

# SYSTEMY MONITOROWANIA

## konstrukcji sprężonych

**dr inż. Rafał Sieńko,**  
**mgr inż. Tomasz Howiacki**  
Politechnika Krakowska  
**dr inż. Łukasz Bednarski**  
Akademia Górniczo-Hutnicza AGH  
w Krakowie

Technologię sprężania wykorzystuje się przede wszystkim w elementach o dużych rozpiętościach, przenoszących znaczne obciążenia, których konsekwencje zniszczenia byłyby bardzo duże. Dlatego istotne jest, aby proces projektowania, wznoszenia oraz późniejszej eksploatacji takich obiektów był odpowiednio kontrolowany.



Fot. arch. DSI

W Polsce od 2009 r. instalowanie systemów monitorowania konstrukcji na określonych obiektach inżynierskich wynika nie tylko ze świadomości uczestników procesu budowlanego, lecz także z konieczności spełnienia wymogów prawa budowlanego.

Procedury obliczeniowe zamieszczone w normach pozwalają na bezpieczne projektowanie, jednak nie dostarczają pełnej wiedzy na temat pracy konstrukcji w rzeczywistych warunkach użytkowania. Taką wiedzę można pozyskać, interpretując wyniki pomiarów wykonanych za pomocą systemów monitorowania konstrukcji. W artykule przedstawiono przegląd sposobów monitorowania pracy elementów sprężonych na przykładzie wybranych systemów zrealizowanych na różnego typu obiektach w Polsce.

## Idea sprężania

Według prof. Olszaka zastosowanie w inżynierii lądowej konstrukcji sprężonych „znamionuje niewątpliwie wyższy stopień opanowania sił przyrody przez technikę” [1]. Sprężane są przede wszystkim konstrukcje i elementy o bardzo dużych rozpiętościach, przenoszące znaczne obciążenia, których konsekwencje zniszczenia byłyby bardzo duże. Współcześnie praktycznie każda wielkogabarytowa konstrukcja o niestandardowej geometrii (mosty, stadiony, fundamenty, zadaszenia, stropy) wykorzystuje zalety sprężania.

Pojęcie sprężania w pracy [2] zostało zdefiniowane jako „wprowadzenie do konstrukcji wstępnego układu sił wewnętrznych, który tak przeciwdziała niebezpiecznemu układowi sił od obciążeń zewnętrznych, że łączne działanie tych układów konstrukcja przeniesie bezpiecznie”. Można zatem powiedzieć, że projektowanie sprężenia to proces świadomej ingerencji projektanta w stan naprężeń występujący w konstrukcji. Najczęściej ingerencja ta odbywa się na skutek naciągu stalowych cięgien z określoną siłą, wzdłuż szczegółowo zaplanowanej trasy.

Współcześnie, mówiąc o konstrukcjach sprężonych, zazwyczaj mamy na myśli konstrukcje wykonane z betonu, w których trasy kablowe prowadzi się wewnątrz elementu lub poza przekrojem za pomocą dewiatorów. Jednak technika sprężania z powodzeniem stosowana jest także w konstrukcjach stalowych, drewnianych i innych. W świetle przedstawionej definicji do konstrukcji sprężonych należy zaliczyć także różnego rodzaju układy cięgnowe, np. linowe przekrycia obiektów inżynierskich (hale sportowe, amfiteatry, inne), a także mosty podwieszane i wiszące, w których siła w wantach została odpowiednio wyregulowana.

## Bezpieczeństwo pracy konstrukcji

Procedury obliczeniowe przedstawione w obecnych normach, np. [3], pozwalają na bezpieczne projektowanie konstrukcji sprężonych, jednak nie dostarczają pełnej wiedzy na temat ich pracy w rzeczywistych warunkach użytkowania. Na etapie projektu nie jest możliwe uwzględnienie całej złożoności materii i zjawisk, które zachodzą nie tylko w trakcie naciągu kabli, lecz także w czasie późniejszej eksploatacji konstrukcji. Ponadto w obliczeniach często przyjmuje się wiele uproszczeń, idealizacji i założeń, związanych m.in. z jednorodnością materiałów, brakiem imperfekcji geometrycznych, warunkami podparcia, wielkością poślizgu cięgna w zakotwieniu oraz zjawiskami reologicznymi (stała wilgotność, stałe obciążenie, itp.). Prowadzona analiza, choć poparta doświadczeniem z praktycznych realizacji, jest tylko analizą teoretyczną.

Pełniejszą wiedzę na temat pracy konstrukcji sprężonych można zdobyć, interpretując wyniki pomiarów prowadzonych w warunkach in situ przez długi okres czasu.

Konstrukcjom sprężonym zarzucało – a niektórzy wciąż zarzucają – że przez podatność stali sprężającej na korozję oraz niewielkie przekroje drutów w cięgnach sprężających są one niebezpieczne, gdyż zbyt późno „informują” przez zarysowania i ugięcia o swoim przeciążeniu. Dziś stosowane stale charakteryzują się znacznie lepszymi właściwościami (zależność  $\sigma - \epsilon$ ), a w procesie projektowania celowo ograniczamy dopuszczalne naprężenia w cięgnach, by uszkodzenie proporcjonalnie niewielkiej liczby splotów nie spowodowało awarii konstrukcji. Proces projektowania opiera się jednak na teorii prawdopodobieństwa, zgodnie z którą ekonomicznie nieuzasadnione jest projektowanie konstrukcji, które zabezpieczone byłyby przed wszystkimi możliwymi nie-

pownościami związanymi z charakterystykami materiałów, błędami projektowymi, wykonawczymi, niewłaściwą eksploatacją, czy niedoszacowanymi lub nieprzewidywanymi oddziaływaniami. Ze względów bezpieczeństwa brak wiedzy o tych ukrytych niewiadomych, bezpośrednio związanych ze stanem technicznym konstrukcji, jest bardzo niepożądany. Dążymy zatem obecnie do poszukiwania rozwiązań, które umożliwiłyby nam w trakcie całego okresu eksploatacji obiektu (ale również w trakcie budowy) udzielanie obiektywnej odpowiedzi o stopniu bezpieczeństwa konstrukcji.

## Systemy monitorowania

Współcześnie dynamicznie rozwijającą się na świecie (w Polsce od kilku lat) dziedziną inżynierii lądowej są systemy monitorowania konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring SHM). Do podstawowych zadań monitoringu inżynierskiego zaliczyć należy zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji poprzez ciągłe pomiary wybranych wielkości fizycznych, istotnych z punktu widzenia pracy konstrukcji, oraz wdrożenie procedur ostrzegania i postępowania w przypadku przekroczenia tzw. wartości alarmowych. Należy podkreślić, że stosowanie systemów monitorowania nie umniejsza roli człowieka (eksperta) w orzekaniu o stanie technicznym obiektu, a jedynie ułatwia podjęcie decyzji poprzez dostarczenie istotnych informacji na temat pracy konstrukcji.

Kolejnym zadaniem takich systemów jest gromadzenie, przetwarzanie i interpretowanie bardzo dużej liczby danych pod kątem weryfikacji poprawności założeń przyjętych na etapie projektowania. Ma to istotne znaczenie dla celów naukowych – dzięki tym obserwacjom możliwe będzie korygowanie procedur obliczeniowych, wytycznych normowych itp. Dane mogą posłużyć również projektantowi podczas stosowania tzw. „obserwacyjnej” metody projektowania [Eurokod 7], umożliwiając

REKLAMA

## www.dywidag-systems.pl



### TECHNIKI SPRĘŻANIA I PODWIEŻEŃ:

- cięgnowe systemy sprężania z wykorzystaniem: splotów, drutów, prętów – montaż na budowie lub prefabrykowane
- systemy podwieszeń ze splotów równoległych: DYNA Grip® i DYNA Bond®, monitoring DYNA Force
- zastosowania: obiekty mostowe, zbiorniki, stropy, płyty fundamentowe, dachy cięgnowe, maszty
- technika urządzeń: urządzenia hydrauliczne, heavy lifting

### GEOTECHNIKA

- kotwy gruntowe: linowe, prętowe, samowierzące
- gwoździe gruntowe i skalne: prętowe, samowierzące
- mikropale: prętowe, samowierzące, rury z żeliwa ciągliwego
- ściagi: prętowe, linowe GEWI®, THREADBAR®, DYWI® Drill

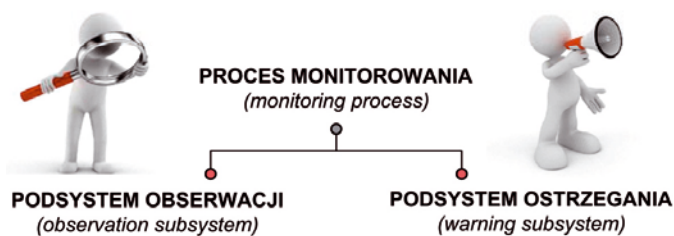


### NOWOŚĆ System monitorowania sił w cięgnach DYNA Force®

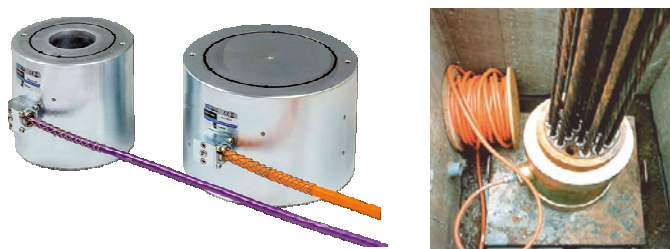


DYWIDAG-Systems International Sp. z o.o.  
41-506 Chorzów  
ul. Bojowników o Wolność i Demokrację 38/121  
tel.: +48 32 241 09 98, + 48 58 300 13 53  
e-mail: DSI-Polska@dywidag-systems.com

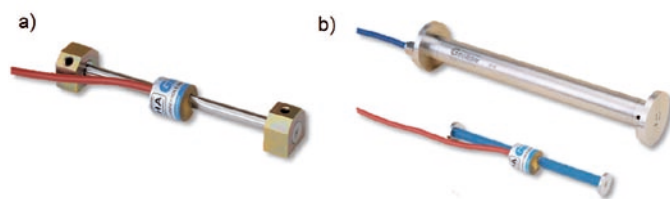




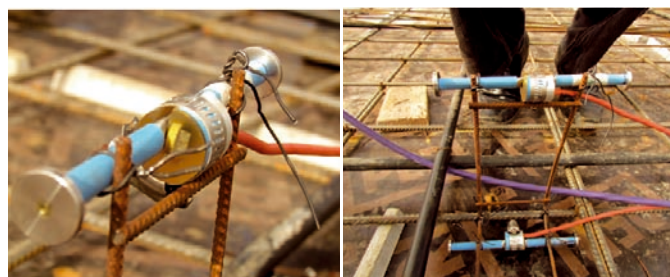
Rys. 1. Struktura procesu monitorowania [4]



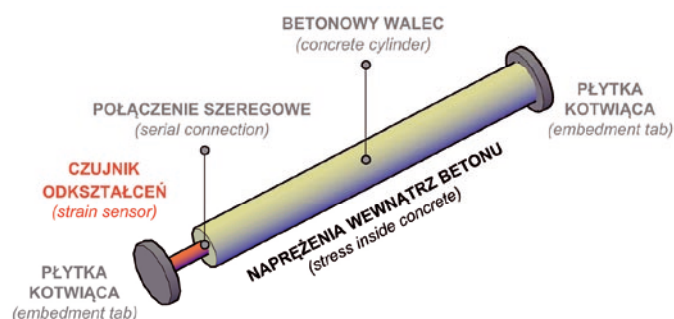
Rys. 2. Przykładowe siłomierze strunowe (po lewej) oraz zastosowanie w praktyce [7]



Rys. 3. a) Strunowy czujnik odkształceń na powierzchni betonu; b) Strunowe czujniki odkształceń przeznaczone do zatopienia wewnątrz betonu [7]



Rys. 4. Widok strunowych czujników odkształceń w dwukierunkowo sprężonej płycie przygotowanej do zabetonowania.



Rys. 5. Konstrukcja czujnika do pomiaru „naprężeń” w betonie

modyfikację rozwiązań na podstawie kontroli odpowiedzi konstrukcji na przykładane doń oddziaływania podczas jej wznoszenia. Mogą być także wykorzystywane jako wskazówki w przypadku realizacji analogicznych obiektów w przyszłości.

Objęcie monitoringiem inżynierskim konstrukcji sprężonych, ze względu na ich często skomplikowaną pracę i proces wznoszenia, a także zazwyczaj bardzo duże konsekwencje zniszczenia, jest dzisiaj zalecane. Tym bardziej, że zachowanie się takich konstrukcji istotnie zmienia się w czasie ze względu m.in. na przyrost strat siły sprężającej związanej z reologią betonu (pełzanie, skurcz) oraz stali (relaksacja).

Podstawową wadą klasycznej diagnostyki konstrukcji sprężonych (i nie tylko), polegającej na okresowych przeglądach, jest stosunkowo długi czas pomiędzy kolejnymi kontrolami oraz konieczność dostępu do konstrukcji w celu jej wizualnego oglądu lub pobrania próbek (często dostęp do elementów konstrukcji jest technicznie utrudniony) [5]. Po zainstalowaniu czujników jako komponentów systemu monitorowania, pomiary realizowane są bezobsługowo (bez bezpośredniego udziału człowieka) oraz, co ważne, konstrukcja analizowana jest w sposób ciągły z inżynierskiego punktu widzenia (tzn. pomiary mogą być wykonywane co kilka minut lub nawet, w przypadku analiz dynamicznych, co kilka tysięcznych sekundy).

Warto podkreślić, że w Polsce od 2009 r. instalowanie systemów monitorowania konstrukcji na określonych obiektach inżynierskich wynika już nie tylko z odpowiedniej świadomości uczestników procesu budowlanego, lecz także z konieczności spełnienia wymogów prawa budowlanego [6].

## Monitorowanie sprężonych konstrukcji z betonu

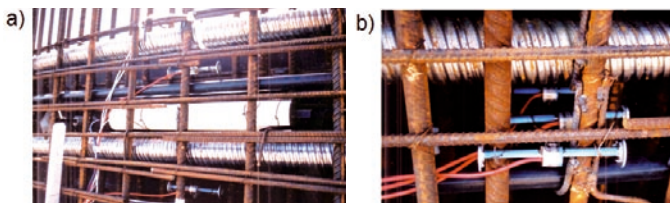
Kontrola betonowych konstrukcji sprężonych rozpoczyna się właściwie w momencie naciągu kabli. Istnieje kilka sposobów monitorowania tego procesu, jednak najczęściej korzysta się z pomiaru poślizgu ciężna w zakotwieniu oraz kontroli siły sprężającej poprzez pomiar ciśnienia hydraulicznego w prasie naciągowej. Gdy planowana jest długoterminowa kontrola siły, można pomiędzy czołem elementu a zakotwieniem, zainstalować siłomierze, które będą stanowić część docelowego systemu monitorowania. Takie rozwiązanie jest oczywiście przydatne w ocenie pracy konstrukcji kablobetonowych z ciężnami bez przycepnosci.

W takcie eksploatacji konstrukcji sprężonych ich praca może być monitorowana przy pomocy powierzchniowych czujników odkształceń, stosowanych powszechnie w różnego rodzaju konstrukcjach betonowych i żelbetonowych. Ciekawym rozwiązaniem może być także pomiar odkształceń wewnątrz betonu (rys. 3b).

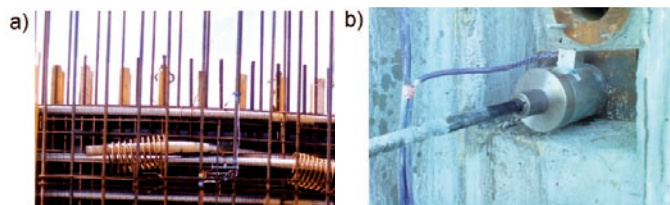
Na rysunku 4 przedstawiono czujniki odkształceń wewnątrz betonu, zainstalowane w ramach systemu monitorowania konstrukcji w obrębie dwukierunkowo sprężonej płyty stropowej. Czujniki zostały zamontowane w taki sposób, aby móc analizować odkształcenia zarówno przy dolnej, jak i górnej krawędzi płyty.

Wnioskowanie o stanie naprężeń w przekroju na podstawie zmierzonych wartości odkształceń jest słuszne w przypadku elementów stalo-

Na Politechnice Krakowskiej trwają prace nad zastosowaniem ciągłych czujników światłowodowych realizujących pomiar odkształceń wzdłuż całej swej długości (więcej w cz. 2 w numerze wrześniowym „Buildera”). Być może w przyszłości będzie możliwa analiza rzeczywistego rozkładu siły sprężającej na długości ciężna sprężającego (analiza strat siły sprężającej od momentu naciągu przez kilkadziesiąt lat).



Rys. 6. a) czujniki „naprężeń” i odkształceń na kierunku równoległym do trasy kablowej; b) czujniki odkształceń na kierunku równoległym do trasy kablowej



Rys. 7. a) czujniki odkształceń w strefie zakotwień cięgien sprężających; b) siłomierz do pomiaru siły w cięgnię

wych. Stal charakteryzuje się wysoką jednorodnością, a więc jej moduł sprężystości może być przyjmowany z dużą dokładnością. Ponadto jego wartość nie zmienia się istotnie w czasie. W przypadku konstrukcji betonowych efektywny moduł sprężystości zmniejsza swoją wartość wraz z upływem czasu, przede wszystkim na skutek procesu pełzania betonu [8]. Zjawisko to jest szczególnie istotne w konstrukcjach sprężonych, ze względu na występowanie dużych naprężeń ściskających związanych z wprowadzeniem siły sprężającej.

Ponadto, na wartość efektywnego modułu sprężystości w betonowych konstrukcjach sprężonych ma wpływ wiek betonu w momencie sprężenia, wartość siły sprężającej, klasa betonu, rodzaj zastosowanego kruszywa, cementu i innych składników, kształt przekroju poprzecznego elementu, warunki eksploatacji (np. wilgotność i temperatura) oraz inne. Dlatego zasadne jest prowadzenie pomiarów „naprężeń” w betonie równoległe do pomiarów odkształceń. Pomiar „naprężeń” jest możliwy wyłącznie pośrednio, poprzez zmierzenie odkształceń stalowej rurki połączonej szeregowo z betonowym walcem o znanych przekroju poprzecznym i długości. Walec ten wyodrębniony jest z konstrukcji za pomocą porowatej rury, co zapewnia, że badany beton ma dokładnie takie same właściwości jak pozostała część konstrukcji. Siła wyznaczona na podstawie odkształceń elementu stalowego (czujnik wykalibrowany jest jako siłomierz) podzielona przez pole powierzchni betonowego walca daje poszukiwaną wartość naprężeń. Zasadę działania takiego czujnika przedstawiono na rysunku 5.

Znając zmiany wartości odkształceń oraz naprężeń w czasie, można wyznaczyć zmiany efektywnego modułu sprężystości, uwzględniającego wpływ pełzania. Badania takie są szczególnie istotne z punktu widzenia analizy zjawisk reologicznych (związanych ze stratami siły sprężającej) w przekroju elementu sprężonego. Oszacowanie zmiany modułu sprężystości betonu (a w zasadzie elementu konstrukcji złożonej z betonu i stali) w czasie umożliwi określenie zmian w rozkładzie sił przekrojowych w konstrukcji oraz zmian jej geometrii (przemieszczenia).

Systemami monitorowania obejmowane są często betonowe, sprężane zbiorniki. Na rys. 6 i 7 przedstawiono komponenty systemu monitorowania konstrukcji dla cylindrycznego zbiornika na ścieki. W analizowanym obiekcie prowadzony jest pomiar odkształceń i naprężeń na kierunku równoległym do tras kablowych, odkształceń w strefie zakotwień (w obrębie pilastra), a także pomiar siły w cięgniach sprężających. W tego typu konstrukcjach istotne jest również obserwowanie zmian temperatur ścian zbiornika w celu analizy procesu generowania się naprężeń w młodym betonie oraz późniejszych wniosków dotyczących wyężenia konstrukcji. ■

## Literatura

- [1] Olszak W., Teoria Konstrukcji Sprężonych, PWN, Warszawa, 1961.
- [2] Ajdukiewicz A., Mames J., Konstrukcje z betonu sprężonego, „Polski Cement”, Kraków, 2004.
- [3] Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1:2004. European Committee for Standardization., Brussels, 2004.
- [4] Instrukcja 443/2009, System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie, Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych, ITB, Warszawa, 2009.
- [5] Sieńko R., Konstrukcje kabloneonowe, Wykład na XXV Ogólnopolskich Warsztatach Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk, 10-13 marca 2010.
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2009 nr 56 poz. 46).
- [7] www.geokon.com.
- [8] Bednarski Ł., Sieńko R., Howiacki T., Oszacowanie wartości i zmienności modułu sprężystości betonu w istniejącej konstrukcji na podstawie pomiarów in situ, Cement Wapno Beton, 6/2014.

**Abstract. STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS FOR PRESTRESSED STRUCTURES.** *Prestressing technology is primarily used for a large-span elements, carrying heavy loads, which failure consequences would be very substantial. Thus, it is essential to control adequately the process of designing, erecting and further operating of such kind of objects. Computational procedures, presented in the standards, allow for the safe design, but do not provide the full knowledge about structure's work in its real conditions of use. This knowledge could be acquired by interpreting the results of measurements made by structural health monitoring systems. This article presents an overview of the most important ways to monitor the work of prestressed elements based on selected systems implemented in different types of objects in Poland.*

**Keywords:** structural health monitoring, prestressed structures.

REKLAMA

REKLAMA



**CG Structural Consulting**

- Profesjonalne doradztwo techniczne
- Zaawansowane obliczenia MES
- Złożone modele obliczeniowe




LUSAS

Oficjalny dystrybutor Lusas FEA Ltd.

- Eurokody, PN i AASHTO
- Fazy montażu, etapy wznoszenia i budowy
- Optymalizacja obciążenia pojazdami



30-732 Kraków, ul. Biskupińska 2  
tel. 501183666, 698715469

[www.cgsc.pl](http://www.cgsc.pl)