. z podziałem na konstrukcje istniejące i nowowznoszone. W tym pierwszym przypadku konieczne jest przeprowadzenie instalacji powierzchniowej, w tym drugim, najlepszym rozwiązaniem będzie zatopienie czujników wewnątrz betonu i monitorowanie jego pracy już we wczesnej fazie dojrzewania.

Ponadto, przeanalizowano podział z uwagi na krótkoterminowe badania laboratoryjne, związane przede wszystkim z niewielkimi próbkami i elementami betonowymi, jak również na długoterminowy monitoring rzeczywistych konstrukcji inżynierskich. W każdym przypadku podejście do stworzenia niezawodnego systemu pomiarowego w oparciu o technikę DFOS będzie nieco różne. Ostatni rozdział niniejszej rozprawy w sposób zwięzły i inżynierski podsumowuje zdobytą w czasie badań wiedzę, wskazując jednocześnie praktyczne rekomendacje do stosowania w przyszłości.