

MONITORING KONSTRUKCJI STALOWYCH

Część 3

Metody pomiarowe – pomiary odkształceń



dr inż. Stanisław Wierzbicki
Instytut Inżynierii Budowlanej,
Wydział Inżynierii Lądowej,
Politechnika Warszawska

Pomiary odkształceń pozwalają uzyskać lokalne informacje o zmianach w konkretnych miejscach – jak pokazuje praktyka, są one jednak trudniejsze w interpretacji, a co za tym idzie, prawidłowa ocena tych wyników nastręcza pewnych trudności.

Podobnie jak w przypadku przemieszczeń, w systemach monitoringu konstrukcji budowlanych często mamy do czynienia z pomiarami odkształceń. Generalnie 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.

Tensometry strunowe

Jednym z najbardziej popularnych i najczęściej stosowanych w monitoringu konstrukcji rozwiązań są tensometry strunowe – rys. 1 [M2], w których podstawowym elementem pomiarowym jest napięta struna. Odkształcenia/naprężenia określone są na podstawie częstotliwości drgań struny, a pomiar polega na chwilowym wzbudzeniu do drgań struny i pomiarzeniu częstotliwości jej drgań ustalonych.

Tensometry strunowe często stosowane są do prowadzenia wieloletnich pomiarów w automatycznych systemach monitorowania. Czujniki te umożliwiają pomiar z rozdzielczością rzędu 1 μm i dokładnością 1 promila zakresu pomiarowego, a mogą być wykorzystywane w temperaturach -20 do $+80^\circ\text{C}$: Zamknięcie czujników w obudowie sprawia, że są one niewrażliwe na warunki zewnętrzne i wiele zakłóceń. Zwykle układ pomiarowy jest wyposażony też w czujnik temperatury, mający na celu kompensację odkształceń termicznych w badanym elemencie konstrukcji. Tensometry strunowe oprócz zalet mają też wady. Są one relatywnie duże, co w przypadku montażu wewnątrz konstrukcji (np. żelbetowej) powoduje duże zakłócenie rozkładu odkształcenia i naprężenia wokół czujnika. Ponadto są one oddalone od powierzchni monitorowanego elementu

konstrukcji o około 1-2 cm, co skutkuje przesunięciem wielkości mierzonej w stosunku do rzeczywistej. Zasilanie elektryczne czujników i doprowadzenie/odbiór sygnału wiąże się z koniecznością okablowania. Pomimo tego są one z powodzeniem stosowane do długotrwałego monitoringu odkształceń w konstrukcjach, zarówno stalowych, jak i żelbetowych.

Tensometry elektrooporowe

Kolejna grupa czujników wykorzystywanych do pomiaru odkształceń w systemach monitoringu to tensometry elektrooporowe – rys. 2 [M3, M1] – w których wykorzystywane jest zjawisko zmiany oporu elektrycznego drutu na skutek zmiany jego długości (odkształcenia). Tensometry takie charakteryzują się dużą dokładnością, a co za tym idzie, możliwością pomiaru bardzo małych odkształceń. W przenoszeniu odkształceń 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, wykonaną z materiału o małej oporności właściwej. 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. Nadaje się do stosowania przy obciążeniach statycznych i dynamicznych oraz do elementów znajdujących się w ruchu. Tensometry 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 (chromoniel albo karma) lub platyny i wolframu, jak również niklu i żelaza.

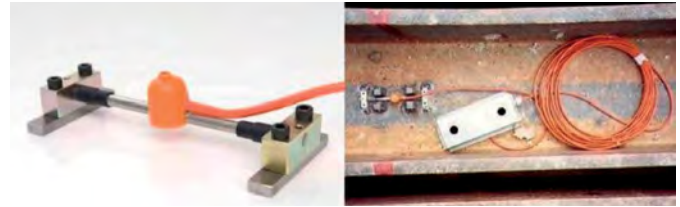
Tensometry oporowe są stosunkowo często stosowanym typem czujników – można znaleźć przykłady zastosowania takich tensometrów do pomiarów w okresie nawet 10-20 lat. W takich aplikacjach niezwykle ważny jest sposób mocowania tensometrów do konstrukcji, ich obudowa oraz połączenia przewodów zasilająco-sygnalowych – znaczna część tensometrów ulega awarii w dłuższym okresie właśnie z tych względów.

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 tzw. czujniki rozproszone opar-

te na optycznych technikach rozpraszania Rayleigha, Ramana i Brillouina.

Interferometr Fabry'ego-Perota składa się z dwóch równoległych lusterek 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 co za tym idzie,



Rys. 1. Tensometr strunowy [M2]



Rys. 2. Tensometry elektrooporowe [M3, M1]

REKLAMA



XIV KONGRES
POLSKIEJ IZBY
KONSTRUKCJI
STALOWYCH

ZAPROSZENIE

Polska Izba Konstrukcji Stalowych
zaprasza

w dniach 11–12 października 2016 r.

do Centrum Konferencyjnego Holiday Inn, Warszawa – Józefów, ul. Telimeny 1

na

KONGRES

pt. „EKSPANSJA ZAGRANICZNA PRZEDSIĘBIORSTW
POLSKIEJ BRANŻY KONSTRUKCJI STALOWYCH I BUDOWNICTWA”

Partnerzy Kongresu



Patroni medialni



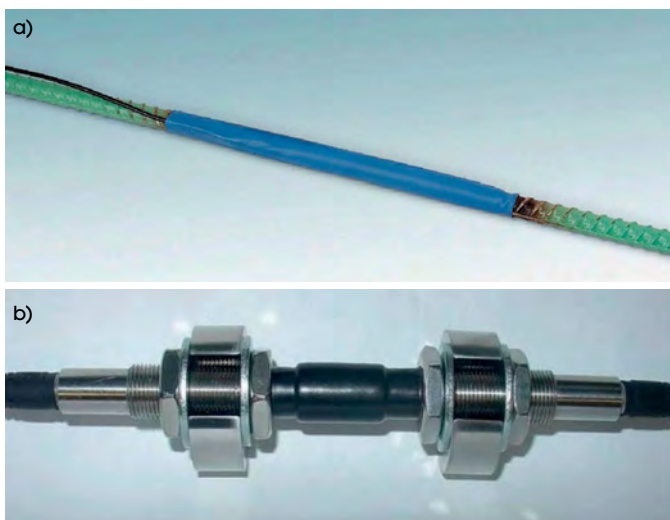
Program Kongresu PIKS

11.10.2016 r. (wtorek)

- 10⁰⁰–10⁴⁵ ● Rejestracja uczestników
- 11⁰⁰–11¹⁰ ● Powitanie i otwarcie Kongresu
Tadeusz Rybak – Prezes Izby
- 11¹⁰–11⁴⁰ ● Wystąpienie wprowadzające
Radosław Domagański-Labędzki – Podsekretarz Stanu – **Ministerstwo Rozwoju**
- 11⁴⁰–12³⁰ ● Strategie rozwoju przedsiębiorstw w wymiarze międzynarodowym
Michał Trojanowski – Dyrektor Rozwoju Biznesu – **ICAN Institute**
- 12³⁰–13⁰⁰ ● Różnice kulturowe w biznesie. Czyli jak skutecznie komunikować się z partnerami zagranicznymi
Jacek Stryczyński – Prezes Zarządu – **Lionbridge Poland & Slovakia**
Anna Domagała – Prezes Zarządu – **Nomax Trading**
- 13⁰⁰–13³⁰ ● Polski Klaster Eksporterów Budownictwa – prezentacja idei klastra
Tomasz Szuba – Prezes Zarządu – **TINES CAPITAL GROUP ISC**
- 13³⁰–13⁴⁵ ● Przerwa kawowa
- 13⁴⁵–14³⁰ ● Panel dyskusyjny I
„Jak zbudować strategię rozwoju przedsiębiorstwa na rynkach zagranicznych”
◀ Rafał Lipiński – Wiceprezes Zarządu – **Polski Klaster Eksporterów Budownictwa**
◀ Michał Woźniczka – Wiceprezes Zarządu – **ENERGOPROJEKT-KATOWICE S.A.**
◀ Michał Trojanowski – Dyrektor Rozwoju Biznesu – **ICAN Institute**
◀ Jacek Stryczyński – Prezes Zarządu – **LionBridge Poland & Slovakia**
◀ Przemysław Trawa – Prezes Zarządu – **MTP sp. z o.o.**
◀ Andrzej Mochoń – Prezes Zarządu – **Targi Kielce S.A.**
- 14³⁰–15¹⁵ ● Panel dyskusyjny II
„Gdzie i jak skutecznie prowadzić ekspansję zagraniczną branży – kodeks najlepszych praktyk”
◀ Paweł Borys – Prezes Zarządu – **Polski Fundusz Rozwoju S.A.**
◀ Piotr Stolarczyk – Wiceprezes Zarządu – **KUKE**
◀ Jacek Szugajew – Wiceprezes Zarządu – **BGK**
◀ Bartłomiej Pawlak – p.o. Prezesa Zarządu – **PAIZ**
◀ Ryszard Matyka – Prezes Zarządu – **VISTAL GDYNIA S.A.**
◀ Leszek Marek Gołąbicki – Prezes Zarządu – **UNIBEP S.A.**
◀ Piotr Kledzik – Prezes Zarządu – **PORR Polska S.A.**
◀ Krzysztof Burek – Wiceprezes Zarządu – **RAFAKO S.A.**
- 15¹⁵–16⁰⁰ ● Podsumowanie i zamknięcie Kongresu
- 16⁰⁰ ● Obiad
- 20⁰⁰ ● Uroczysta Gala – Sponsor Gali – **ZinkPower Szczecin sp. z o.o.**

12.10.2016 r. (środa)

- 8⁰⁰–9⁰⁰ ● Śniadanie
- 9³⁰–10³⁰ ● Wyjazd



Rys. 3. Czujniki światłowodowe: a) czujnik FP [M1], b) czujnik FBG [1]

także jego deformacji podłużnej. Czujniki tego typu są stosowane np. do pomiaru sił naciągu lin.

Światłowodowa 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 długości fali są przepuszczane. Siatka Bragga (FBG) jest obecnie jednym z najszerzej stosowanych urządzeń optycznych, w których zmiany temperatury albo odkształcenie światłowodu skutkuje 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 FBG w niektórych zastosowaniach są alternatywą dla czujników elektrooporowych. Ponieważ zamiast przewodów elektrycznych (miedzianych) stosuje się światłowody szklane, to czujniki 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 czujników FBG, co przyczynia się do zmniejszenia całego systemu pomiarowego. Czujniki FBG do pomiaru odkształceń, o standardowych długościach 1-10mm, charakteryzują się czułością i rozdzielczością rzędu 1 μm . Mogą one pracować w zakresach temperatur przekraczających typowe warunki środowiskowe. Przykładowe czujniki światłowodowe przedstawiono na rys. 3 [M1, 1].

Czynniki wpływające na wiarygodność pomiarów

Wykorzystywanie pomiarów odkształceń w systemach monitoringu wiąże się z pewnymi zagadnieniami dotyczącymi wiarygodności tych pomiarów. Pierwsza kwestia to dobór odpowiedniego elementu konstrukcji i miejsca pomiaru. Ponieważ czujniki odkształceń muszą być bardzo dokładnie połączone z monitorowanymi elementami, 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 stabilność 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. 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 zacho-

waniem się elementów, jak np. skręcanie dźwigarów, nierównomierne obciążenie sąsiadujących elementów, 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, 1-2 centymetrowej odległości od monitorowanej powierzchni czujników strunowych, często stosowanych w systemach monitoringu. Powyższe 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. Z doświadczeń z systemami monitoringu bazującymi na pomiarach odkształceń wynika, że występują problemy z interpretacją wyników pomiarów i ich wiarygodnością. W przypadku czujników odkształceń istotne znaczenie ma też temperatura, tu jednak problem jest częściowo rozwiązany przez producentów czujników – w przypadku najczęściej stosowanych rozwiązań, stosowane są wbudowane kompensacje temperatury.

Czujniki odkształceń muszą być bardzo dokładnie połączone z monitorowanymi elementami, 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 aspektu na wyniki pomiarów wymaga praktycznie 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. Wpływ tej niejednorodności na wyniki pomiarów odkształceń jest znaczący w przypadku konstrukcji o silnych ograniczeniach swobody odkształceń, szczególnie narażonych na znaczne zmiany temperatury – w przypadku typowych konstrukcji budowlanych, ramowych i kratownicowych jest on praktycznie pomijalny. ■

Abstract. Monitoring of steel structures. The whole series (Monitoring of steel structures – Builder July 2016 – January 2017) describes the topic of construction design technical monitoring, including the expected results of their use, its formal and legal conditions, as well as the advantages of it. A brief overview of the measuring methods used in the monitoring systems has been described, along with the technical possibilities of their application, as well as general rules of designing monitoring systems, solutions and method adjustment to the type and complexity of a building's construction. The choice of elements and places to be monitored has been presented, as well as system configuration tips. The problem has been illustrated by construction design monitoring system examples.

Keywords: monitoring, measurement systems and devices, construction design, steel structures

Bibliografia

[1] Malysa K., Innowacyjne systemy monitoringu odkształceń i temperatury oparte o czujniki światłowodowe, docplayer.pl (dostęp 01.2016).

Materiały informacyjne ze stron internetowych

[M1] www.geokon.com (dostęp 01.2016)

[M2] www.soldatagroup.com (pl.soldatagroup.com, dostęp 01.2016)

[M3] www.tenmex.pl (dostęp 01.2016)

W przygotowaniu niektórych fragmentów cyklu wykorzystano wyniki badań zrealizowanych w projekcie MONIT, w zakresie monitoringu konstrukcji obiektów kubaturowych – www.monit.pw.edu.pl