

Jolanta Tofil*

ROZWÓJ WSPÓŁCZESNYCH PRZEKRYĆ O KONSTRUKCJI CIĘGNOWEJ

EVOLUTION OF CONTEMPORARY ROOFS OF STRING CONSTRUCTION

Konstrukcje cięgnowe są dziś synonimem nowoczesności: celowości i logiki dzieła – jako wymóg ekonomiczności i zamierzenia twórcy: w budowlach wielkich przekryć i pokonywania wielkich rozpiętości. W kategorii nowoczesności mieści się także bicie rekordów w tym zakresie.

Słowa kluczowe: przekrycia, konstrukcje cięgnowe, konstrukcja wisząca, forma architektoniczna

String constructions constitute a synonym of modern technology, purpose and logic of a piece, as an economic requirement and intentions of a creator in constructions of big roof shells and gapping great spans. Breaking records in that domain also falls into this modern category.

Keywords: roofs, string structures, suspension structure, architectural form

Przekrycia wiszące o bardzo prostej konstrukcji były znane w dalekiej przeszłości. Wykorzystanie skór zwierzęcych, a później prymitywnie plecionych mat oraz skręconych włókien roślinnych jako lin znane było od najdawniejszych czasów. Niestety ze względu na nietrwałość stosowanych materiałów, zachowało się niewiele śladów owego budownictwa.

W starożytnej Grecji i Azji Mniejszej stosowano konstrukcje namiotowe. W upalne lub deszczowe dni przekrywano płótnami żaglowymi pomieszczenia przeznaczone na cele publiczne. Zasady konstrukcyjne tych przekryć wywodziły się z konstrukcji żagli na statkach. W starożytnym Rzymie po raz pierwszy zastosowano płócienne przekrycie wiszące na linach,

chroniące trybuny przed promieniami słońca tzw. we-larium w Colosseum. Ogromna ta budowla w kształcie elipsy o średnicach 156 i 188 metra była przekrywana w czasie igrzysk [1].

Do dnia dzisiejszego plemiona ludzi koczujących (Nomadów) oraz ludność krajów słabo rozwiniętych gospodarczo wykorzystują podobny sposób budowania, ze względu na niskie koszty i łatwość wnoszenia i przenoszenia konstrukcji z miejsca na miejsce. Z tych samych przyczyn przekrycia wiszące są powszechnie wykorzystywane przez wojsko oraz dla widowisk cyrkowych. Największe budowle cyrkowe powstały pod koniec XIX i na początku XX wieku.

* Tofil Jolanta, dr inż. arch., Politechnika Śląska, Ośrodek Geometrii i Grafiki Inżynierskiej.

1, 2. Hala widowiskowa Katowice, Polska. www.sportsvenue-technology.com / Spectacle Arena, Katowice, Poland
3, 4. Stadion Olimpijski, Monachium, Niemcy. www.mimoa.eu, http://muc.in/pic/munich_olympic_stadium / Olympicstadium, Munich, Germany



Erę inżynierskich konstrukcji wiszących o dużych rozpiętościach zapoczątkował wiek XIX, kiedy to wynaleziono sposób masowej produkcji lin stalowych o znacznej wytrzymałości na zerwanie. Jednak początkowo liny stalowe wykorzystywano jedynie do konstrukcji mostów. Prawdziwy rozkwit konstrukcji ciągnowych rozpoczął się w drugiej połowie XX wieku i nadal obserwujemy niesłabnące zainteresowanie tego typu ustrojami.

Pierwszym obiektem, w którym zastosowano liny o wysokiej wytrzymałości na zerwanie jest Arena w Raleigh. Obiekt ten dał początek rozwojowi współczesnych – wstępnie napiętych – konstrukcji przekryć wiszących.

W roku 1950 Maciej Nowicki zaprojektował pionierską konstrukcję wspomnianej wyżej areny *Cow Palace*, którą wzniesiono w roku 1953 [2]. Konstrukcję nośną dachu stanowi wstępnie napięta siatka ciągnowa w kształcie paraboloidy hiperbolicznej. Siatka ta składa się z lin o zróżnicowanej średnicy, mocowanych do dwóch wzajemnie przecinających się parabolicznych łuków żelbetowych. Część lin spręża przekrycie w kierunku poprzecznym. Natomiast strefę powłoki nie sprężoną podtrzymują boczne napięte odciągi linowe, wachlarzowe, zakotwione ukośnie w słupach ściany. Główne wymiary obiektu w rzucie poziomym wynoszą: długość 97 m i szerokość 92 m [3].

Krzyżujące się łuki nośne wznoszą się na wysokość 27,4 m i są podparte słupami, które przenoszą jedynie ciężar własny łuków. Ponieważ występowało zagrożenie przesunięcia się fundamentu po gruncie na wypadek przekroczenia sił tarcia łuki połączono za pomocą sprężonych kabli.

W omawianej konstrukcji przekrycia po raz pierwszy zastosowano powierzchnię siodłową z krzyżujących się lin, dzięki czemu rozwiązano niezwykle ważny problem odprowadzenia wody opadowej (woda spływa do najniższych punktów skrzyżowania łuków) [4].

Hala jest osłonięta szklaną ścianą, która wzmacnia wrażenie lekkości i dynamizmu formy architektonicznej budowli wynikającej z zastosowanego rozwiązania przekrycia. Wspomnianą ścianę przecina wstęga żelbetowa, stanowiąca jednocześnie belkę podtrzymującą konstrukcję trybuny.

Pokrycie dachu zaprojektowano z blachy falistej, izolacji termicznej oraz warstwy materiału bitumicznego.

Obiekt zdobył Nagrodę Honorową AIA w 1953 roku, został zaliczony w poczet 10 najbardziej znaczących budynków w historii architektury przez *Architectural Record* w 1957, sprowokował liczne naśladownictwa, zainspirował wielu, jak choćby Saarinena (Iodowisko Uniwersytetu w Yale w New Haven, terminal Dulles Airport w Waszyngtonie) – i został później na długo zapomniany.

Według Curta Siegela powierzchnia dachu rozpięta pomiędzy łukami (...) *stała się prototypem 'dachu wiszącego', a raczej należałoby powiedzieć 'siatki z napiętych ciągów', zakrzywionej w dwóch przeciwnych kierunkach, przez co zwróciłoby się uwagę na formę powierzchni dachowej, która dla tej struktury jest ważniejsza niż forma łuków* [5].

Wręcz dosłownym cytatem z Areny, zwanej także Parableum, jest Hala Kongresowa w Berlinie zaprojektowana przez H. Stubbinsa. Zrealizowana w 1957 r. posiada wymiary w rzucie poziomym: 75 m na 61 m. W maju 1980 roku, po 23 latach eksploatacji dach uległ awarii, której przyczyną była korozja lin nośnych dachu, szczególnie w pobliżu zakotwień w żelbetowym dźwigarze brzegowym. W 1986 roku halę odbudowano, udoskonalając konstrukcję nośną dachu [6].

Kolejnymi etapami na drodze udoskonalania tego typu rozwiązań było zastąpienie ściskanych łuków pierścieniami, co dało początek rozwojowi konstrukcji wiszących na planie koła. Dwa pierwsze, równocześnie i niezależnie opracowane projekty, to: przekrycie pawilonu USA na Światowej Wystawie, odbywającej

się w 1958 roku w Brukseli oraz projekt konkursowy Centrum Targowego w Leopoldville w Kongu.

W kolejnych latach nastąpił bardzo szybki rozwój konstrukcji cięgnowych. Sprzyjały temu dogodne warunki. Ciągłe rozwijający się i coraz sprawniejszy warsztat projektowy inżynierów, wzrastające wymagania przestrzenne architektów, a w szczególności produkcja coraz wyższej wytrzymałości gatunków stali oraz tworzyw sztucznych. Projektowano konstrukcje coraz lżejsze, o bardziej ekspresyjnej formie, co miało ogromne znaczenie dla odbioru estetycznego tych budowli. Wielu inżynierów i architektów porzuciło dotychczasowe, tradycyjne rozwiązania. Główne zmiany dotyczyły spojrzenia na konstrukcję obiektu, która oprócz pełnienia swej funkcji powinna być detalem architektonicznym. Wymagania stawiane inżynierom wzrosły, głównie w aspekcie rozwiązań kubaturowych. Wnętrze obiektu nie powinno być ograniczane przez zastosowaną konstrukcję, a więc stosowanie podpór powinno być coraz rzadsze.

W Ameryce pionierami rozwoju przekryć wiszących byli: Buckminster Fuller, który projektował przekrycia cięgnowe na rzucie koła oraz Walter Bird. Ten ostatni w 1956 roku wraz z zespołem utworzył Birdair Structures Incorporated do promowania, projektowania i wytwarzania konstrukcji pneumatycznych. Niestety inżynierowie i fabrykanci napotykali wiele przeszkód, co spowodowało spadek zainteresowania inwestorów tego typu rozwiązaniami. Konstrukcje pneumatyczne zaczęto uważać za wymagające zbyt dużej precyzji obliczeń i wykonania oraz trudne do utrzymania.

Swój istotny wkład do rozwoju konstrukcji cięgnowych ma inny amerykański projektant David Geiger, uważany za twórcę systemu wznoszenia kopuł podwieszonych o największych rozpiętościach [7]. W 1968 roku jako konstruktor wraz z Davis Brody Associates z Nowego Yorku wykonał projekt pawilonu Stanów Zjednoczonych na Expo'70 w Osace. Budowla ta była oparta na konstrukcji pneumatycznej o niskim profilu,

w zarysie eliptyczna, wysoka na 7 m, o imponującej powierzchni wystawowej 100 000 m².

Znani ze swej działalności są również japońscy konstruktorzy. Mamoru Kawaguchi, jako twórca systemu Pantadome [8] oraz Kazuo Ischi, zajmujący się konstrukcjami membranowymi. Kenzo Tange, natomiast, zaprojektował przekrycia obiektów olimpijskich na igrzyska w Tokio w 1964 r. W jednym z nich końce lin z jednej strony zawieszono na rzeźbionej wieży położonej poza środkiem konstrukcji, z drugiej strony zakotwiczone są w murach stadionu [9].

W Europie uznanymi za wybitnych są niemiecki konstruktor Jörg Schlaich, autor wielu zrealizowanych przekryć otwartych oraz irlandzki projektant wielu wspaniałych konstrukcji wiszących Peter Rice. Nie można tu pominąć działalności polskich konstruktorów z Wacławem Zalewskim na czele. Zaprojektował on wraz z architektami Maciejem Krasińskim i Maciejem Gintowtem oraz konstruktorem Andrzejem Żórawskim w 1961 roku koncepcję hali widowiskowej w Katowicach, jako podwieszanej kopuły. Jest to jedna z ciekawszych budowli w sensie architektonicznym i konstrukcyjnym (Il. 1, 2).

Do rozwoju konstrukcji cięgnowych przyczynił się w szczególności niemiecki konstruktor Frei Otto, który przez wiele lat kierował pracami w Instytucie Lekkich Konstrukcji przy Uniwersytecie w Stuttgartcie. Prowadził działalność badawczą oraz realizował konstrukcje namiotowe z włókien syntetycznych i konstrukcje cięgnowe oparte na linowej sieci podtrzymującej tkaninowe membrany. Najbardziej znaną tego typu konstrukcją jest przekrycie obiektów zespołu olimpijskiego w Monachium, który wzniesiono na Olimpiadę w 1972 roku (Il. 3, 4).

Konstrukcje cięgnowe inspirowały nowoczesną architekturę. Sprawily, że powstały projekty w wielu miejscach świata, które są triumfem myśli architekta i konstruktora. Stworzyły niezwykle interesującą i nadal otwartą drogę w dziedzinie budownictwa.

Prekursorskie przykłady projektowe:

Hala widowiskowa w Katowicach, Polska [10]
(Il. 1, 2)

Autor: Waław Zalewski

Współpraca: arch. Maciej Krasieński, Maciej Gintowt

Konstrukcja: Andrzej Źórawski

Realizacja 1961 r.

Program użytkowy tego obiektu przewiduje możliwość organizowania różnych imprez przy widowni mającej nawet do 18 000 miejsc siedzących.

Główną bryłę hali stanowi skomponowany na rzucie kołowym odwrócony stożek ścięty płaszczyzną ukośną. Konstrukcją nośną przekrycia hali jest 120 dźwigarów linowych zamocowanych w zewnętrznym sztywnym stalowym pierścieniu obwodowym o średnicy 100 m. Dźwigary przebiegają promieniście i nad środkiem areny są uchwycone wewnętrznym stalowym pierścieniem zwornikowym o średnicy 32 m. Zewnętrzny pierścień obwodowy o przekroju skrzynkowym połączony jest ze stalową konstrukcją podpór i ma za zadanie przenieść siły ściskające, a pierścień zwornikowy o konstrukcji kratowej – siły rozciągające wywołane naciągiem zakotwionych w nich kabli.

Bardzo ciekawym pod względem architektonicznym rozwiązaniem jest wsparcie na pierścieniu zwornikowym koputy – latarni. Kopuła ta składa się z dwóch części: górnej w kształcie paraboloidy obrotowej i dolnej w kształcie stożka ściętego. Na obwodzie latarni umieszczono świetliki.

Słupy, na których spoczywa konstrukcja dachu, zostały podparte przegubowo na stopach fundamentowych. Rozwiązanie to, co jest bardzo istotne, umożliwia pionowe i poziome odkształcenie się konstrukcji posadowionej w warunkach szkód górniczych.

Utrwalenie formy obiektu nastąpiło w zdecydowanie czytelnych konturach. Stożek foremny został

odwrócony i „wbity” w ziemię oraz ścięty ukośną płaszczyzną tworząc kształt budowli. Urozmaiceniem formy jest kopuła – latarnia o obrotowym kształcie umieszczona w centralnym punkcie zadaszania. Odwrócenie ciężaru bryły względem sił przyciągania ziemskiego i wyraźne pochylenie płaszczyzny przekrycia sprawia, że budowla odznacza się dynamiką kompozycji architektonicznej.

Zespół obiektów olimpijskich w Monachium, Niemcy [11] (Il. 3, 4)

Autor: Frei Otto

Realizacja: 1972 r.

Przekrycie obiektów zespołu olimpijskiego w Monachium wzniesionego na Olimpiadę w 1972 roku. Założenie obejmuje obiekty na powierzchni 78 400 m². Przekrycie określane jako największa konstrukcja dachowa świata, przekrywa trybuny 80-tysięcznego stadionu, halę sportową na 12 tysięcy widzów i basen z 7,5-tysięczną widownią oraz ciągi komunikacyjne pomiędzy tymi obiektami.

Osnowę tego kolosalnego przekrycia stanowi ortogonalna siatka cięgnowa rozpięta pomiędzy cięgnami brzegowymi. Całość podwieszona za pomocą lin do 12 masztów o wysokości 50,0 ÷ 80,0 m. Główice masztów posiadają kulisty kształt – zostały specjalnie opracowane dla wpięcia do nich lin nośnych. Stalowym masztem o przekroju rurowym nadano kształt wrzecionowaty. Poszerzenie słupa w części środkowej przeciwdziała największym wybočeniom, jakie mogłyby tu wystąpić. Słupy zamocowano przegubowo w fundamentach. Z tego względu wymagają wielokierunkowych odciągnięć kotwionych w masywnych fundamentach na terenie wokół obiektów. Konstrukcja linowa została wypełniona panelami z przyciemnionego szkła akrylowego, grubości 4 mm. Zapewnia to naturalne doświetlenie wewnątrz obiektów sportowych i ciągów komunikacyjnych.

Elementy tego wzorcowego rozwiązania były wielokrotnie powielane w innych obiektach.

Zadaszenie tworzy sekwencja namiotów, rozpiętych między wysokimi punktami – masztami. Ukształtowanie przekrycia jest przykładem, w którym odczytujemy instynktowne dążenie do korzystnego rozkładu sił. Siły ujarzmione, jakby zatrzymane w ruchu, zobrażone są w liniach i powierzchniach krzywych. Ich rozmieszczenie w przestrzeni rozstrzyga o efekcie gry podporządkowanej poszukiwaniu architektonicznej

formy. Siatka cięgnowa poprzez wielokierunkowość linii sprawia wrażenie mobilnej struktury. Prostopadły (ortogonalny) układ kabli podkreśla spójność struktury przekrycia. Wrzecionowate pylony ustroju zawieszenia swój dynamiczny charakter zawdzięczają odchyleniu od pionu. Skojarzeniem przekrycia w ujęciu całościowym jest powierzchnia wzburzonego morza lub też obcej planety usianej kraterami. Natomiast rysunek na jego powierzchni kojarzyć się może z wzorem na skrzydłach ważki czy też nietoperza.

PRZYPISY

- [1] M. Salwadori, *Siła architektury. Dlaczego budynki stoją*, Warszawa 2001, s. 260.
 [2] T. Barucki, *Architektura i architekci świata współczesnego*, Maciej Nowicki, Warszawa 1986.
 [3] M. A. Urbańska, *Arena Nowickiego*, Architektura & Biznes 1998 nr 4.
 [4] W. Borusiewicz, *Konstrukcje budowlane dla architektów*, Warszawa 1978, s. 352.
 [5] C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1964.
 [6] Sz. Palkowski, *Konstrukcje cięgnowe*, Warszawa 1994, s. 11.
 [7] A. Pawłowski, P. Trębacz, *Konstrukcje cięgnowe*, Architektura-Murator” 1997 nr 8.

- [8] System wznoszenia kopuł strukturalnych, które montuje się z wycinków na poziomie terenu i etapami podnosi w górę, jednocześnie montując osprzęt i instalacje. Podnoszenie odbywa się za pomocą podnośników hydraulicznych lub pneumatycznych. Gdy konstrukcja osiągnie docelowe położenie, brakujące pola zostają uzupełnione, a węzły usztywnione. System ten zastosowano po raz pierwszy w 1984 roku przy budowie hali sportowej w Tokio. Wg J. Rębielak, *Kształtowanie systemów konstrukcyjnych kopuł prętowo-cięgnowych*, Architektura-Murator 2000 nr 12.
 [9] M. Salwadori, *op.cit.*, s. 267.
 [10] Dane techniczne: W. Borusiewicz, *op.cit.*, s. 351.
 [11] Dane techniczne: www.eurostadiums.com.

BIBLIOGRAFIA

- Addis W., *The Art of the Structural Engineer*, Artemis, London 1994.
 Barucki T., *Architektura i architekci świata współczesnego*, Maciej Nowicki, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1986.
 Borusiewicz W., *Konstrukcje budowlane dla architektów*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1978.
 Geiger D., *Membrane Structures. Encyclopedia of architecture–design, Engineering & construction*, J. Wiley, New York 1989.

- Harbison R., *Zbudowane, niezbudowane i nie do zbudowania. W poszukiwaniu znaczenia architektonicznego*, przeł. B. Gadomska, Wydawnictwo Murator, Warszawa 2001.
 P. Jodidio, *Nowe formy. Architektura lat dziewięćdziesiątych XX wieku*, przeł. M. Motak, Warszawa 1998.
 Kuś S., Pyrak S., Reichhart A., *O perspektywach rozwoju stalowych konstrukcji dużych rozpiętości i przestrzennych*, Inżynieria i Budownictwo 2001 nr 9.
 P. Trzeciak, *Przygody architektury XX wieku*, Nasza Księgarnia, Warszawa 1974.