

dr inż. Ireneusz Cała<sup>1)</sup>  
 ORCID:0000-0002-5266-7128  
 dr inż. Anna Józwik<sup>1\*)</sup>  
 ORCID: 0000-0003-3252-5357

# Konstrukcje cięgnowe w fasadach szklanych

## *Cable structures in glass facades*

DOI: 10.15199/33.2019.10.04

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy kształtowania konstrukcji cięgnowych stosowanych w elewacjach przeszklonych o dużej powierzchni. Z uwagi na różnorodność rozwiązań przyjęto systematykę i scharakteryzowano ustroje cięgnowe z podziałem na ich pracę jedno- i dwukierunkową. Zwrócono uwagę na rolę łączników punktowych stosowanych do połączenia szkła z cięgnami oraz rozwiązań materiałowych samych przeszkleń. W artykule podano i przeanalizowano przykłady realizacji z zastosowaniem konstrukcji cięgnowych w elewacjach.

**Słowa kluczowe:** szkło strukturalne; szklane fasady; konstrukcje cięgnowe.

**Abstract.** The article concerns the shaping of cable-stayed structures used in glazed facades with large surfaces. Due to the variety of solutions, systematics were made and cable systems were characterized with a division into their one- and two-way work. Attention was paid to the role of point connectors used to connect glass with cables and material solutions of the glazing itself. The article presents and analyzes examples of implementation using the cable-stayed structures in facades.

**Keywords:** structural glass; glass facades; cable structures.

**K**onstrukcje cięgnowe są często stosowane w obiektach architektonicznych i inżynierskich. Jednym z obszarów ich wykorzystania mogą być przeszklone fasady. Na rozwój rozwiązań wykorzystujących szkło i ustroje cięgnowe miał wpływ m.in. wybitny konstruktor Peter Rice. Zawodowo związany z biurem inżynierskim ARUP, założył w 1982 r. biuro projektów RFR zajmujące się projektami z zastosowaniem szkła strukturalnego. Z tego okresu pochodzą przełomowe rozwiązania szklanej piramidy w Muzeum w Luvrze, czy Muzeum Nauki i Przemysłu w Parku de la Villette w Paryżu. Konstrukcje cięgnowe ciągle są uznawane za rozwiązania nowoczesne i skuteczne w przypadku występowania dużych powierzchni przeszklonych [2, 7] w budynkach biurowych, użyteczności publicznej oraz innych (tabela), w których pojawiają się atria, czy reprezentacyjne hole. Z reguły, ze względu na dużą wysokość elewacji, konieczne jest ukształtowanie ustroju konstrukcyjnego przeszklonej fasady. Zarazem poszukuje się rozwiązań, w których elementy nośne są zredukowane do minimum, aby uzyskać lekkość i transparentność przeszklonej elewacji.

### Wybrane realizacje z fasadami o konstrukcji cięgnowej (opracowanie autorów) *Selected projects with cable structure facades (authors' development)*

Nazwa budynku, lokalizacja, data realizacji, architekt	Projektant fasady	Typ konstrukcji fasady	Wymiar fasady [m]	Podział szkła [m]
Hotel Kempinski (obecnie Hilton Hotel), Monachium, 1990, arch. Murphy/Jahn	Schlaich Bergermann und Partner	siatka płaska	40 x 25	1,5 x 1,5
Uniwersytet Bremeński, Bremen, 2000, arch. Jan Störmer	Werner Sobek	układ lin pionowych	22 x 15; 43,5 x 15	1,8 x 0,9
Time Warner Center, Nowy Jork, 2003, arch. Kemal Abadan/SOM	Schlaich Bergermann und Partner	siatka dwukrzywiznowa	27 x 45	2,14 x 2,44
Station Place: Security & Exchange Commission Headquarters, Waszyngton, 2004, arch. Kevin Roche John Dinkeloo and Associates	Thornton Tomasetti	siatka dwukrzywiznowa	18 x 27	1,5 x 1,5
Lufthansa Aviation Center, Frankfurt n. Menem, 2005, Ingenhoven Architect	Werner Sobek	układ podwójnych lin pionowych	20 x 26	1,45 x 3,45
Poly Corporation Headquarter, Pekin, 2007, arch. SOM	SOM	siatka płaska	60 x 90	1,33 x 1,38
Alice Tully Hall, 2009 arch. Diller Scofidio + Renfro	RA Heintges architects consultants	układ lin pionowych	max. wysokość 13,7	1,78 x 4,88
Europejski Bank Inwestycyjny, Luksemburg, 2008, arch. Ingenhoven Architect	Werner Sobek	układ lin pionowych	45 x 22	3,6 x 1,8
ThyssenKrupp Quartier, Essen, 2010, arch. JSWD Architekten, Chaix & Morel et Associés	Werner Sobek	siatka płaska	26 x 28	2,15 x 3,6
Enzo Ferrari Museum, Modena, 2012, arch. Future Systems (Jan Kaplický)	Werner Sobek	układ lin pionowych	62 x 6 ÷ 11	max. 2,0 x 1,25
Market Hall, Rotterdam, 2014, arch. MVRDV	Octatube	siatka płaska	42 x 35	1,5 x 1,5
Doha Convention Center, Doha, 2015, arch. Helmut Jahn	Werner Sobek	układ lin poziomych	297 x 30, max. długość lin 18	3,0 x 1,4
PNC Tower, Pittsburg, 2015, arch. Gensler	Heintges & Associates, Buro Happold	układ lin pionowych	29 x 20	2,2 x 4,4
Sony Center – Hotel Esplanade, Berlin, 2000, arch. Murphy/Jahn	Werner Sobek	układ lin pionowych	60 x 20	2,0 x 2,0

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska; Wydział Architektury  
<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: anna.jozwik@pw.edu.pl

## Charakterystyka konstrukcji ścięgowych stosowanych w fasadach

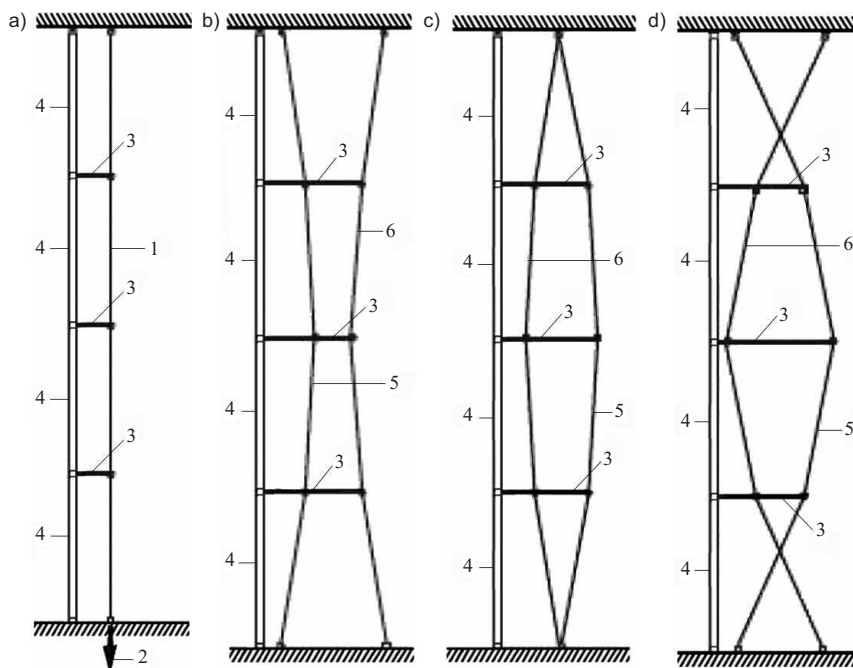
Przeszkłone elewacje obiektów kubaturowych są kształtowane za pomocą paneli szklanych mocowanych liniowo lub punktowo do stropów, a w przypadku elewacji bardzo dużej wysokości, do konstrukcji wsporczych. Konstrukcje wsporcze, mocowane do konstrukcji głównej budynku, mogą być zarówno elementami sztywnymi (belki, kratownice, struktury), jak i wiotkimi (wiązary ścięgnowe, liny, siatki). Występują także systemy mieszane, w których sztywne słupy wspomagane są układami ścięgowymi lub kształtowane są wiązary prętowo-ścięgnowe.

Systemy ścięgnowe (wiszące) dają większą swobodę w kształtowaniu przeszklonych fasad niż systemy o podporach sztywnych. Układy ścięgnowe można podzielić statycznie na schematy pracujące jednokierunkowo i dwukierunkowo (krzyżowo). W pierwszym przypadku konstrukcja wsporcza fasady jest zazwyczaj mocowana do stropów budynku. W przypadku schematów krzyżowych siły od konstrukcji wsporczych przekazywane są również na ściany boczne. Praca krzyżowa może dotyczyć tylko działania wiatru. Ciężar elewacji jest przenoszony wyłącznie przez ścięgna pionowe, nawet w przypadku krzyżowej pracy ustroju. Często stosuje się podwójne liny pionowe, co poprawia również stateczność słupków mocujących elewację.

Zwykle są projektowane układy symetryczne, zarówno w pionie, jak i w poziomie. Asymetria tych ustrojów powoduje wprowadzenie nierównomiernego napięcia lin, co komplikuje ich stateczność. Układ konstrukcyjny powinien być dobrany w sposób zapewniający identyczną pracę zaprojektowanych połączeń oraz równomierne rozłożenie sił w linach i zakotwieniach.

Wśród systemów pracujących jednokierunkowo, mocowanych do poziomych konstrukcji nośnych (stropy, kratownice dachowe itp.), można wyróżnić cztery podstawowe typy (rysunek 1):

- fasady wiszące na naprężonych linach;
- wiązary ścięgnowe;
- wiązary prętowo-ścięgnowe;
- wiązary w układzie mieszanym.



1 – lina główna; 2 – siły napinające; 3 – słupki mocujące szkło; 4 – szyby; 5 – lina pracująca na parcie wiatru; 6 – lina pracująca na ssanie wiatru

**Rys. 1. Fasady o konstrukcji ścięgnowej pracujące jednokierunkowo: a) konstrukcja linowa; b) wiązary ścięgnowe; c) wiązary prętowo-ścięgnowe; d) konstrukcja mieszana**

*Fig. 1. Cable structures works one-way direct: a) cable mullions; b) cable trusses; c) cable trusses with rods; d) mixed cable truss systems*

**Konstrukcja linowa i wiązary ścięgnowe** składają się z lin rozciąganych, które przenoszą ciężar elewacji oraz pracują na działanie wiatru. Konstrukcja linowa wymaga wstępnego napięcia ze względu na siły poziome od wiatru. Wiązary ścięgnowe składają się z dwóch głównych ścięgien nośnych o odwrotnych krzywiznach. Ściągno usytuowane bliżej elewacji pracuje na parcie wiatru, a ścięgno oddalone od elewacji – w czasie ssania wiatru. Łączniki poziome, które mogą być ścięgniami, praktycznie wykonuje się z prętów okrągłych, aby poza utrzymaniem kształtu wiązara mogły stanowić mocowanie szyb.

**Wiazary prętowo-ścięgnowe** działają podobnie, a kształt obustronnie wypukły otrzymuje się przez zastosowanie prętów rozpięających. Pręty te, umieszczone na wysokości podziałów elewacji, są przedłużane w jej kierunku, aby stanowić podporę paneli szklanych.

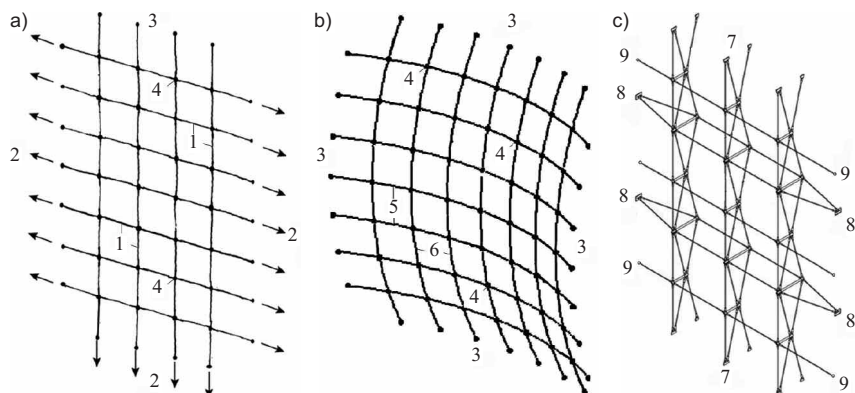
Szerokość (głębokość) wiązara ścięgowego zależy od wielkości sił poziomych. Przy większych siłach wymagane jest większe wygięcie lin, co zmniejsza wychylenia elewacji. Tworzenie smukłych wiązarów powoduje nie tylko wzrost przemieszczeń poziomych,

ale również zwiększenie sił pionowych przekazywanych na konstrukcję. Standardowe proporcje wiązara można przyjąć na 1/6 do 1/8 jego wysokości. Wiązary o proporcjach L/10 wymagają wstępnego napięcia lin.

**Układy mieszane** są kształtowane w celu zmniejszenia szerokości wiązara. Wiązary ścięgnowe mają duży rozstaw podpór, a prętowo-ścięgnowe są szersze na środku wysokości. Projektanci, chcąc zminimalizować wielkość olinowania, często stosują układy mieszane, w których wygięcie ścięgien się nie zmienia, a całkowita szerokość układu jest mniejsza.

Jako konstrukcje wsporcze przeszklonych fasad są stosowane także układy z wiązarami ścięgowymi kształtowanymi poziomo. Mocuje się je do słupów konstrukcyjnych. Jednak w tych przypadkach wiązary ścięgnowe przenoszą tylko siły poziome wiatru, a ciężar szkła przekazywany jest dodatkową linią umieszczoną w linii elewacji i mocowaną do górnego stropu. Możliwe jest zastosowanie zarówno wiązarów ścięgowych, jak i prętowo-ścięgowych.

Wśród systemów pracujących dwukierunkowo (krzyżowo) występują (rysunek 2):



1 – liny nośne; 2 – siły napinające; 3 – złącza stałe; 4 – węzły siatki (mocowanie szkła); 5 – liny pracujące na parcie wiatru; 6 – liny pracujące na ssanie wiatru; 7 – wiązary ciągnowe pionowe; 8 – wiązary ciągnowe poziome; 9 – liny drugorzędne (napinające)

**Rys. 2. Fasady o konstrukcji ciągnowej pracujące dwukierunkowo: a) siatki płaskie; b) siatki krzywoliniowe; c) układy rusztowe**

*Fig. 2. Cable structures works two-way direct: a) flat cable-nets; b) double-curved cable-nets; c) cable truss systems*

- siatki płaskie;
- siatki krzywoliniowe tworzące powierzchnię siodłową;
- układy rusztowe wiązarów ciągnowych.

**Siatki płaskie** wymagają napięcia cięgien w obu kierunkach, aby utrzymać płaszczyznę elewacji, a **systemy siodłowe** są samonapinające się. Siatka krzywoliniowa jest w stanie przekazać ciężar paneli szklanych na strop górnej kondygnacji jedynie wtedy, gdy płaszczyzna elewacji podąża za jej krzywizną. Jeśli elewacja jest płaska, siatka pracuje tylko na poziomie siły wiatru, a ciężar szkła trzeba powiesić na dodatkowych linach.

**Układy rusztowe**, dość często spotykane, są to ustawione prostopadle do siebie wiązary ciągnowe mocowane do stropów i bocznych ścian nośnych. Kratownice pionowe przenoszą ciężar elewacji i razem z kratownicami poziomymi pracują na działanie wiatru. Proporcje szerokości rusztu do wysokości kondygnacji są korzystniejsze w stosunku do układów jednokierunkowych.

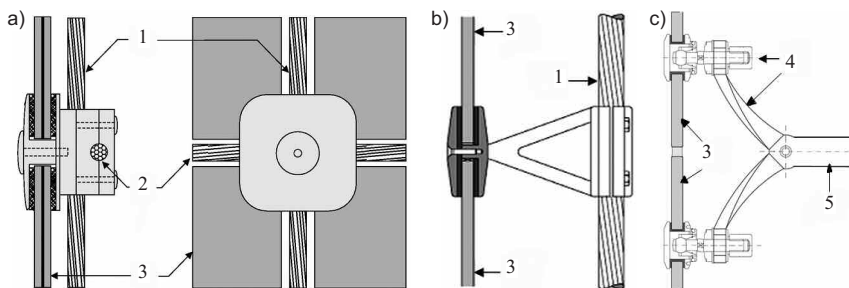
Ważnym elementem przy realizowaniu fasady w systemie ciągnowym jest sprężanie konstrukcji, szczególnie w przypadku siatek, gdzie kluczowa staje się kolejność sprężania poszczególnych cięgien i krzywulców oraz sposób weryfikacji sprężania. Konieczna jest często zmiana napięcia cięgien. Musi więc być zaprojektowany dostęp do siłowników lub mogą być one sterowane elektronicznie.

Rozwiązania z zastosowaniem konstrukcji ciągnowych pozwalają uzyskać

mnijšie wymiary gabarytowe poszczególnych elementów fasady, w tym łączników. Łączniki mocujące panele szklane konstruowane są jako punktowe niezależnie od systemu ciągnowego. Rozróżnia się trzy podstawowe typy łączników (rysunek 3):

- mocowane bezpośrednio do cięgien;
- mocowane pośrednio do cięgien;
- łączniki czteroramienne typu „spider” mocowane do słupków wiązarów ciągnowych.

Dla konstrukcji ciągnowych stosowanych w przeszklonych elewacjach powstało wiele systemów, które oferują kompletne detale połączeń cięgien i szkła. Na rysunku 3 przedstawiono ogólne zasady połączeń, sposób usytuowania lin oraz złączy w stosunku do płaszczyzny fasady. Istnieją przykłady realizacji, w których łączniki kształtują się w sposób indywidualny. Uwzględnić się m.in. uwarunkowania geometryczne, ale również przesłanki estetyczne.



1 – ciągnio główne pionowe; 2 – ciągnio główne poziome; 3 – szyby; 4 – czteroramienne łącznik typu „spider”; 5 – słupek wiązara ciągnowego

**Rys. 3. Łączniki mocujące punktowo szkło do cięgien: a) bezpośrednio do cięgien; b) pośrednio do cięgien; c) łączniki czteroramienne typu „spider”**

*Fig. 3. Point-fixed glass connectors to cables: a) directly to cables; b) indirectly to cables; c) spider fittings*

W fasadach o konstrukcjach ciągnowych szkło mocowane jest punktowo w narożnikach. Podział powierzchni przeszklonych jest skoordynowany z rozstawem elementów konstrukcyjnych. Jak pokazują dane w tabeli, gabaryty szyb stosowanych w fasadach o konstrukcjach ciągnowych nie są mniejsze niż 1,5 x 1,5 m. Rozwój technologii szkła pozwala obecnie na kształtowanie większych podziałów. Sprzyja temu możliwość laminowania szkła folią PVB, czy SentryGlas®. Jak wykazują badania [6], szkło klejone, szczególnie folią SentryGlas®, pozwala na zmniejszenie grubości tafli, a w efekcie ciężaru szkła w elewacji, co jest rozwiązaniem korzystnym, gdyż zmniejsza wartość sił w cięgnach poziomych. Dobór szkła stosowanego w przeszkleniach o konstrukcjach ciągnowych jest również istotny ze względu na rozkład naprężeń występujących przy mocowaniu punktowym [5].

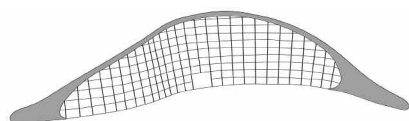
### Przykłady realizacji z zastosowaniem konstrukcji ciągnowych w przeszklonych fasadach

W przeszklonych fasadach często stosowany jest układ pojedynczych lub podwójnych lin, które pracują na rozciąganie. Wykorzystuje się wtedy stalowe cięgna o dużej wytrzymałości. Jednym z przykładów takiego rozwiązania jest budynek galerii w **Muzeum Enzo Ferrari w Modenie** (fotografia 1). Cechą specyficzną tego obiektu jest jego nieregularna bryła nawiązująca do stylistyki motoryzacyjnej. Zakrzywiony kształt znalazł swoje odzwierciedlenie również w przeszklonej fasadzie (rysunek 4) pochylonej o kąt 12,5°. Z zewnątrz wi-



Fot. 1. Budynek Muzeum Enzo Ferrari w Modenie

Photo. 1. Enzo Ferrari Museum in Modena



Rys. 4. Układ cięgien i podział szkła w fasadzie krzywoliniowej

Fig. 4. Arrangement of cables and glass division in the curvilinear facade

doczna jest jej wklęsła oraz wybrzuszona część, gdyż geometrycznie elewacja jest zdefiniowana przez dwie stożkowe powierzchnie [1]. Fasada została tak ukształtowana, aby można było zastosować płaskie szyby, co znacznie ułatwiło proces wytwarzania i montażu.

Fasada jest podwieszona do dźwigara stalowego, za pomocą pojedynczych cięgien ze stali nierdzewnej średnicy 32 mm i zróżnicowanej długości 6–11 m. Główny dźwigar ma przekrój rury okrągłej średnicy 1000 mm. Cięgna zostały wstępnie napięte przez ich sprężenie siłą  $80 \div 330$  kN, co pozwoliło ograniczyć przemieszczenia poziome. Cięgna zamocowano do elementów konstrukcyjnych za pomocą połączeń widelkowych. W fasadzie zastosowano szyby zespolone o maksymalnych wymiarach 2 x 1,25 m, składające się od zewnątrz ze szkła hartowanego grubości 10 mm, a od wewnątrz z dwóch warstw szkła półhartowanego grubości 6 mm, klejonego folią SentryGlas®Plus. Przerwa międzyszybowa w szybie zespolonej została wypełniona argonem, a przerwy między tafłami szkła połączone silikonem konstrukcyjnym. Przy jego doborze uwzględniono nierównomierne obciążenie wynikające z krzywizny fasady.

Przy większych wymiarach przeszklonych elewacji stosuje się siatki cięgnowe. Jednym z przykładów takich realizacji jest **budynek Markthal w Rotterdamie**.

W założeniach projektowych obiekt miał połączyć funkcje mieszkaniową i handlową. Halę targową umieszczono wewnątrz dwóch bloków, które zostały ze sobą połączone najwyższą kondygnacją, tworząc przekrycie hali (fotografia 2). W tak ukształtowanej bryle powstał „tunel” o długości ok. 120 m, wysokości 35 m i szerokości 42 m, w którym z obu stron jego wylotu znajduje się przeszklona ściana szczytowa.



Fot. 2. Budynek Markthal w Rotterdamie

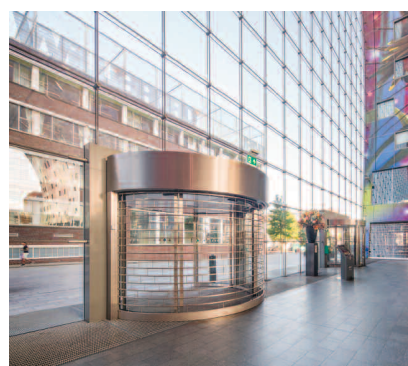
Photo. 2. Markthal building in Rotterdam

Konstrukcję przeszklonej fasady stanowi układ 22 pionowych i 26 poziomych cięgien stalowych tworzących siatkę, która pracą statyczną nawiązuje do rakiety tenisowej. Przy największym obciążeniu wiatrem siła w cięgnię zwiększa się do 105 kN, co powoduje jego wydłużenie o 37 mm, a w konsekwencji przyczynia się do największych przemieszczeń ustroju konstrukcyjnego, wynoszących w centralnej części siatki 700 mm [4], stanowiąc 1/50 jej rozpiętości [8]. Do obliczeń przyjęto również sytuacje wyjątkowe, jak np. obciążenie wiatrem w czasie huraganu o sile 12° w skali Beauforta. W analizach obliczeniowych, ze względu na zastosowanie cięgien stalowych, uwzględniono również obciążenia termiczne wynikające z różnicy temperatury pomiędzy latem (65°) a zimą (4°) [4].

Wszystkie cięgna mają średnicę 31,3 mm i wykonano je ze stali PG90 o wytrzymałości na rozciąganie 884 kN. Dość istotnym zagadnieniem przy zastosowaniu konstrukcji cięgnowych jest ich zakotwienie. W przypadku tej realizacji cięgna zostały wstępnie sprężone i zakotwione w blokach kotwiących w postaci odlewanych skrzynek stalowych o grubości ścianki 6 mm. Skrzynki umieszczono w szczytowej ścianie żelbetowej grubości 30 mm. Cięgna zo-

stały sprężone siłą o maksymalnej wartości 300 kN, w tym 50 kN stanowi nadatek wynikający z uwzględnienia zjawiska pełzania w betonie. Warto również dodać, że zastosowane cięgna w fasadzie są jednakowe, ale różnią się siłą sprężenia. Cięgna pogrupowano ze względu na kolejność ich sprężania, co było konieczne z uwagi na obciążenia przekazywane na żelbetową ścianę.

Układ cięgien w siatce o oczku 1485 x 1485 mm wyznacza podział przeszkleń. Zastosowano szybę ze szkła laminowanego z dwóch warstw szkła hartowanego (2 x 6 mm). Szyby są mocowane w narożnikach do złącza, o kształcie cylindra, które łączy cięgno pionowe z cięgnem poziomym (fotografia 3). Odległość od poziomych cięgien do przeszkleń wynosi 150 mm, a odległość od pionowych cięgien 100 mm. W fasadzie umieszczono 3 wejścia z samonośnymi drzwiami obrotowymi, oddzielone od stalowej ramy portalowej stano-

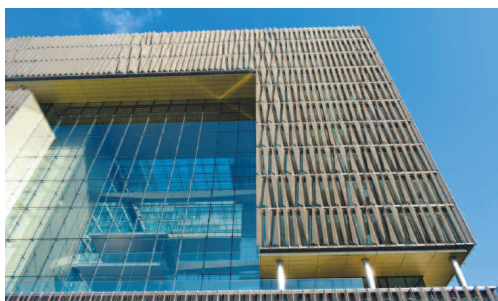


Fot. 3. Konstrukcja siatkowa w fasadzie budynku Markthal w Rotterdamie

Photo. 3. Cable-net structure façade in the Markthal building in Rotterdam

wiącej konstrukcję wejścia. Rama pracuje razem z siatką. Przyjęto, że maksymalny jej obrót będzie wynosił 5°.

W celu efektywniejszej pracy systemów cięgnowych można stosować podwójne cięgna. Wykorzystano je m.in. w **siedzibie firmy ThyssenKrupp w Essen**, w której znajduje się atrium z dwoma panoramicznymi oknami o wymiarach 26 x 28 m. Ich konstrukcję wsporczą stanowi siatka płaska (fotografia 4). Układ cięgien w siatce jest skoordynowany z podziałem powierzchni przeszklonej na tafle szkła o wymiarach 2,15 x 3,60 m. W poziomie występują pojedyncze, wstępnie naprężone, cięgna średnicy 32 mm mocowa-



Fot. 4. Siedziba firmy ThyssenKrupp w Essen  
Photo. 4. ThyssenKrupp Quartier in Essen

ne do żelbetowej konstrukcji budynku. W kierunku pionowym jest para, wstępnie naprężonych, cięgien średnicy 30 mm. Podwójne cięgna wytwarzają parę sił przenoszących ciężar szkła [9]. Cięgna wykonano ze stali węglowej gatunku S355, która charakteryzuje się większą wytrzymałością i mniejszą rozszerzalnością termiczną w porównaniu ze stalą nierdzewną. Wytrzymałość cięgien na rozciąganie wynosi 1770 MPa.

W fasadzie starano się zminimalizować liczbę szyb, dlatego też przyjęto większe niż w podobnych rozwiązaniach wymiary szkła. Zastosowano szyby zespolone, w których na zewnątrz znajduje się szkło hartowane grubości 12 mm, od wewnątrz dwie warstwy szkła grubości 8 mm klejone folią PVB. Przestrzeń międzyszybowa wynosi 16 mm. Szyby zespolone są mocowane w narożnikach oraz dodatkowo w środku ich wysokości. Zastosowane łączniki były indywidualnie kształtowane, tak aby wraz z mocowaniem szyb połączyć cięgna pionowe i cięgno poziome.

Oprócz siatek płaskich, stosowanych jako konstrukcje cięgnowe w elewacjach, można wskazać rozwiązania z dwukrzywiznową siatką [7]. Tych rozwiązań nie ma zbyt wiele, a jednym z nich jest fasada w siedzibie amerykańskiej Komisji Papierów Wartościowych i Giełd w Waszyngtonie (fotografia 5). Przeszkłona ściana wraz z dachem jest elementem atrium, które pełni rolę reprezentacyjną (z głównym wejściem). Fasada o wymiarach 18 x 27 m jest zawieszona na zakrzywionej w planie kratownicy przestrzennej opartej na żelbetowej konstrukcji po bokach atrium. Siatka składa się z 15 rzędów cięgien poziomych i 12 rzędów cięgien pionowych średnicy 28 mm. Przeciwnie krzywizny nadają siatce kształt siodła,

co zapewnia stabilność przeszklonej ściany (fotografia 6). Krzywoliniowy kształt siatki skomplikował sposób mocowania szyb do cięgien. Opracowano innowacyjny system wewnętrznego obramowania płaskich szyb zespolonych, o wymiarach 1,5 x 1,5 m, mocowanych do złączy w węzłach siatki.



Fot. 5. Budynek Komisji Papierów Wartościowych i Giełd w Waszyngtonie  
Photo. 5. Security & Exchange Commission Headquarters in Washington



Fot. 6. Dwukrzywiznowa siatka cięgnowa w budynku Komisji Papierów Wartościowych i Giełd w Waszyngtonie  
Photo. 6. Double-curved cable-net in the Security & Exchange Commission Headquarters in Washington

## Podsumowanie

Konstrukcje cięgnowe są jednym z rozwiązań stosowanych w przeszklonych elewacjach o dużej wysokości. W artykule dokonano systematyki tych konstrukcji ze względu na sposób ich kształtowania i pracy statycznej. Warto dodać, że obecnie alternatywnym rozwiązaniem dla konstrukcji wsporczych w fasadach o wysokości do 15 m mogą być szklane żebrza (istnieją też nieliczne zrealizowane obiekty o wyższej wysokości). Z tego powodu wiązary cięgnowe są często zastępowane przez rozwią-

zania, w których redukuje się do minimum elementy konstrukcyjne ze stali. W przypadku wyższych fasad nadal duże możliwości ich kształtowania dają konstrukcje cięgnowe, szczególnie pracujące dwukierunkowo (siatki płaskie, siatki dwukrzywiznowe, czy ruszty cięgnowe lub mieszane). Sprzyja temu rozwój technologii szkła oraz duże możliwości kształtowania łączników.

Fot. 1. ©Ferrari; Fot. 2. Francesca Bertolani, CC BY-SA 4.0; Fot. 3. ©MVRDV; Fot. 4. ©Mioulet/STACKDOOR; Fot. 5. Jean Housen, CC BY-SA 4.0; Fot. 6, 7 © Ron Bunt/KRIDA  
Rys. 1, 2, 3. – I. Cala; Rys. 4. – A. Józwick na podstawie [2]; Rys. 5, 6 – ©MVRDV

## Literatura

- [1] Blandini Lucio, Timo Schmidt, Thomas Winterstetter. 2013. „Das Enzo Ferrari Museum – eine zweier Designwelten. *Stahlabu* Vol. 82, Issue S1 Supplement: Glasbau: 1 – 10. <https://doi.org/10.1002/stab.201390058>. Dostęp: 2019.08.25.
- [2] Blandini Lucio. 2016. „Transparent, Complex, Sustainable Challenges for Contemporary Façade Engineering”. *Challenging Glass 5 – Conference on architectural and Structural Application of Glass*. <https://doi.org/10.7480/cgc.5.2235>. Dostęp: 2019.08.25.
- [3] Blandini Lucio, Walter Grasmung. 2018. „The search for dematerialized building envelopes – the role of glass and steel”. *Steel Construction* Vol. 11, Issue 2: 140 – 145. <https://doi.org/10.1002/stco201810023>. Dostęp: 2019.08.25.
- [4] Eekhout Mick, Peter van de Rotten. 2014. „Cable stayed glass façade in the Market hall – Rotterdam”. W: *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference*, (Red.) Louter Christian, Bos Freek, Belis Jan, Lebet Jean-Paul, str. 577-584. Londyn. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [5] Feng Ruo-qiang, Ye Ji-hong, Wu Yue, Shen Shi-zhao. 2012. „Mechanical Behavior of glass Panels Supported by Clamping Joints in Cable Net Facades”. *International Journal of Steel Structures*, Vol. 12, No. 1: 15 – 24. DOI: 10.1007/s12296-012-1002-5.
- [6] Józwick Anna. 2017. „O możliwościach stosowania szkła w elementach konstrukcyjnych”. *Inżynieria i Budownictwo* (9): 459 – 262.
- [7] Patterson Mic. 2011. *Structural Glass and Facades Enclosures*. Hoboken. Wiley.
- [8] Piyasena R. R. C., David Thambiratnam, Tommy Cham, Nimal Perera. 2019. „Comparative analysis of blast response of cable truss and cable net façades”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 104: 740 – 757. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.056>. Dostęp: 2019.08.25.
- [9] Solla Ignacio Fernández. 2010. „ThyssenKrupp Quarter facades: a giant's gentle skin”. <http://facadesconfidential.blogspot.com/2010/12/thyssenkrupp-quarter-facades-giants.html>. Dostęp: 2019.08.25.

Przyjęto do druku: 25.08.2019 r.