

Konstrukcje stalowe o dużych rozpiętościach

Wraz z postępowaniem technicznym w budownictwie rosną oczekiwania i możliwości wznoszenia obiektów o coraz większych rozpiętościach, warunkowanych względami architektonicznymi lub funkcjonalno-użytkowymi. Stal, dzięki dobrym parametrom wytrzymałościowym i wysokiej niezawodności, stwarza najszersze możliwości realizacji tego typu obiektów. Konstrukcje o dużych rozpiętościach najczęściej znajdują zastosowanie w budownictwie użyteczności publicznej, budownictwie przemysłowym i mostownictwie.

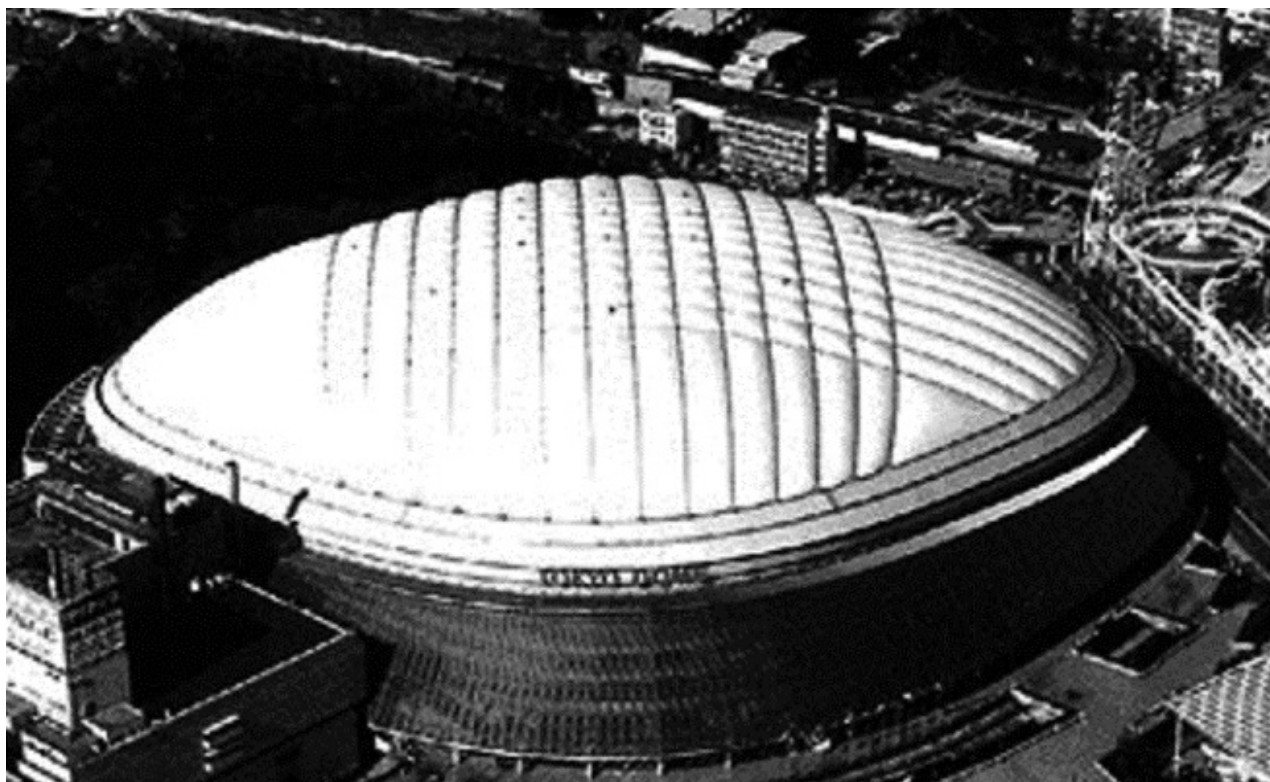
Do obiektów użyteczności publicznej należą pawilony wystawowe, sale audytoryjne i teatralne, hale sportowe i widowiskowe, dworce kolejowe i terminale lotnicze oraz stadiony z przekryciami trybun lub pełnymi zadaszeniami. Obiekty przemysłowe to najczęściej hangary i obiekty magazynowe. We współczesnych realizacjach ustrojów stalowych spotyka się różne rodzaje konstrukcji pozwalające na uzyskanie bardzo dużych rozpiętości sięgających nawet kilkuset metrów. Począwszy od elementów belkowych poprzez ustroje kratowe i ramowe dochodzimy do rozwiązań pozwalających na osiągnięcie największych rozpiętości, a więc łukowych, przestrzennych (strukturalnych) i ciągnowych.



Fot.

1. Stadion Olimpijski w Monachium (1972 r.) [3]

Początki rozwoju konstrukcji stalowych dużych rozpiętości sięgają XIX wieku, kiedy rozpoczęto produkcję stalowych lin wykorzystywanych w mostownictwie. Pierwsza połowa XX wieku zapoczątkowała zastosowanie konstrukcji stalowych dużych rozpiętości w budownictwie kubaturowym. Jednymi z pierwszych przykładów mogą tu być np. hangar z 1916 r. na dawnym lotnisku Kraków-Rakowice czy wybudowane w 1952 r. ciągnowe przekrycie Areny w Raleigh.



Fot. 2. Stadion Tokyo Dome (1988 r.) [1]

Znacznie późniejsze, ale też o większych rozpiętościach przykłady tego typu realizacji obiektów sportowych to: przekrycie obiektów zespołu olimpijskiego w Monachium (fot.1), konstrukcja kopuły „Big Egg” w Tokio (fot. 2) i zadaszenie stadionu Georgia Dome w Atlancie (fot. 3).

Jak wynika już z pierwszych przykładów, konstrukcje o dużych rozpiętościach nie są na ogół wykonywane w rzucie prostokątnym, mają charakter indywidualny, raczej okrągły lub owalny. Są projektowane indywidualnie pod kątem określonego obiektu, a typizowane ze względów technologicznych dopiero w poszczególnych elementach konstrukcji.

W przypadku konstrukcji stalowych dużych rozpiętości bardzo istotne znaczenie odgrywa masa własna. Jest to jedno z głównych obciążeń i z tego względu niska masa konstrukcji jest bardzo ważnym czynnikiem decydującym o zastosowanym rodzaju rozwiązania projektowego. Wynikającym z kryterium masy konstrukcji jest kolejny charakterystyczny aspekt projektowy – stosowanie stali o podwyższonej wytrzymałości (S355, S460 itp.) oraz w możliwie dużej ilości lekkich elementów linowych, wstępnie sprężonych i ustrojów prętowych z dużą liczbą elementów rozciąganych. Racjonalne jest ograniczanie w ustrojach prętowych ilości elementów ściskanych, dla których warunki smukłości skutkują zwiększonymi przekrojami i w efekcie większą masą całej konstrukcji. W kontekście masy konstrukcji ważne jest także zastosowanie lekkiego przekrycia dachowego. Powszechne w tego rodzaju obiektach jest stosowanie lekkich stalowych blach fałdowych o dużej sztywności, płyt z tworzyw sztucznych i elastycznych membran rozpinanych jako powłoka na prętowej konstrukcji nośnej. Generalne dążenie do osiągnięcia jak najniższej masy konstrukcji ma jednak także niekorzystne strony – konstrukcja jest bardziej wrażliwa na oddziaływanie wiatru, który staje się jednym z najważniejszych czynników projektowych wpływających na kształtowanie i zachowanie się konstrukcji. Zagadnienia te są szczególnie istotne w przypadku obiektów częściowo otwartych lub z dużymi otworami (np. bramy w hangarach), w których wiatr operuje zarówno na powierzchni zewnętrznej jak i od strony wewnętrznej. W takich przypadkach bardzo często występuje „podrywanie” konstrukcji. Pojawia się więc kwestia zmiany znaku sił wewnętrznych w jej elementach i wynikające stąd problemy konstrukcyjne z zapewnieniem stateczności ściskany elementom ustroju nośnego. Sytuacja jest dodatkowo pogarszana nierównomiernym oddziaływaniem wiatru na poszczególne fragmenty budowli. Oddzielnym zagadnieniem dotyczącym oddziaływania wiatru jest ustalenie właściwego modelu obciążenia – przy nietypowych i stosunkowo złożonych kształtach przekryć, normowe uproszczone schematy obciążenia wiatrem są często niewystarczające. W takich przypadkach pozostają badania modelu obiektu w tunelu aerodynamicznym lub modelowanie numeryczne oddziaływania wiatru przy pomocy

specjalistycznego oprogramowania CFD (Computational Fluid Dynamics).



Fot.

3. Georgia Dome w Atlancie (1992 r.) [3]

Także obciążenie śniegiem, które w typowych obiektach nie powoduje zwykle większych problemów, w przypadku konstrukcji stalowych o dużych rozpiętościach nabiera innego wymiaru. Pierwszym powodem takiego stanu rzeczy są znaczne wymiary obiektów, które utrudniają ewentualne usuwanie śniegu z dachu. Drugim, ważniejszym w kontekście odśnieżania dachu problemem, jest rodzaj poszycia. Jak napisano wyżej, często są to membrany lub lekkie płyty z tworzyw sztucznych (np. poliwęglanowe), które są podatne na mechaniczne uszkodzenia, a usuwanie z takich powierzchni śniegu jest problematyczne. Niezwykle ważne jest więc w takich przypadkach umiejętnie ustalenie wszystkich możliwych wariantów obciążenia śniegiem, tak aby ograniczyć do absolutnego minimum ewentualną konieczność interwencji związanych z odśnieżaniem dachu.

Rozwiązania konstrukcji dużych rozpiętości

W przekryciach typowych obiektów o dużych rozpiętościach, najczęściej znajdują zastosowanie konstrukcje belkowe, ramowe, ramowo-kratowe oraz łukowe pełnościenne i kratowe. Tego rodzaju rozwiązania są najbardziej powszechne ze względu na możliwość typizacji, stosunkowo niskie koszty, a przede wszystkim rodzaje budynków, w których mogą być stosowane, takich jak sklepy, galerie handlowe, obiekty sportowe (typu halowego), hangary, teatry i sale wystawowe. Rozpiętości tego rodzaju konstrukcji mogą w skrajnych przypadkach sięgać nawet 60-120 m, przy czym te najbardziej powszechne ograniczają się zazwyczaj do około 40-50 m.

Konstrukcje belkowe

Stosowanie konstrukcji belkowych o dużych rozpiętościach jest uzasadnione wówczas, gdy podpory nie mogą przejąć poziomych sił podporowych. Przy zastosowaniu podparć ścianami murowanymi, słupami betonowymi czy jednogłęziowymi słupami stalowymi kiedy możliwości przeniesienia sił poziomych są ograniczone, jednym z najważniejszych rozwiązań konstrukcji dachu są właśnie dźwigary belkowe

walcowane, ażurowe i blachownicowe przy rozpiętościach nawet do 50 m. Należy jednak zaznaczyć, że generalnie konstrukcje takie nie są zbyt ekonomiczne z punktu widzenia zużycia stali. Są natomiast proste i tanie w wytwarzaniu oraz przyjazne z punktu widzenia montażu na placu budowy.

Konstrukcje ramowe pełnościennie

Kolejną grupę ustrojów konstrukcyjnych – ramowe pełnościennie, na ogół o zmiennym przekroju lub kratownicowe – stosuje się przy większych rozpiętościach. Ramy pełnościennie mogą osiągać rozpiętości dochodzące nawet do 100 m, a ramy kratownicowe do 120 m i więcej. Znajdują one zastosowanie w konstrukcjach m.in. hangarów lotniczych, dużych hal sportowych i widowiskowych. Typowy układ ramowy dwuprzegubowy, zarówno pełnościenny jak i kratowy powoduje, że możliwe jest zastosowanie mało skomplikowanych, przegubowych oparć na fundamentach, co znacznie upraszcza kwestie zakotwienia i pozwala ograniczyć wielkość fundamentów. Pewną niedogodnością jest tu jednak konieczność przekazania na fundamenty i przejścia przez nie znacznych sił poziomych, co albo znacznie ogranicza korzystny wpływ przegubowego oparcia na wielkość fundamentów albo prowadzi do zastosowania dodatkowych elementów w postaci np. ściągow podposadzkowych przejmujących te siły. Często też stosuje się układy ramowe bezprzegubowe, pozwalające kosztem wielkości fundamentów zmniejszyć jednostkowe zużycie stali. Tego typu rozwiązania, szczególnie w przypadku ram pełnościennych, pozwalają uzyskać wysokości konstrukcji w kalenicy poniżej $1/50$ rozpiętości, co jest bardzo korzystne z punktu widzenia wykorzystania kubatury budynku.

Ustroje przestrzenne

Układy ramowe, zarówno pełnościennie jak i kratowe mogą być projektowane także jako ustroje przestrzenne, pozwalające uzyskiwać znaczne rozpiętości przy ograniczonej liczbie podpór wewnętrznych. Przykładem może tu być konstrukcja dachu, zlokalizowanej na granicy Gdańska i Sopotu, jednej z największych hal widowiskowo-sportowych w Polsce. Środkowa część konstrukcji zadaszenia (nad płytą/areną) została zaprojektowana jako przestrzenny ustrój kratowy oparty w narożach na czterech trzonach w rozstawie $66,6 \times 70,6$ m. Ustroje przestrzenne sprawdzają się też w przypadku częściowo lub całkowicie rozsuwanych zadaszeń stadionów.

Konstrukcje wspornikowe

Modyfikacją układów ramowych są powszechne w przypadku średniej wielkości stadionów, wspornikowe konstrukcje zadaszeń trybun. Są one projektowane zazwyczaj jako kratownicowe o zmiennej wysokości i wysięgach dochodzących nawet do 50 m. W przypadku większych wysięgów, wsporniki mogą być dodatkowo podwieszane linami do wystawionych ponad poszycie słupów pełniących funkcje masztów. Modyfikacją układów wspornikowych może być podparcie wsporników, usytuowanymi wzdłuż trybun, ramami lub łukami. Pozwala to uzyskać większe długości wsporników oraz znacznie ograniczyć przekroje wsporników i podpierających je słupów. Tego typu rozwiązania są też stosowane w przypadku dachów stadionów z rozsuwaną środkową częścią.

Ustroje łukowe

Innym rozwiązaniem przekryć o dużych rozpiętościach są ustroje łukowe stosowane w pawilonach wystawowych, halach sportowych, hangarach lotniczych czy przykryciach stadionów. Pozwalają one na uzyskanie podobnych, a nawet większych niż w przypadku układów ramowych, rozpiętości przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia stali. Największe rozpiętości konstrukcji łukowych są osiągnane w przypadku przekryć stadionów – przykładem jest tu kratowy łuk nad stadionem Wembley o rozpiętości około 315 m i wyniosłości 133 m. Przy rozpiętościach do około 30 m łuki są zazwyczaj elementami jednogąźziowymi, podczas gdy przy większych rozpiętościach względy ekonomiczne przemawiają często za ustrojami kratowymi, przestrzennymi. Najczęściej stosowane są łuki dwuprzegubowe, czasami trójprzegubowe i bezprzegubowe. Pierwsze rozwiązanie jest najprostsze w zastosowaniu, a ostatnie charakteryzuje się najbardziej korzystnym rozkładem momentów zginających i najmniejszą masą. Łuki bezprzegubowe są jednak najbardziej wrażliwe na zmiany temperatury i wymagają największych fundamentów. Trójprzegubowe ustroje łukowe z kolei są najbardziej wymagające w fazie montażu – konieczne jest stosowanie specjalistycznych rusztowań i urządzeń dźwigowych. W większości przypadków łukowe konstrukcje o dużych rozpiętościach, podobnie jak układy ramowe, wymagają przejścia sił rozporowych przekazywanych na fundamenty – najczęściej stosowane są sprężane ściągi podposadzkowe.

Typowe przekroje łuków pełnościennych to rury okrągłe, przekroje skrzynkowe oraz dwuteowe. W przypadku łuków przestrzennych, kratowych najczęściej stosowane są kształtowniki rurowe. Wysokość konstrukcyjna łuków, szczególnie pełnościennych, może być mniejsza niż 1/100 ich rozpiętości, a więc są to ustroje o dużej smukłości. Biorąc pod uwagę, że w tego typu konstrukcjach występują znaczne siły ściskające, szczególnie znaczenia nabiera prawidłowe uwzględnienie kwestii wybożenia łuku zarówno w jego płaszczyźnie jak i z płaszczyzny.

Ustroje strukturalne

Kolejną grupą konstrukcji stosowaną dla przekryć o dużych rozpiętościach są ustroje strukturalne. Przekrycia strukturalne będąc wieloogniwowymi, wzajemnie uzupełniającymi się ustrojami prętowymi, wykorzystują przestrzenną pracę poszczególnych elementów prętowych, wykazując przy tym dużą sztywność przy stosunkowo niskim zużyciu materiału. Siatki geometryczne przekryć strukturalnych mają regularny kształt i powtarzalne moduły. Pręty tworzące strukturę rozmieszczone są „warstwowo”, elementy pomiędzy warstwami mają stałą długość, a przekrycie zazwyczaj jednakową wysokość. Obecnie stosowane rozwiązania pozwalają na realizowanie konstrukcji o rozpiętościach dochodzących nawet do 400 m. Możemy je podzielić na jednowarstwowe (powłokowe), dwu- lub trójwarstwowe w układach jedno- i dwukrzyżwiznowych.

Rozróżniając sposoby ich prefabrykacji wyróżnia się systemy z oddzielnych prętów i węzłów, systemy rusztów kratowych i układy mieszane. Tego rodzaju przekrycia stosowane są obecnie również ze stopów aluminiowych, dających większą lekkość konstrukcji dachu. W przypadku przekryć strukturalnych wielowarstwowych stosunek wysokości konstrukcji do jej rozpiętości zawiera się na ogół w przedziale 1/60-1/100, a w przypadku konstrukcji powłokowych stosunek ten może być znacznie mniejszy. Ze względu na rodzaje węzłów i stosowanie jednogłęziowych prętów struktury, do tego rodzaju konstrukcji wykorzystuje się głównie kształtowniki rurowe okrągłe lub zamknięte kwadratowe.

Konstrukcje cięgnowe

Odrębnym, najszybciej rozwijającym się obecnie typem przekryć o dużych rozpiętościach są konstrukcje cięgnowe. Składają się one z pokrycia, układów cięgnowych i konstrukcji wsporczej. Należą one do najbardziej korzystnych ekonomicznie przekryć stadionów, pływalni i dużych obiektów sportowych. W tego rodzaju obiektach bez podparć pośrednich możliwe jest uzyskiwanie przekryć o rozpiętościach do 400 m. Ze względu na dużą różnorodność obiektów, dla których stosuje się przekrycia cięgnowe, ustroje te można podzielić na:

- ustroje cięgnowe płaskie
- ustroje cięgnowe przestrzenne
- przekrycia cięgnowe typu zamkniętego
- przekrycia cięgnowe typu otwartego.

Rozwiązania te mogą się wzajemnie przenikać - mogą więc być mieszane i stosowane wymiennie, zależnie od oczekiwanego efektu architektonicznego.

Wiotkie i lekkie elementy linowe są podatne na drgania, a niewielkie ich przekroje skutkują znacznymi przemieszczeniami konstrukcji pod wpływem obciążeń grawitacyjnych i wiatru - przemieszczenia te, przy bardzo dużych rozpiętościach osiągają czasami wartości kilku metrów. Niewielka masa i bardzo mała sztywność ustrojów linowych wymusza stosowanie elementów usztywniających, sztywnego pokrycia, dociążenia warstwami poszycia lub cięgien napinających, które umożliwiają wstępne sprężenie konstrukcji.

Rozwiązania takie są konieczne ze względu na ssące działanie wiatru na lekką konstrukcję oraz inne oddziaływania dynamiczne. Sprężenie cięgien umożliwia jednocześnie formowanie różnych kształtów dachów oraz pozwala na prawidłową pracę konstrukcji przy niesymetrycznych obciążeniach. Najbardziej rozpowszechnionym kształtem tego rodzaju przekryć są dachy owalne i kołowe, które stosowane są na przekrycia stadionów, aren sportowych i widowiskowych [6]. Wykorzystuje się w nich cięgna z lin i prętów stalowych, wykonywanych ze stali o podwyższonej zawartości węgla, z dodatkiem chromu, niklu i miedzi, uzyskujących wytrzymałości do 2400 N/mm².

Jednym z najbardziej rozpoznawalnych przekryć tego rodzaju na terenie Polski jest dach Stadionu Narodowego z powierzchnią przekraczającą 60 000 m², na którą wykorzystano ponad 37 km lin stalowych (fot. 4). Sprężona konstrukcja eliptycznego dachu przypominająca koło rowerowe z napiętymi szprychami

jest przestrzennym ustrojem ciągnowym utrzymującym w części środkowej iglicę o masie około 190 ton. Główna konstrukcja stalowa zadaszenia stadionu ma masę około 12 000 ton, a konstrukcje pomocnicze z iglicą, około 2400 ton. Liny o masie około 1700 ton (wraz z okuciami) są podtrzymywane przez wieńczącą koronę dachu stadionu, oparty na 72 rurowych słupach stalowych, obwodowy ring ściskany o przekroju rurowym $\varnothing 1820 \times 80$ mm oraz podwieszony do 72 zastrzałów z odciągami. Najtrudniejszym technologicznie etapem robót było podniesienie linowej konstrukcji dachu wraz z iglicą, przeprowadzone w ciągu 3 tygodni, na przełomie 2010 i 2011 r. Obiekt oddano do użytku w kwietniu 2012 r. Stadion może jednocześnie pomieścić ponad 58 tys. osób w czasie meczu piłkarskiego i 72 tys. osób na widowisku koncertowym.



Fot.

4. Konstrukcja dachu Stadionu Narodowego w Warszawie

Uwagi końcowe

Rozwój masowych imprez sportowych, wystawiennictwa i widowisk powoduje, że wzrasta zapotrzebowanie na obiekty o dużych rozpiętościach bez wewnętrznych podpór pośrednich. Stosuje się nowe, coraz lepsze poszycia wykonane z tkanin z włóknem szklanym pokrytych PTFE, nowe rodzaje lin i cięgien z coraz lepszymi splotami i bardziej odpornych na pełzanie pod długotrwałym obciążeniem. Stal jako materiał konstrukcyjny w stosunku do jej ceny i parametrów wytrzymałościowych jest obecnie najlepszym materiałem pozwalającym na projektowanie przekryć o dużych rozpiętościach. Jednocześnie coraz lepsze narzędzia do analizy konstrukcji pozwalają bezpiecznie projektować ustroje o najbardziej nawet wyrafinowanych i złożonych kształtach, co z kolei wychodzi naprzeciw oczekiwaniom dotyczącym zaspokajania rosnących wymagań estetycznych, jakie są stawiane nowoprojektowanym obiektom.

Literatura

1. Karczewski J. A., Wierzbicki S., *Przestrzenne konstrukcje przekryć stadionów w Japonii*, Inżynieria i Budownictwo, 2003, część 1, nr 6, str. 308-312.
2. Kobiela S., *Przekrycia stalowe dużych rozpiętości*, Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk, 7-10 marca 2012, tom I, str. 1-128.
3. www.stadiony.net.
4. Tofil J., *Rozwój współczesnych przekryć o konstrukcji ciągnowej*, Biblioteka cyfrowa Politechniki

Krakowskiej, str. 381-386.

5. Kubicki J., Kośnik J., *Stadion Narodowy*, BOSZ, Olszanica, 2014.

6. Cwyl M., *Konstrukcje cięgnowe w budownictwie wielkopowierzchniowym*, Świat Szkła 11 (113),
Warszawa, 11.2007.

dr inż. Maciej Cwyl

dr inż. Stanisław Wierzbicki

Politechnika Warszawska