

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

Wydział Transportu



XL Jubileuszowe Ogólnopolskie  
Symposium  
**DIAGNOSTYKA MASZYN**

*Poświęcone Pamięci*

*Prof. dr. hab. inż. Janusza Gardulskiego*

Wiśła 04.03. ÷ 08.03.2013 r.



dr inż. Marek Skłodowski <sup>1</sup>

dr inż. Piotr Pawłowski <sup>1</sup>

mgr inż. Paweł Wójcicki <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zakład Technologii Inteligentnych

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

## **PILOTAŻOWY SYSTEM MONITOROWANIA STANU DEFORMACJI KONSTRUKCJI STADIONU PIŁKARSKIEGO**

Znaczny rozwój inwestycji wielkogabarytowych obiektów sportowych stworzył potrzebę równoległego rozwoju metod monitorowania bezpieczeństwa stadionów mogących pomieścić dziesiątki tysięcy ludzi. Powszechną cechą eksploatacji wielkich stadionów jest ich wykorzystanie zarówno do organizacji imprez sportowych jak i masowych imprez kulturalnych np. koncertów. Specyfika takich dużych imprez sportowych i kulturalnych niesie w sobie zagrożenia dla konstrukcji na skutek nieprzewidywalnych na etapie projektowania zmian obciążeń wywołanych drganiami i montażem na elementach konstrukcji dodatkowego ciężkiego sprzętu.

Mając na uwadze powyższe uwarunkowania jako cel badań przyjęto opracowanie, wdrożenie i przetestowanie w praktyce światłowodowego systemu monitorowania deformacji konstrukcji stadionu mieszczącego się w Warszawie przy ulicy Łazienkowskiej 3, należącego do WOSiR, a obecnie użytkowanego przez Klub Piłkarski "Legia". Uznano, że opracowanie i wdrożenie na Stadionie „Legii” nowoczesnego systemu monitorowania obciążeń i deformacji konstrukcji oraz wczesnego ostrzegania o ewentualnych rozwijających się zagrożeniach konstrukcyjnych będzie istotnym krokiem w upowszechnieniu nowych standardów bezpieczeństwa konstrukcji służących masowym imprezom sportowym i kulturalnym.

Stadion Legii jest nowoczesnym obiektem, który powstał na miejscu starego stadionu z 1930r. Zakończenie budowy i oficjalne otwarcie nowego stadionu nastąpiło wiosną 2011r. Stadion ma pojemność 31 103 miejsc siedzących, w tym 2137 miejsc dla prasy i VIP-ów. Przy trybunie północnej zlokalizowany jest dwukondygnacyjnym parking zaprojektowany na 797 miejsc parkingowych.

Stadion posiada zadaszenie w postaci membrany, rozpiętej na 28 stalowych dźwigarach w układzie kratownicowym, które posadowione są na żelbetowej konstrukcji - tzw. "ringu", znajdującym się bezpośrednio nad najwyższymi słupami, co ilustruje rys. 1.

Na podstawie opinii WOSiR i pracowników stadionu uznano, że największe obciążenia dynamiczne konstrukcji występują w elementach północnej trybuny stadionu, gdzie przebywają kibice Klubu znani jako "ultras". Sama trybuna nosi zwyczajowo nazwę "Żyleta". Ta część stadionu składa się z pięciu jednakowych sekcji trybun wspartych na 10 rzędach słupów żelbetowych i nakrytych wiotkim dachem rozpiętym na pięciu dźwigarach.



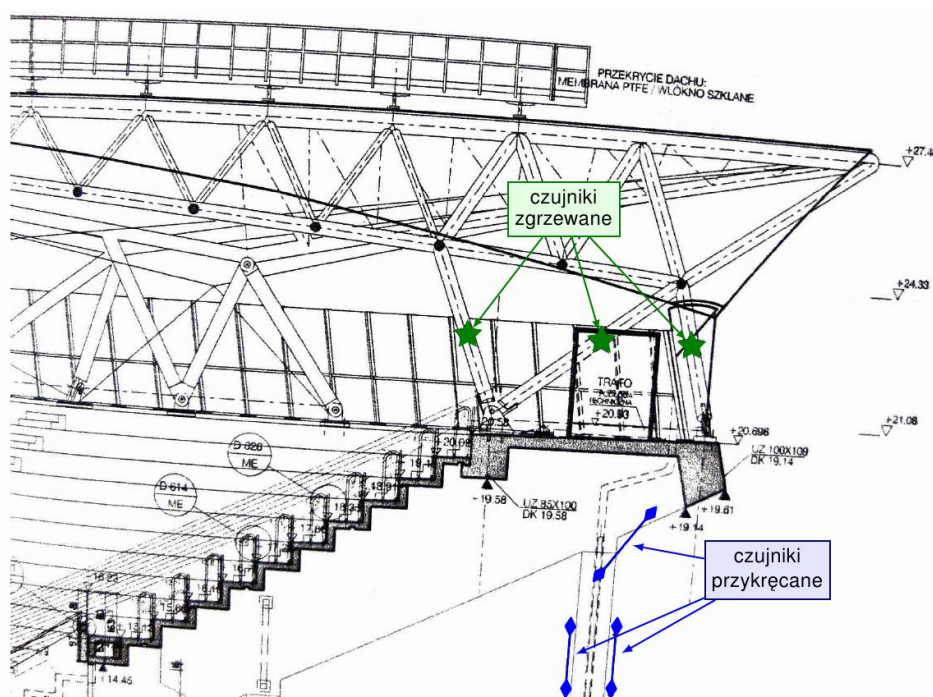
Rys.1. Widok północnej trybuny stadionu "Legii" od strony ul. Łazienkowskiej.

Do badań 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.

Zdecydowano się na pomiar odkształceń trzech nóg po zachodniej dźwigara, pomiar temperatury dźwigara oraz pomiar odkształceń osiowych i pochodzących od

zginania słupa podpierającego monitorowane nogi dźwigara i pomiar przemieszczeń wieńca stadionu względem tego słupa wraz z pomiarem temperatury słupa.

Wybór strony (zachodniej) dźwigara podyktowany był względnie łatwiejszym montażem kabli światłowodowych do konstrukcji z uwagi na usytuowanie szachtów instalacyjnych i przepustów. Zaprojektowany układ czujników pokazano na rys.2.



Rys.2. Rozmieszczenie czujników światłowodowych na dźwigarze i słupie.

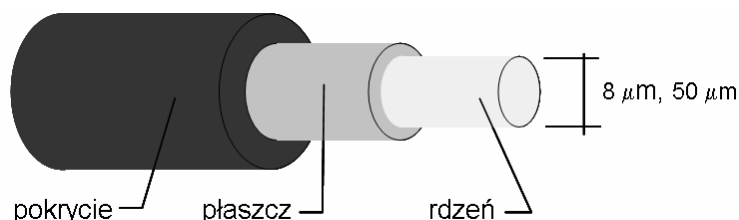
Przyjęta liczba i układ czujników pozwala na jednoczesne monitorowanie odkształceń dźwigara i wspierającej go żelbetowej konstrukcji, a umieszczenie punktów pomiarowych w tym samym przekroju pionowym pozwala na analizę czasową korelacji pomiędzy obciążeniami i odpowiedzią konstrukcji mimo faktu, że znany jest jedynie kierunek obciążenia (pionowe podskoki kibiców), bez znajomości jego wartości chwilowych.

Od strony inżyniersko-naukowej wybór rodzaju czujników uzależniony jest od wielkości mechanicznych, które mają być monitorowane i od scenariuszy pomiarowych związanych przede wszystkim z przewidywanym charakterem obciążeń (statycznym bądź dynamicznym), a co za tym idzie z częstotliwością pomiarów.

Istnieje kilka rodzajów czujników światłowodowych, które znalazły jako zasadę działania wykorzystują one różne zjawiska fizyczne towarzyszące propagacji światła w

światłowodach. W związku z tym różna jest budowa czujników, różne są sposoby pomiaru i różne stosowane analizatory sygnału optycznego.

Czujniki światłowodowe wytwarzane są ze światłowodów zbudowanych tak jak standardowe światłowody telekomunikacyjne. Ich budowę ukazuje rys. 3.



Rys. 3. Budowa światłowodu

Wspólną cechą wszystkich czujników światłowodowych jest odporność na zakłócenia elektromagnetyczne pochodzące od silników, nadajników radiowych i telewizyjnych, telefonów komórkowych, a nawet wyładowań towarzyszących uderzeniom piorunów. Drugą wspólną cechą jest brak zasilania elektrycznego, co eliminuje niebezpieczeństwo iskrzenia i umożliwia stosowanie tych czujników w strefach zagrożonych wybuchem. Trzecią wspólną cechą jest możliwość transmisji sygnału optycznego na duże odległości i umieszczenie analizatora sygnału w bezpiecznym miejscu z dala od strefy pomiaru.

Do monitorowania konstrukcji [1-4] stosuje się czujniki siatkowe Bragga (FBG – Fiber Bragg Grating), czujniki interferometryczne Fabry-Perot (EFPI – Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) i SOFO (Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques) oraz czujniki wykorzystujące rozproszenie Brillouina światła w światłowodzie (np. DiTeST – firmy SMARTEC, DTSS - firmy Sensornet).

Wymagania związane m.in. z koniecznością jednoczesnego prowadzenia statycznych i dynamicznych pomiarów odkształcenia i temperatury oraz konieczność montażu czujników do różnych rodzajów konstrukcji zadecydowały o wyborze czujników światłowodowych z siatką Bragga (FBG - Fibre Bragg Grating) oraz układu pomiarowego MuST (Multiplexed Strain and Temperature monitoring system). Do pomiaru odkształceń nóg dźwigara wybrano zgrzewane punktowo czujniki FBG o następujących parametrach:

Długość fali światła	1510 do 1590 nm
Zakres pomiarowy	$\pm 2000 \mu\epsilon$ (tzw. "microstrain" $1 \mu\epsilon = 1 \mu\text{m}/\text{m}$ )
Dokładność	$\pm 2 \mu\epsilon$
Rozdzielczość	$\pm 1 \mu\epsilon$
Czułość odkształceniowa (zmiana długości fali w funkcji odkształcenia)	$1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$
Czułość temperaturowa	$10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$
Temperatura pracy	od $-20^\circ\text{C}$ to $80^\circ\text{C}$
Dopuszczalna wilgotność względna	$< 90\%$ w $80^\circ\text{C}$
Obudowa czujnika o wymiarach 45 x	ze stali nierdzewnej, 15 x 0.3mm

Do pomiaru odkształceń słupa i przemieszczeń wieńca stadionu względem słupa wybrano przykręcane na powierzchni czujniki FBG o poniższych parametrach:

Długość czynna (baza pomiarowa)	1.5 m oraz 2 m
Wstępne napięcie włókna pomiarowego	0.5% długości czynnej
Zakres pomiarowy odkształceń	standardowy od $-2500 \mu\epsilon$ do $+3000 \mu\epsilon$ (dopuszczalny 0.5 % przy skróceniu, 0.75 % przy wydłużeniu)

Jako czytnik długości fali zastosowano MuST Dynamic model 200, bazujący na analizatorze firmy Micron Optics. Model ten pozwala na uzyskanie powtarzalności pomiaru i rozdzielczości 1pm przy zakresie pomiarowym długości fali od 1510 do 1590 nm. Analizator obsługuje 4 kanały pomiarowe przy częstotliwości 100Hz.

Czujniki światłowodowe do pomiaru odkształceń i temperatury nóg dźwigara zamontowane są fabrycznie do cienkich płytek ze stali nierdzewnej i odkształcają się

(termicznie lub mechanicznie) wraz z tymi płytkami. Dla poprawnego pomiaru odkształceń płytki czujników muszą być trwale związane z badanym elementem konstrukcji dźwigara. Zgodnie z wymaganiami producenta płytka czujnika powinna być zgrzana punktowo w kilkudziesięciu miejscach po obu stronach czujnika na całej swojej długości. Natomiast czujnik temperatury należy zgrzewać jedynie w kilku punktach tak, aby pracował niezależnie od deformacji elementu konstrukcji zmieniając wymiary swojej siatki Bragga jedynie pod wpływem temperatury.

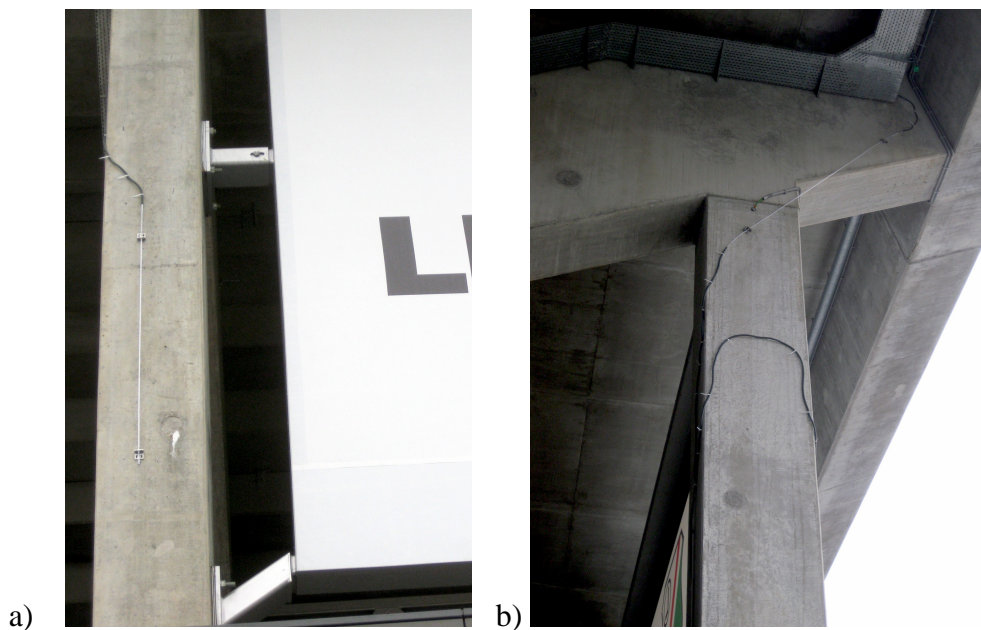
Dla potrzeb montażu czujników konieczne było opracowanie i wykonanie specjalnej zgrzewarki kondensatorowej umożliwiającej wykonywanie zgrzewów bardzo krótkimi impulsami (~20 ms) prądu o dużym natężeniu (~2700 A). Taka technologia montażu zabezpiecza czujniki przed uszkodzeniem na skutek przegrzania zapewniając jednocześnie zgodność deformacji elementu konstrukcji i zgrzanego do niego czujnika.

Zgrzany punktowo czujnik, po dodatkowym zabezpieczeniu masą silikonową, przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Zgrzany punktowo czujnik odkształceń nogi dźwigara.

Rys. 5. ukazuje czujnik odkształceń na słupie stadionu i czujnik przemieszczeń zamocowany do słupa i wieńca stadionu.



Rys. 5. Czujnik odkształceń na słupie stadionu (a) oraz czujnik wzajemnych przemieszczeń wieńca (b)

Tak jak podkreślono na wstępie najciekawszym naukowo aspektem badań, obok aspektów ekonomicznych, pomiarowych i wdrożeniowych, jest poznanie zachowania konstrukcji w warunkach obciążeń naturalnych wykraczających poza obciążenia statyczne objęte obowiązkiem modelowania i obliczeń na etapie projektowania konstrukcji. Podjęte badania naukowe mają na celu przeanalizowanie wpływu zachowania tłumy na bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji oraz dostarczyć danych pomiarowych potrzebnych dla rozwoju nowych metod numerycznych identyfikacji powstawania i rozwoju defektowa poprzez analizę odwrotną.

Zdecydowano się na prowadzenie równoległe pomiarów statycznych i dynamicznych. Pomiary statyczne prowadzone są co godzinę przez całą dobę dostarczając łącznie ponad 700 wyników w miesiącu dla każdego z dziesięciu zainstalowanych czujników. Pomiary te nie odbiegają od powszechnie stosowanych sposobów długofalowego monitorowania konstrukcji. Ich celem jest uzyskanie charakterystyk deformacji temperaturowych konstrukcji i wyznaczanie trendów deformacji.

Wiedza ta stanowi podstawę do analizowania 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 jak usuwanie śniegu lub zamknięcie części obiektu.

Pomiary dynamiczne prowadzone są krótkookresowo w celu wyznaczenia charakterystyk dynamicznych konstrukcji pod wpływem obciążeń środowiskowych (np. wiatru, ruchu pojazdów na ul. Łazienkowskiej). Są to pomiary referencyjne niezbędne dla uchwycenia różnic w zachowaniu konstrukcji pojawiających się pod wpływem zachowania tłumu. W tym celu pomiary dynamiczne należy przeprowadzić również podczas masowej imprezy sportowej, najlepiej podczas meczu. Porównanie pomiarów podczas meczu i dynamicznych pomiarów referencyjnych stanowi podstawę analizy wpływu zachowania tłumu na pracę i bezpieczeństwo konstrukcji.

### **Literatura**

1. Skłodowski M., Współczesny monitoring obiektów budowlanych, PRZEGLĄD BUDOWLANY, 3, 37-46, 2009
2. Gliścić B., Inaudi D., 2007. Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, England, ISBN 978-0470-06142-8.
3. Graver Th., Inaudi D., Doornink J. 2005. Growing Market Acceptance for Fiber-Optic Solutions in Civil Structures. SPIE, Optics East Conference, Boston, USA, October 23-26, 2005. Volume 5589, pp. 44-55, (2004).
4. Branko Glisic, Daniele Inaudi, Lau Joo Ming, Yap Tiem Yew, Ng Chun Tat, 2007. Large Scale Lifespan Monitoring of High-Rise Buildings Using Long-Gage Fiber Optic Sensors OPTIC SENSORS The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure - SHMII-3, November 13-16, 2007

Badania zostały sfinansowane w ramach Projektu Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena jej Żywotności (MONIT), POIG.01.01.02-00-013/08-00, 2009-2012 (projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego), projektu FP7 EU Smart-Nest (PIAPP-GA-2011-28499) oraz ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC- 2012/05/B/ST8/02971.