

# STALOWE KONSTRUKCJE CIĘGNOWE

Część 4

## przykłady realizacji



**prof. dr hab. inż. Szymon Pałkowski**  
Katedra Konstrukcji Metalowych,  
Politechnika Koszalińska

Konstrukcje cięgnowe należą do bardzo ekonomicznych i nowoczesnych konstrukcji inżynierskich. Jest wiele ciekawych przykładów ich zastosowania.

**N**a okoliczność tę wpływa wiele specyficznych zalet tych ustrojów, jak np. duża swoboda architekta w kształtowaniu bryły obiektu, możliwość uzyskiwania dużych rozpiętości i powierzchni czy mały ciężar własny konstrukcji, wynikający z wysokiej wytrzymałości materiału oraz faktu, że w przekrojach poprzecznych cięgien (lin) występują tylko naprężenia rozciągające. Ponadto stosunkowo tani i prosty montaż konstrukcji nie wymaga na ogół skomplikowanych rusztowań. W związku z tymi pozytywnymi cechami konstrukcje cięgnowe są bezkonkurencyjne w rozwiązaniach o dużych i bardzo dużych rozpiętościach i znajdują zastosowanie przede wszystkim w takich obiektach budowlanych jak hale widowiskowo-sportowe i pawilony wystawowe, mosty wiszące i podwieszane, maszty i kominy z odciągami, wyciągi narciarskie i kolejki linowe czy napowietrzne linie energetyczne.

### Przekrycia cięgnowe

Rozwój współczesnych przekryć wiszących został zapoczątkowany dopiero w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Pionierską konstrukcją tego typu była zaprojektowana w 1950 roku przez Nowickiego, a wzniesiona w 1953 roku w Północnej Karolinie (USA) arena w Raleigh (rys. 1). Konstrukcję nośną areny stanowi wstępnie napięta siatka cięgnowa w kształcie paraboloidy hiperbolicznej. Siatka ta składa się z lin o zróżnicowanej średnicy (13-32 mm), mocowanych w dźwigarze brzegowym wykonanym z dwóch wzajemnie przecinających się

parabolicznych łuków żelbetowych. Pokrycie dachu stanowią blacha falista, izolacja termiczna i warstwa materiału bitumicznego. Główne wymiary obiektu w rzucie poziomym wynoszą: długość 97 m i szerokość 92 m. Przekrycie hali stwarza wrażenie niezwyklej lekkości; wydaje się, że dach, niepodpierany przez ściany, swobodnie unosi się w powietrzu.

Do interesujących krajowych dachów wiszących należy wybudowane w 1975 roku przekrycie amfiteatru w Koszalinie (rys. 2). Dach amfiteatru, o powierzchni 4460 m<sup>2</sup> i rozpiętości 102 m, ma kształt zbliżony do paraboloidy hiperbolicznej.

**Konstrukcje cięgnowe są bezkonkurencyjne w rozwiązaniach o dużych i bardzo dużych rozpiętościach.**

Konstrukcję nośną dachu tworzy wstępnie napięta siatka składająca się z cięgien nośnych (liny spiralne zamknięte o średnicy 45 mm) oraz ze sztywnych elementów napinających wykonanych z dwuteowników walcowanych I 140. Siatka cięgnowa dachu jest kotwiona w dźwigarze brzegowym wykonanym z dwóch stalowych łuków o przekroju rurowym  $D = 894/22$ . Każdy z łuków jest oparty przegubowo na fundamencie i kotwiony za pomocą sześciu ukośnych odciągów. Pokrycie dachu stanowią blacha faldowa, warstwa izolacji akustycznej oraz kolorowa papa.

Bardzo efektywne wstępne napięcie siatki cięgnowej dachu zrealizowano wskutek wymuszonego obrotu łuków na przegubach. Obrót ten uzyskano przez odpowiednie skrócenie odciągów dachu. Taki sposób realizacji wstępnego napięcia umożliwił szybkie i jednoczesne sprężenie całego obiektu, bez konieczności stosowania na wysokości skomplikowanych urządzeń do naciągu lin. Szczegółowe informacje dotyczące projektu i montażu tego przekrycia wiszącego podano w [5].

Interesującym przykładem realizacji przekrycia wiszącego o konstrukcji opartej na modelu dźwigara cięgnowego jest dach audytorium w mieście Utica w USA (rys. 3). Konstrukcję nośną dachu o średnicy 76,2 m (250 ft) tworzą płaskie dźwigary cięgnowe. W środku dachu dźwigary te są połączone za pomocą pierścieni stalowych o średnicy 7 m. Zewnętrzne końce cięgien są mocowane do żelbetowego pierścienia opartego na pionowych słupach. To przekrycie wiszące ma tę cenną zaletę, że w jego dźwigarze brzegowym (w zewnętrznym pierścieniu żelbetowym) występują równoważące się siły ściskające, które nie wywierają niekorzystnego wpływu na fundamenty.

Oddzielną grupę przekryć cięgnowych stanowią siatkowe przekrycia namiotowe. Charakteryzują się one tym, że rolę dźwigara brzegowego spełniają tu rozciągane liny brzegowe. Chyba najbardziej znaną tego typu konstrukcją jest przekrycie obiektów olimpijskich w Monachium, o całkowitej powierzchni równej



69 tys. m<sup>2</sup> (rys. 4). Więcej informacji na temat tego przekrycia podano w [4].

W ostatnim dziesięcioleciu wybudowano znaczną liczbę stadionów z zadaszeniami, w których wykorzystywane są ciągnowe elementy nośne. Przykładami tego typu zadaszeń są m. in. stadiony w Atenach (2003), Hannoverze (2004), Londynie-Wembley (2006), Kapsztadzie (2009), Warszawie (2011) oraz Chorzwie (2012).

Ciekawym przykładem wymienionych przekryć stadionów jest zadaszenie Stadionu Narodowego w Warszawie (rys. 5). Zadaszenie to ma kształt elipsy o wymiarach 240×270 m i powierzchni ponad 50 tys. m<sup>2</sup>. Stalowa konstrukcja przekrycia (rys. 6) jest niezależna od żelbetonowej konstrukcji bryły stadionu obejmującej pomieszczenia użytkowe i trybuny.

Konstrukcja nośna zadaszenia stadionu składa się z 36 promieniście rozmieszczonych płaskich dźwigarów ciągnowych kotwionych w konstrukcji wsporczej, złożonej ze ścisłkanego pierścienia (1) okalającego cały stadion, słupów (2), zastrzałów (3) i odciągów (4). Słupy, zastrzały i odciągi oparte na pierścieniu obwodowym tworzą pewien rodzaj pylonów, do których są mocowane dźwigary ciągnowe złożone z ciągów nośnych (5) i napinających (6). Nad trybunami, do lin (6), jest podwieszony stały dach z tworzywa sztucznego. Nad boiskiem piłkarskim znajduje się rozsuwany (zwijany) dach oparty na linach (8) i (9). W środku zadaszenia jest zamocowana iglica (10), której wierzchołek znajduje się na wysokości 100 m ponad poziomem murawy boiska. Trybuny i różnego rodzaju pomieszczenia (11) są wydzielone od konstrukcji nośnej zadaszenia.

Z uwagi na bardzo dużą powierzchnię zadaszenia główne elementy konstrukcyjne, wykonane ze stali S355 i S460, mają stosunkowo duże przekroje poprzeczne, np.:

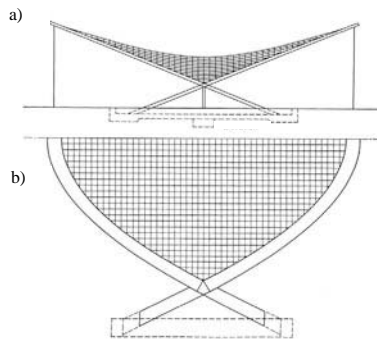
- pierścień brzegowy okalający zadaszenie:  $\varnothing 1820/80$  (S460),
- słupy obwodowe podtrzymujące pierścień:  $\varnothing 1016/30...70$  (S355),
- zastrzały:  $\varnothing 1016...1200/30...45$  (S355),
- odciągi:  $\varnothing 508/25...50$  (S355).

Liny spiralne zamknięte użyte do zadaszenia, w zależności od przeznaczenia, mają zróżnicowane przekroje od  $\varnothing 70$  (liny napinające) do  $\varnothing 150$  (główne liny nośne). Pierścień wewnętrzny 7 (rys. 6) został wykonany z sześciu lin o średnicy 125 mm.

Szczegóły wybranych elementów konstrukcyjnych obiektu przedstawiono na rys. 7-9.

### Mosty wiszące i podwieszane

Mosty takie są obecnie najczęściej stosowanym rodzajem mostów w przypadku przejść przez przeszkody wodne o średniej i dużej szerokości. Mosty podwieszane stosuje się na ogół przy rozpiętości głównego przęsła do ok. 1000 m, a powyżej tej rozpiętości znajdują zastosowanie mosty wiszące.



Rys. 4 Przekrycie namiotowe stadionu w Monachium



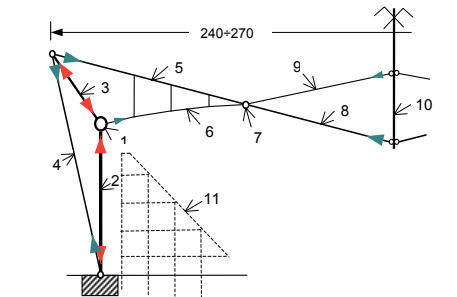
Rys.1. Arena w Raleigh



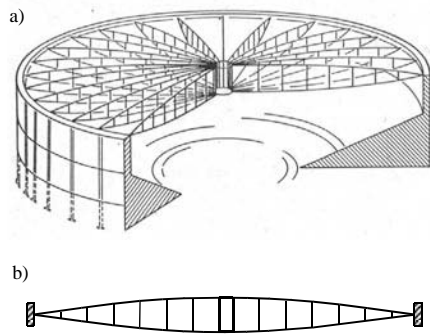
Rys. 5. Przekrycie Stadionu Narodowego



Rys. 2. Przekrycie Amfiteatru w Koszalinie



Rys. 6. Schemat konstrukcji zadaszenia stadionu



Rys. 7. Montaż pierścienia brzegowego



Rys. 3. Audytorium w Utica



Rys. 8. Szczegół połączenia segmentów pierścienia ze słupem



Przykładem dużego mostu podwieszono-  
go jest znany i bardzo estetyczny most Nor-  
mandie we Francji, o rozpiętości głównego  
przęsła 856 m i całkowitej długości 2141 m  
(rys. 10). Dźwigary główne tego mostu to kon-  
strukcje skrzynkowe o kształcie aerodynamicz-  
nym, stalowe w przęśle głównym (w części  
środkowej na długości 624 m) i z betonu sprę-  
żonego w przęsłach bocznych. Tego rodzaju  
konstrukcja dźwigarów głównych (stalowa i żel-  
betonowa) jest typowa dla mostów podwieszono-  
nych o bardzo dużych rozpiętościach przęseł.  
Więcej informacji na temat projektu i budowy  
tego mostu przedstawiono w [2].

Most Akashi Kaikyo w pobliżu Kobe w Japo-  
nii o rozpiętości głównego przęsła 1991 m i cał-  
kowitej długości 3991 m (rys. 11) jest obecnie  
największym mostem wiszącym. Jest to most  
drogowy o sześciu pasmach ruchu i całkowitej  
szerokości 35,5 m. Stalowe pylony mostu  
o wysokości 297,2 m (od poziomu wody) opie-  
rają się na żelbetonowych fundamentach, które  
mają kształt walca o wysokości 70 m i średnicy  
80 m. Kable mostu, o średnicy 1,12 m, składa-  
ją się z 36830 równoległych drutów o średni-  
cy 5,23 mm zgrupowanych w 290 wiązkach po  
127 drutów w każdej wiązce. Nośność jednego  
kabla wynosi 550 MN.

### Inne konstrukcje ciągnowe

Ciekawym przykładem zastosowania kon-  
strukcji ciągnowych w budownictwie prze-  
mysłowym są chłodnie kominowe. Chłodnia  
wybudowana w 1975 roku w byłym RFN  
ma wysokość 180 m i maksymalną średni-  
cę 140 m. Powierzchnię chłodni tworzy wstęp-  
nie napięta siatka ciągnowa podwieszona do  
centralnego masztu i zakotwiona na obwo-  
dzie w fundamencie w kształcie pierścienia.  
Następnie, po stronie zewnętrznej siatki cią-  
gnowej, została zamontowana okładzina  
z blach aluminiowych. Szczegółową analizę  
teoretyczną tego typu konstrukcji ciągnowych  
przedstawiono w [14].

## Zastosowanie konstrukcji ciągnowych

- hale widowiskowo-sportowe,
- pawilony wystawowe,
- mosty wiszące i podwieszono-
- maszty i kominy z odciągami,
- wyciągi narciarskie i kolejki linowe,
- napowietrzne linie energetyczne.

Specyficzną grupę konstrukcji ciągnowych  
stanowią maszty z odciągami. Rys. 12 przed-  
stawia schemat masztu radiowo-telewizyjnego  
w Kisielicach k. Ilawy zmontowanego w 2001  
roku. Trzon masztu o wysokości 300 m (z do-  
datkową anteną TV o wysokości 20 m) jest wy-  
konany w postaci stalowej trójściennej kratow-  
nicy o szerokości boku  $a = 2$  m. Maszt cechuje  
się bardzo dużą smukłością (stosunek wy-  
sokości masztu do szerokości trzonu jest rów-  
ny 160). Krawężniki trzonu masztu są zapro-  
jektowane z rur okrągłych o średnicy zewnętr-  
znej  $D = 168,3$  mm i zmiennej grubości ścia-  
nek. Skratowanie trzonu masztu zaprojektowa-  
no z rur okrągłych  $D = 76,1/4$ . Są one mocowa-  
ne do krawężników w węzłach za pomocą śrub  
M24 kl. 8.8. Maszt ma pięć poziomów moco-  
wania odciągów rozmieszczonych co ok. 60 m.  
Można zauważyć, że aż trzy najdłuższe odci-  
gi masztu są tu kotwione w jednym bloku fun-  
damentowym. Maszty należy obecnie obliczać  
według nieliniowej analizy sprężystej II rzędu,  
zgodnie z PN-EN 1993-3-1 [N6].

Istnieje jeszcze wiele innych rodzajów kon-  
strukcji, których głównym elementem nośnym  
jest ciągnio. Można tu np. wymienić napowietrz-  
ne linie energetyczne, wyciągi narciarskie, kole-  
jki górskie, urządzenia do transportu ludzi lub  
materiałów (windy) itp. ■

### Bibliografia

- [1] Argyris J. H., Scharpf D., Large deflection analysis of prestressed networks. J. Struct. Div., March, 1972, pp. 633-654.
- [2] Biliszczuk J., Mosty podwieszono. Projektowanie i realizacja. Arkady, Warszawa 2005.
- [3] Bresler B. et al., Design of Steel Structures. John Wiley & Sons, New York 1968.
- [4] Brinkmann G. (Hrsg.): Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke. VCH, Weinheim 1990.
- [5] Filipkowski J., Przekrycie amfiteatru w Koszalinie. „Inżynieria i Budownictwo” nr 7/1977, s. 251-254.
- [6] Gimsing M. J., Cable supported bridges. John Wiley & Sons, New York 1983.
- [7] Hankus J., Budowa i własności mechaniczne lin stalowych. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1990.
- [8] Orkisz J., Januszek M., Zastosowanie elementów wyższego rzędu do analizy skończonych deformacji wiotkich układów ciągnowych. „Archiwum Inżynierii Lądowej”, z. 4/1985, s. 423-445.
- [9] Ozdemir H., A finite element approach for cable problems. Int. J. Solids Struct., 15/1979, pp. 427-437.
- [10] Pałkowski Sz., Obliczanie siatek ciągnowych metodą elementów skończonych. „Archiwum Inżynierii Lądowej”, z. 2/1979, s. 177-194.
- [11] Pałkowski Sz., Konstrukcje ciągnowe. WNT, Warszawa 1994.
- [12] Pałkowski Sz., Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania. PWN, Warszawa 2009.
- [13] Roik K. (Hrsg.): Schrägseilbrücken. Ernst & Sohn, Berlin 1986.
- [14] Scharpf D. W., Die Berechnung von vorgespannten Seilnetzstütztürmen. Bauingenieur, H. 12/1979, S. 449-458.
- [15] Świtka R., Problems of cable constructions analysis, Advances in Mechanics, No 4/1988, pp. 3-51.

### Normy

- [N1] PN-EN 1993-1-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [N2] PN-EN 1993-1-11. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-11: Konstrukcje ciągnowe.
- [N3] PN-EN 12385-1: Liny stalowe – Bezpieczeństwo – Cz. 1: Wymagania ogólne.
- [N4] PN-EN 12385-2: Liny stalowe – Bezpieczeństwo – Cz. 2: Definicje, oznaczenie i klasyfikacja.
- [N5] PN-EN 12385-10: Liny stalowe – Bezpieczeństwo – Cz. 10: Liny jednozwoite do ogólnych zastosowań w konstrukcjach technicznych.
- [N6] PN-EN 1993-3-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże i maszty.



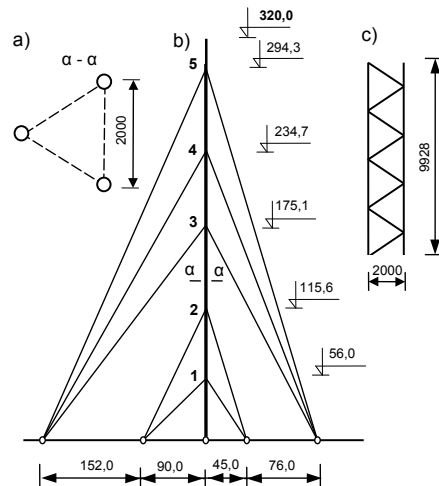
Rys. 9. Szczegół oparcia słupa na stopie fundamentowej



Rys. 10. Most podwieszony Normandie



Rys. 11. Most wiszący Akashi Kaikyo



Rys. 12. Schemat masztu radiowo-telewizyjnego w Kisielicach: a) przekrój, b) schemat, c) segment montażowy

Fot. arch. autora

Fot. P. Pine

Fot. P. Papił