

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG^{1*)}

mgr inż. Mikołaj Binczyk¹⁾

mgr inż. Przemysław Kalitowski¹⁾

Niekonwencjonalna metoda korekty siły w wieszaku drogowego wiaduktu łukowego

Unconventional way of adjustment of tension in steel hanger of arche road viaduct

DOI: 10.15199/33.2016.01.19

Streszczenie. Artykuł dotyczy wiaduktu łukowego zlokalizowanego w Słupsku w ciągu nowo budowanej łącznicy DK 6 i DK 21. Jako wieszaki na obiekcie zastosowano typowy system sworzniowy bez możliwości naciągania (nie ma mufy i nakrętek). Odpowiednie siły w cięgnach miały pojawić się w sposób naturalny po zwolnieniu przęsła z podpór montażowych. Jak się okazało, jeden z wieszaków został pozbawiony naciągu. W artykule przedstawiono sposób identyfikacji sił w wieszakach oraz niekonwencjonalną metodę korekty siły w nienapiętym wieszaku.

Słowa kluczowe: wiadukt łukowy, regulacja siły w wieszaku, wydłużenie termiczne.

Jednym z istotnych problemów podczas budowy obiektów łukowych jest zapewnienie odpowiednich sił w wieszakach. W Polsce powszechnie stosuje się systemy podwieszenia prętowego z możliwością regulacji naciągu (fotografia 1), w których korekty siły naciągu w wieszaku dokonuje się za pomocą łącznika napinającego na dowolnym etapie budowy. Skrajnie inne podejście stosowane jest w przypadku systemów popularnych na rynku niemieckim. Metoda polega na przyspawaniu prętów przez blachy węzłowe do łuku i pomostu (fotografia 2). Jest to rozwiązanie tańsze, ale wymaga instalacji cięgien, gdy przęsło jest podparte. Siły w cięgnach powstają w sposób naturalny po zwolnieniu przęsła z podpór tymczasowych. Metoda wymaga precyzyjnych obliczeń i montażu, ponieważ nie pozwala



Fot. 1. Wieszak z łącznikiem umożliwiającym napięcie

[Fot. K. Żółtowski]

Photo 1. Standard hanger with tensioning sleeve [Photo K. Żółtowski]



Fot. 2. Wieszak całkowicie spawany – brak regulacji

[Fot. M. Binczyk]

Photo 2. Welded hanger – no adjustment of tension [Photo M. Binczyk]

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: krzysztof.zoltowski@bridges.pl

Abstract. Paper refers to the arch viaduct in Słupsk which is a part of new road between national roads number 6. and 21. Carriage way is suspended to the steel arch by hangers (typical steel rods without standard sleeve and nut – no adjustment of tension). The final forces in hangers were planned to be reached as a natural consequence of freeing the superstructure from temporary supports. Unfortunately one of the hanger was not loaded. The paper describes how the forces in hangers were identified. Also shows unconventional way of adjustment of tension in failed hanger. Basic drawings and photos are included.

Keywords: arch viaduct, adjustment of force in hanger, thermal elongation.

na prostą korektę siły w cięgnie. Pośrednim systemem, który zastosowano w wiadukcie w Słupsku w ciągu nowo budowanej łącznicy DK 6 i DK 21, jest **typowe rozwiązanie sworzniowe pozbawione możliwości naciągania**. Zastosowanie gwintów przeciwnych na głowicach umożliwia wybranie luzów i niewielkie wstępne napięcie (fotografia 3). Ostatecznie siły pojawiają się w wieszakach po zwolnieniu przęsła z podpór tymczasowych. System ten, podobnie jak rozwiązanie spawane, nie przewiduje regulacji siły w wieszaku. W przypadku wiaduktu łukowego nad torami PKP w Słupsku po zwolnieniu przęsła z podpór montażowych okazało się, że jeden z wieszaków pozostał nienapięty, co potwierdziły badania. W artykule opisano nietypowy sposób napięcia tego wieszaka bez ingerencji w konstrukcję wiaduktu.



Fot. 3. Wiadukt nad torami kolejowymi w Słupsku. Wieszak bez łącznika – możliwa regulacja długości przed obciążeniem

[Fot. K. Żółtowski]

Photo 3. Viaduct over railway in Słupsk. Hanger without sleeve – length adjustment is possible before loading [Photo K. Żółtowski]

Opis konstrukcji

Stalowy wiadukt łukowy z jazdą dołem ma przenieść ruch samochodowy oraz pieszy ponad torami PKP. Zaprojektowano go jako obiekt jednoprzęsłowy, o rozpiętości teoretycznej $l_1 = 60,0$ m i szerokości całkowitej $b = 28,76$ m. W przekroju poprzecznym ma jezdnię szerokości $2 \times 7,5$ m z pasem rozdzielającym $3,0$ m, chodnik szerokości 2 m i ciąg pieszo-rowerowy szerokości $4,4$ m. Oś obiektu krzyżuje się z osią przeszkody pod kątem 74° . Wiadukt posadowiono pośrednio na palach wbijanych 400×400 mm.

Ustrój nośny wiaduktu składa z dwóch stalowych łuków kołowych o przekroju skrzynkowym 1,0 x 0,96 m i strzałce 11,5 m. Do dźwigarów łukowych podwieszono konstrukcję jezdni pełniącą jednocześnie rolę ściągu. Wieszaki zaprojektowano jako prętowe, zakończone głowicami stalowymi z połączeniem sworzniowym. Konstrukcja jezdni to stalowy ruszt zespolony z płytą żelbetową. Elementami rusztu są dwie podłużnice skrzynkowe-ściagi, cztery podłużnice pośrednie i poprzecznice w rozstawie 3,0 m. Nad podporami znajdują się również poprzecznice skośne. Płyta jezdni grubości 0,25 m została zespolona z rusztem stalowym za pomocą sworzni $\phi 22$. Wspornikowe chodniki o wysięgu 2,0 m oraz 4,4 m wykonano jako stalowe płyty ortotropowe.

Identyfikacja problemu

Montaż konstrukcji przęsła przebiegał na podporach tymczasowych (rysunek 1). Zgodnie z dokumentacją projektową nie przewidziano regulacji naciągu wieszaków. Zakładano, że odpowiednie siły w wieszakach pojawią się po zwolnieniu podpór montażowych jako wynik działania ciężaru własnego konstrukcji pomostu. Po zakończeniu prac montażowych okazało się, że jeden z wieszaków jest pozbawiony naciągu, co było kłopotliwe po zwolnieniu przęsła z rusztowań i w sytuacji, gdy nie przewidziano regulacji sił wciąganych. Z przyczyn obiektywnych nie można było zaakceptować takiej sytuacji. W pierwszym etapie zidentyfikowano więc siły we wszystkich wieszakach. Badania wartości naciągu wieszaków (tabela 1) wykonano metodą pośrednią przez pomiar częstotliwości drgań własnych prętów [2, 3]. Zmierzona częstotliwość drgań wieszaka 2A wynika jedynie

Tabela 1. Wartości zmierzonych częstotliwości drgań i obliczone wartości sił w wieszakach

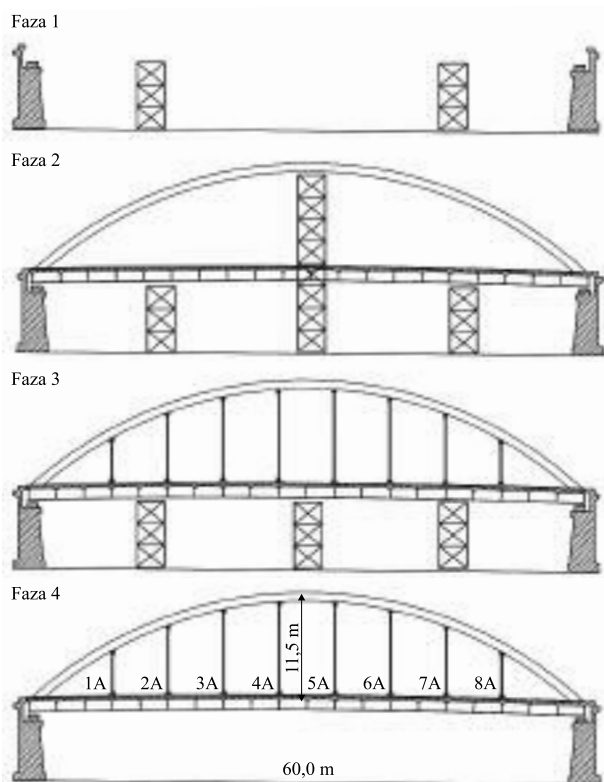
Table. 1. Measured values of frequency and the calculated force in hangers

Strona A			Strona B		
Długość L [m]	Częstotliwość drgań [Hz]	Siła [kN]	Długość L [m]	Częstotliwość drgań [Hz]	Siła [kN]
4,44	30,52	1600	4,43	22,22	300
7,12	4,48	0	7,10	11,86	650
8,80	10,13	1000	8,77	8,97	650
9,57	7,81	800	9,57	7,57	550
9,57	7,91	810	9,60	7,22	500
8,80	8,42	660	8,82	8,02	470
7,13	12,09	660	7,15	10,97	470
4,45	21,81	200	4,44	27,18	800

z jego sztywności giętej, co oznacza, iż w danym wieszaku nie ma napięcia. Dodatkowo siły w sąsiednich wieszakach (1A oraz 3A) okazały się znacznie większe niż w ich symetrycznych odpowiednikach na łuku (8A i 6A).

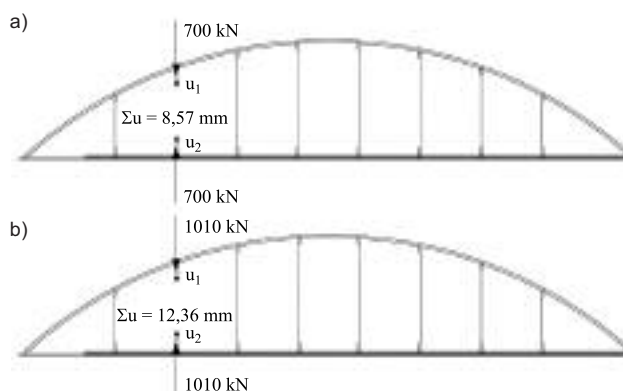
Metoda regulacji siły w wieszaku

Brak siły w wieszaku 2A oraz zbyt duże napięcie wieszaków sąsiednich zmusiły wykonawcę do zastosowania dodatkowej, wcześniej nieprzewidzianej, procedury regulacji naciągu. Standardowa metoda regulacji nie była możliwa ze względu na brak mufy z nakrętkami na wieszaku. Alternatywą było zdublowanie wieszaka konstrukcją pomocniczą i wstępne sprężenie łuku z płytą jezdni, ale wówczas należałoby wprowadzić siłę, która wywoła zmniejszenie odległości między zakotwieniami tak, aby pręt po skróceniu uzyskał wymagane napięcie. Skrócenie uwzględnia wydłużenie pręta wieszaka i sprężyste przemieszczenie łuku w stosunku do płyty jezdni. Potrzebne sprężenie oszacowano na podstawie obliczeń MES przęsła (rysunki 2 i 3) i odkształceń wieszaka. Dane dotyczące naciąganego pręta: $L = 7,13$ m; $\phi = 90$ mm. Niezbędna siła w pręcie $P = 700$ kN. Część skrócona odległości między zakotwieniami wynikająca z wydłużenia pręta wynosi $\Delta L = PL/EA = 3,82$ mm, natomiast na podstawie obliczeń MES – 8,6 mm (rysunek 2a). Wstępne wymuszenie potrzebne, aby pręt nieobciążony uzyskał po odpuszczeniu napięcie ~ 700 kN, to $\sim 12,4$ mm. Niezbędna siła sprężająca w konstrukcji pomocniczej wyniosłaby ~ 1010 kN (rysunek 2 b). Prosta ideowo metoda pociąga za sobą wiele kosztownych działań. Wymaga zaprojektowania i zamocowania



Rys. 1. Główne fazy montażu przęsła (na drugim łuku wieszaki z indeksem B)

Fig. 1. Main erection stages of the span (hangers with index B are on the second arc)



Rys. 2. Sprężyste przemieszczenia łuku i jezdni spowodowane siłą w ciągnięciu o wartości: a) 700 kN; b) 1010 kN

Fig. 2. Elastic displacement of arc and deck caused by force: a) 700 kN; b) 1010 kN



Rys. 3. Model obliczeniowy wiaduktu w środowisku MES SOFiSTiK
Fig. 3. Numerical model of viaduct in the FEM SOFiSTiK

wania pomocniczej konstrukcji oraz mobilizacji sprzętu hydraulicznego do napinania. Dodatkowa trudność wynika z dużego zakresu naprawy powierzchni stalowej konstrukcji po operacji.

W obliczu obiektywnych trudności związanych z opisaną metodą **zaproponowano działania wykorzystujące zjawisko rozszerzalności termicznej stali**. Zamiast zbliżania zakotwień pręta pod obciążeniem można dokonać jego wydłużenia o wyliczoną wartość metodą ogrzania. Proces polega na sukcesywnym podnoszeniu temperatury wraz z równoległym wybieraniem luzu na przeciwbieżnych gwintach zakotwienia. Punkty zamocowania pręta pozostają nieruchome, natomiast sam pręt się wydłuża (możliwe staje się obracanie pręta na gwintach tak jak w przypadku wybierania luzów podczas montażu wieszaka). Gdy pręt zostaje ogrzany do odpowiedniej temperatury, dostatecznie wydłuża się. Luzy, które w związku z tym wydłużeniem powstają, zostają wybrane na gwintach i następuje naturalne chłodzenie w otoczeniu. Proces ten trwa kilka godzin i skutkuje powolnym przyrostem siły w wieszaku. W przypadku pręta długości 7,13 m wymagana temperatura (z uwzględnieniem temperatury otoczenia ~20 °C) wyniosłaby $T = 165^\circ \Rightarrow \Delta T = \Delta L/L \cdot a$.

Realizacja naciągu wieszaka

Zaproponowana metoda została zaakceptowana przez wykonawcę obiektu oraz inspektora nadzoru. Podczas wykonywania naciągu kontrolowano przemieszczenia konstrukcji w punktach zakotwień wieszaka (metodą niwelacji precyzyjnej) oraz zmianę długości wieszaka. Ogrzewanie prowadzono za pomocą specjalnych mat grzewczych (fotografia 4) zapewniających wymagany przyrost i ciągłą kontrolę temperatury. Podczas ogrzewania wybierano luzu na gwintach pręta przez jego obrót z wykorzystaniem klucza paskowego. Po zakończeniu wszystkich prac oraz ochłodzeniu pręta przeprowadzono ponowne badania wartości naciągu wieszaków (tabela 2).

Klasyczną zależność pomiędzy częstotliwością drgań własnych i siłą napięcia cięgną określa wzór:

$$\omega_1 = \pi \sqrt{\frac{F}{pL^2} \left(1 + \frac{ESf^2}{2FL^2} \right)} \quad f = \frac{4pgL^2 \cos(\alpha)}{\pi^3 F}$$

gdzie:

F [N] – siła normalna w cięgnię; p [kg/m] – liniowa gęstość masy; L [m] – długość cięgna; E [MPa] – moduł sprężystości cięgna; S [m²] – przekrój nośny cięgna; f [m] – strzałka ugięcia cięgna.



Fot. 4. Nagrzewanie wieszaka indukcyjnymi matami grzewczymi

[Fot. Grupa Vistal]
Photo 4. Heating of hanger with induction heating mats [Photo Grupa Vistal]

Tabela 2. Wartości zmierzonych częstotliwości drgań własnych oraz obliczone wartości sił w wieszakach (po przeprowadzonym naciągu wieszaka 2A)

Table 2. Measured values of frequency and the calculated force in hangers (after tensioning of hanger 2A)

Strona A			Strona B		
Długość L [m]	Częstotliwość drgań [Hz]	Siła [kN]	Długość L [m]	Częstotliwość drgań [Hz]	Siła [kN]
4,44	28,44	1050	4,43	22,22	250
7,12	12,27	710	7,10	11,96	650
8,80	8,79	620	8,77	9,03	670
9,57	7,97	650	9,57	7,69	580
9,57	8,17	700	9,60	7,26	510
8,80	8,56	560	8,82	8,06	470
7,13	12,25	700	7,15	11,07	480
4,45	21,61	190	4,44	27,83	900

Z uwagi na istotny wpływ sztywności giętej prętów ostatecznie wyznaczono siły w wieszakach, wykorzystując drgania własne dla modelu belkowego w środowisku MES SOFiSTiK [4].

Podsumowanie

Projektowanie i budowa przęseł łukowych z nieregulowanymi wieszakami wymaga szczególnie precyzyjnych obliczeń i starannego montażu. Wady dotyczące braku prostoliniowości pręta lub wstępnego napięcia w czasie montażu mogą skutkować wyłączeniem wieszaków z pracy. W omawianym przypadku teoretyczny luz wynoszący ~4 mm całkowicie wyeliminował wieszak. Projektant zastosował w tym przypadku typowy system z nagwintowanymi końcówkami.

Na wiadukcie w Słupsku po raz kolejny wykorzystano metodę pośrednią rozpoznania sił w wieszakach za pomocą pomiaru częstotliwości drgań własnych. Z technicznego punktu widzenia jest ona bardzo efektywna, chociaż na wyniki ma wpływ aktualna temperatura konstrukcji, sztywność gięta prętów i stopień ich utwierdzenia na końcach. To wszystko sprawia, że w przypadku krótkich prętów wyniki mogą być obarczone dużym błędem. W związku z tym wyniki uzyskane dla prętów nr 1A i 8A (tabela 1 i 2) należy traktować jako orientacyjne.

Metoda napinania prętów za pomocą ogrzania okazała się bardzo skuteczna. W efekcie nie prowadzono żadnych prac spawalniczych lub monterskich i zaoszczędzono czas. Jedynym kosztem były poprawki malarskie na wieszaku i wykorzystanie urządzenia indukcyjnego do podgrzewania konstrukcji. Metoda termiczna z pewnością nie zastąpi standardowej techniki napinania, ale w przypadku nieregulowanych wieszaków może się okazać bardzo korzystna.

Literatura

- [1] Prądzyński S., Kaliński W., Projekt wykonawczy wiaduktu nad torami PKP w ciągu ul. Koszalińskiej w Słupsku. WiK. 2014.
- [2] Żółtowski K., Żółtowski P., Efekty dynamiczne w cięgnach podwieszonych kładek dla pieszych. Wrocławskie Dni Mostowe. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2004.
- [3] IRVIN M., Cable Structures, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1981.
- [4] www.sofistik.com.

Przyjęto do druku: 22.10.2015 r.