

dr inż. arch.
Alicja Maciejko

Inspiracje w architekturze

Część 3. Statyka (konstrukcja)

Dynamiczne rozwiązania konstrukcyjne pojawiły się w architekturze na początku XX wieku. Ze względu na liczne rewolucyjne, konstrukcyjne dokonania architektura ta bywa nazywana „symbolem stanów równowagi”.

Architektura – w swej istocie statyczna – przywołała nowe, metaforyczne obrazy płynności, lekkości, powstałe pod wpływem odwzorowywania natury w ruchu i kopiowania kształtów aerodynamicznych [13]. Efektem tego są obiekty o wielkiej sile ekspresji. Do dziś wywołują wiele skojarzeń, jak na przykład opera w Sydney – „obojętnie, czy chcemy tego, czy nie, jest cechą, symbolem naszych czasów” [3]. Dzieła architektoniczne są to „jakby symbole stanów równowagi (...), wywołują wrażenia statyczności (...), wrażenie ruchu, a raczej jego możliwości, powstające zawsze, skoro odchylenia od pionu lub poziomu staną się widoczne” [4].

Statyka i architektura

Statyka i architektura. Architekt i konstruktor. Związki nierozwalne, bywają trudne, ale jedno jest pewne – budynki i obiekty, w których ekspresja wynika ze spójności statyki i formy architektonicznej, wyróżniają się elegancją i pięknem. Współczesna architektura pokazuje, jak bardzo różne mogą być sposoby kształtowania układów nośnych. Wynikają one z różnorodnych inspiracji, możliwości i przesłanek, w zależności od wielu czynników, w tym – rozpiętości, wysokości funkcji i charakteru budynku. Kształtowanie form podporządkowane statyce

budynku to odbicie w formach układów nośnych przebiegu sił, często dynamiczne, ekspresyjne, zachwycające, dominujące skalą, najczęściej w obiektach o dużych rozpiętościach i w budynkach wysokich. Architektura nie może się obejść bez konstrukcji, więc to architekt, jako „dawca formy”, powinien mieć największy udział w twórczym kształtowaniu konstrukcji. Inspiracje zasadami statyki i układami konstrukcyjnymi mogą wynikać z wykorzystania i wyeksponowania konstrukcyjnych możliwości materiału i struktur nośnych, często są środkiem architektonicznego wyrazu. Pomysł oparty na nietypowej, pięknej konstrukcji bardzo często wpływa na pierwszy zarys formy, staje się pierwszą ideą i motywem przewodnim, jest tożsamy z formą budynku. I co najważniejsze, wyeksponowana struktura konstrukcyjna może pozostać dominującą w budynku po żmudnym procesie projektowym i realizacyjnym. Inspiracje podporządkowane układom statycznym najczęściej dotyczą budynków wysokich, przekryć dużych rozpiętości, obiektów sportowych, zadaszeń trybun, obiektów mostowych, w których wytrzymałość konstrukcyjna jest aspektem dominującym, a ekspozycja struktur jest traktowana jak czynnik rzeźbiarski.

Wysmakowane formy, smukłe, lekkie elementy konstrukcyjne,

dynamika przebiegu sił skorelowana ekspozycją struktury nośnej w dużym stopniu łączą się z inspiracją naturą, bo to właśnie z niej zaczerpnięto pomysł transpozycji do budownictwa zasady budowy szkieletowej układów złożonych, zasad związanych z dynamiką, podatnością form oraz geometrią. Obiekty statycznie wyznaczalne podporządkowane są reżimowi geometrii dystrybucji sił zarówno w układach płaskich, jak i przestrzennych, z których wiele bazuje na geometrii trójkąta. Niektóre rozwiązania nie mają odpowiedników w naturze, są już wynikiem intelektualnych i analitycznych przetworzeń. Przy obiektach wysokich i dużych rozpiętości funkcja budynku i konieczność przeniesienia olbrzymich obciążeń wymuszają rozwiązania najczystsze obliczeniowo i statycznie. W obiektach o dużych rozpiętościach oraz w budynkach wysokich nie można sobie pozwolić na rozrzutność w odniesieniu do formy, na odchylenia od osi w węzłach, które mogłyby osłabiać całą konstrukcję, bo dąży się do jak najmniejszej masy własnej w połączeniu z jak najwyższą nośnością. Zrozumienie zasad statyki, oszczędne przekroje wynikające z dążenia do lekkości konstrukcji często prowadzą do rozwiązań niemal transcendentnych i poetyckich. Fascynacja zasadami statyki jest widoczna w pracach wielu wy-

bitnych architektów, naukowców i konstruktorów, poszukujących rozwiązań coraz lżejszych, efektywnych i ekonomicznych. (Calatrava, Nervi, Fuller, Nowicki, Grimshaw, S. J. Rębielak, R. Tarcewski, J. Sławińska, M. Salwatori, Mies van der Rohe, Wright, Gropius, Saarinen, Utzon, Niemeyer, Otto, Aalto, Piano, Ando, Rogers, Tschumi, Foster, Ito, Isozaki, Perrault, Moneo, Pei, Nouvell, Libeskind, Zaha Hadid, Koolhaas, Gehry i wielu innych).

Twórcze poszukiwania nowych form związane ze statyką to nadawanie układom konstrukcyjnym czytelnych i optymalnych zasad geometrycznych wynikających z analiz statycznych i nowych technologii materiałowych opartych na zwiększonych możliwościach nośnych, poszukiwanie lekkości i dynamiki elementów nośnych składanych w przestrzenne układy hybrydowe, eksponowanie układów opartych na strukturach i powierzchniach dwukrzywiznowych. Choć obiekty te charakteryzują się olbrzymią złożonością techniczną z racji ich dużej skali, konstrukcja bardzo często jest spójna z wizualnym odbiorem formy budynku. Charakterystyczne jest to, że w wielu przykładach podejście inżynierskie, polegające na spełnieniu określonych warunków technicznych, w twórcy sposób łączy się z podejściem „wizjonerskim”, typowym dla projektowania dzieł architektury.

Geometria i organizacja układu przestrzennego

Dla kreowania form inspirowanych statyką charakterystyczne jest, jak wspomniano, pokazanie układu konstrukcyjnego, a także traktowanie geometrii jako mocnego środka wyrazu. Budowanie poszczególnych układów przestrzennych odbywa się intuicyjnie, poprzez kopiowanie zależności występujących w tworach naturalnych lub za pomocą konstrukcyjnego wymiarowania, analiz statycznych, zależności funkcjonalnych i wytycznych technologicznych. Reguły te, stosowane intuicyjnie lub analitycznie, opierają się na zastosowaniu stosunkowo prostych zależności geometrycznych i organizacyjnych, nawet w układach przestrzennych pozornie wyglądających na bardzo skomplikowane. Geometrię stosowanych współcześnie konstrukcji wiszących, odbieranych jako nowatorskie i innowacyjne, określają z reguły krzywizny tylko dwóch płaszczyzn. Wykorzystanie tych zasad zarówno może być traktowane jako język ułatwiający projektowanie, jak też stać się punktem wyjścia do poszerzenia architektonicznych możliwości. Pomimo ograniczenia liczby założeń konstrukcyjnych oraz geometrycznych możliwości formotwórczych (liniowość, przestrzenna struktura, powłoka dwupłaszczyznowa), które wykorzystuje się do tworzenia form przestrzennych, zasady projektowania konstrukcyjnego prowadzą do różnorodności rozwiązań – multiplikowania, zmian proporcji etc. Różnorodne formy wykorzystują tu rozmaite układy statyczne i łączą różne materiały konstrukcyjne w układy hybrydowe.

Estetyka konstrukcji bardzo często wynika zatem z konstrukcyjnego i ekonomicznego modelowania dźwigarów, ze względu na parametry geometryczne i statyczne. Atrakcyjność formy osiąga się poprzez czytelność zastosowanych zasad, takich jak wyczuwalny przebieg odkształceń i sił, powtarzalność czy wpiśnięcie architektury w układy bez mała modularne. Detale i wszystkie elementy, które są eksponowane, można kształtować różnorodnie przy założeniu

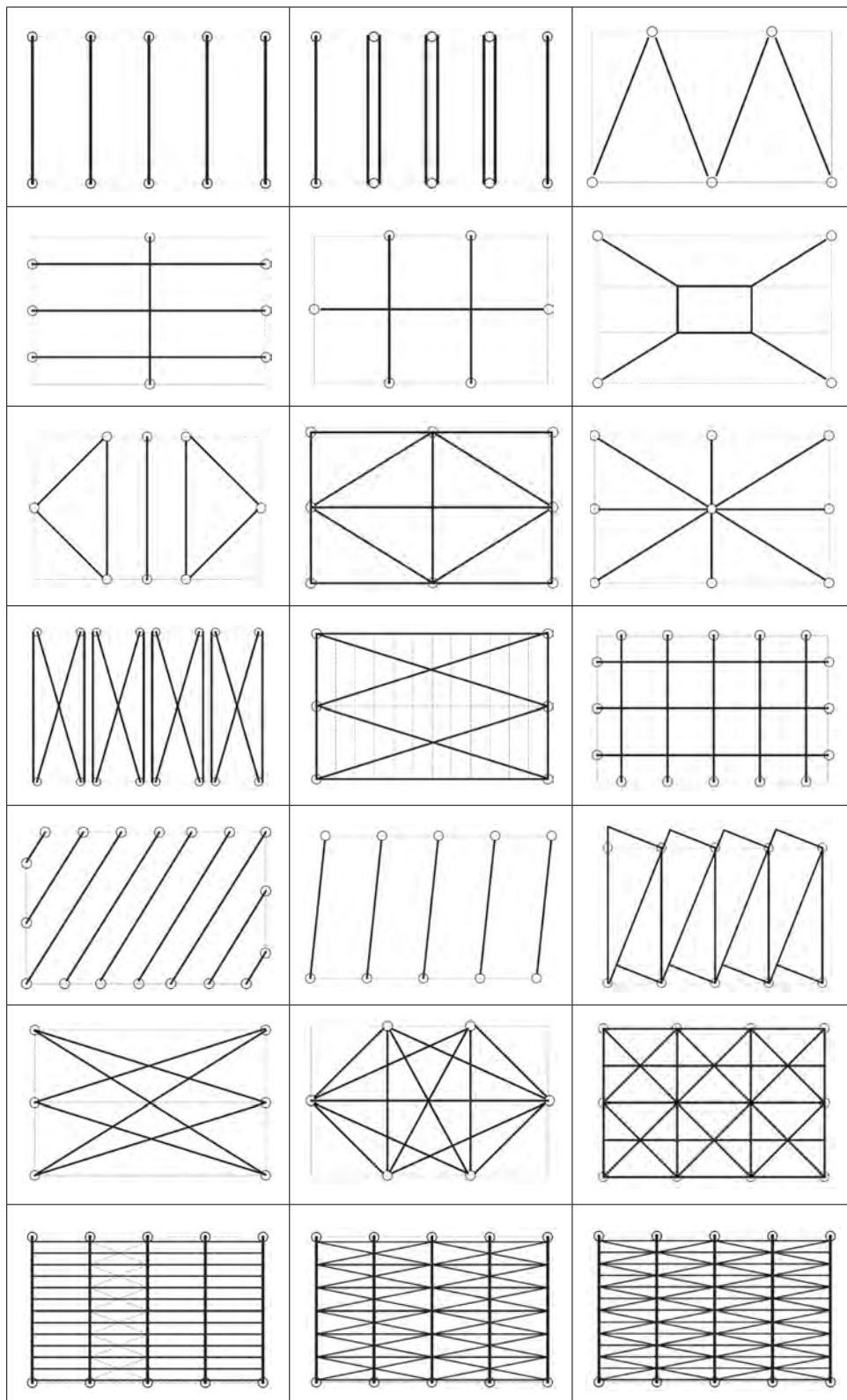
spełnienia zasad zachowania statycznego. Formy obiektów określają przyjęte zasady geometryczne, sposoby łączenia elementów podstawowych i dopełniających. Układy konstrukcyjne przywołują wartości tak istotne

dla jakości dzieła architektury jak prawa mechaniki, czystość logiki konstrukcyjnej, perfekcja dopasowania i rytm elementów. Z pozoru mechaniczne powtarzanie prowadzi w dwie strony: ku obiektom o charakterze niemal trans-

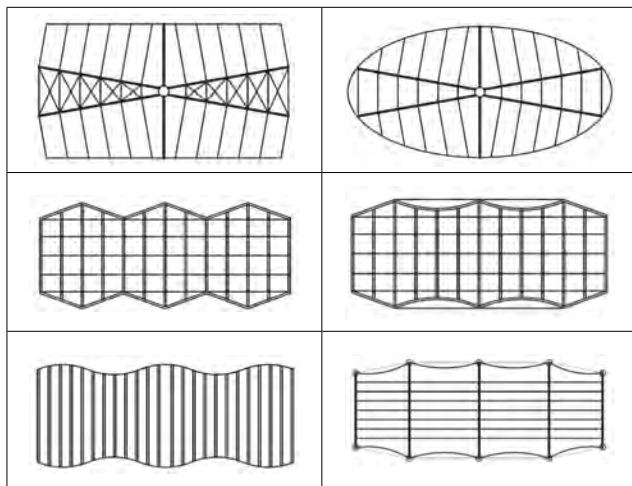
cententnym i ku budowłom z pozoru obojętnym, a także do obiektów rzeźbiarskich, rozbudowanych w formie i strukturze, dominujących nad otoczeniem.

Inspirowanie się zasadami statyki może prowadzić do kreowa-

Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach podłużnych – regularnych, na planie prostokątnym



Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach nieregularnych



nia form, które mają charakter unikatowy. Innowacyjne formy powstają z pomocą układów przestrzennych dwukrzywiznowych, takich jak siatki i konstrukcje wiszące, ale także innych systemów konstrukcyjnych – przestrzennych układów ramowych i kratownic. Jako innowacyjne postrzegają się także konstrukcje stworzone z rytmicznych zestawień elementów prostych, wykorzystanych w nowych konfiguracjach geometrycznych. Budowle o charakterze typowo rzeźbiarskim, a także formy celowo zniekształcone, mogą powstawać również z pominięciem zasad wynikających z analiz statycznych. Niektóre z nich wykorzystują zależności geometryczne w zniekształconych, nietypowo przetworzonych lub nowatorskich układach, inne są tworzone w sposób intuicyjny, bez dbałości o ekonomiczną i statyczną optymalizację konstrukcji.

Funkcja konstrukcji w budowaniu form architektonicznych

Architektura współczesnych obiektów to olbrzymia liczba realizacji oraz charakteryzujących je postaw twórczych. Wiele z nich wykorzystuje najnowocześniejsze osiągnięcia techniczne i naukowe. Współczesne, nowe formy wymagają zastosowania nietypowych układów konstrukcyjnych, a także rozwiązywania skomplikowanych, wielopłaszczyznowych problemów technicznych. Poszukiwania efektywności konstrukcyjnej, wykorzystanie no-

wych materiałów prowadzą ku nowym, indywidualnym formom. Innowacyjne formy powstają także jako wynik intuicyjnych działań projektowych, mających na celu stworzenie charakterystycznego i niepowtarzalnego obiektu. Twórcze poszukiwania form zależą od wielu czynników, w tym rozpiętości, funkcji i charakteru budynku, są skomplikowane, podyktowane zamysłem twórcy i mogą łączyć wiele przeciwstawnych cech. Budowanie form jest polem wielu eksperymentów, przy czym duży udział mają tu nie tylko techniki konstrukcyjne i zastosowane materiały, lecz także, jak wspomniano, wartości ekologiczne i społeczne. Widoczna jest olbrzymia zależność form od zastosowanej konstrukcji (rozpiętości) lub działania w kierunku zerwania tej zależności. Przekrycia sprawiają wrażenie oderwanych od ziemi owadów lub latawców. Same budynki stają się coraz bardziej ażurowe, „niematerialne”. Widoczne są, z jednej strony, oszczędność form, upraszczanie układów konstrukcyjnych, dominacja faktur materiałowych, z drugiej – ekspresja i rzeźbiarskie traktowanie obiektów. Masywne, klasyczne budowle ustępują miejsca lekkim i eterycznym lub też obiektom, w których struktura przejmuje funkcję dominującą.

Materiały konstrukcyjne jako aspekt dominujący

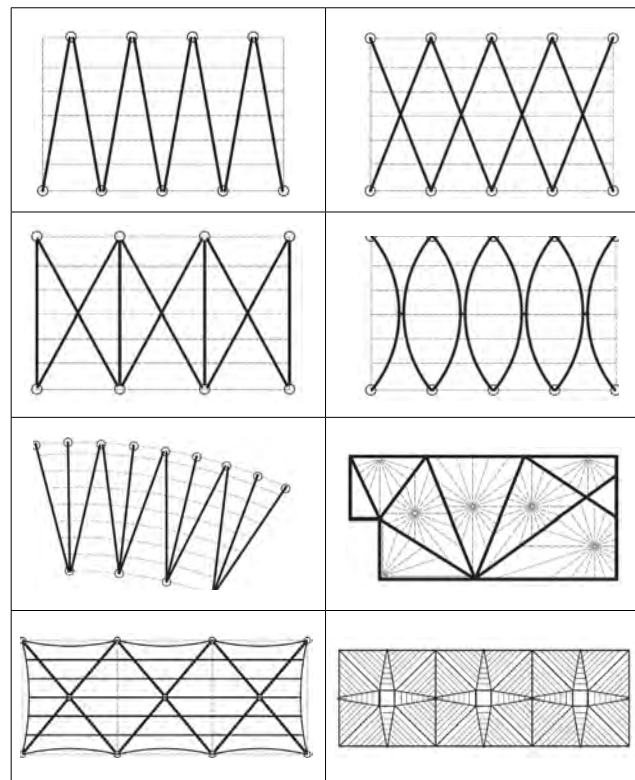
Charakterystyczną cechą obiektów, w których zastosowanie odpowiednich materiałów

i technik konstrukcyjnych jest aspektem dominującym (ekspresyjnie podkreślającym dystrybucję sił), jest efektywne i ekonomiczne zastosowanie konstrukcji w celu osiągnięcia maksymalnie dużych rozpiętości. Zawiąza się tu liczba układów konstrukcyjnych możliwych do zastosowania. Wybór ogranicza się do konstrukcji hybrydowych z udziałem elementów stalowych. Wałorem tych konstrukcji jest lekkość, duża nośność i możliwość efektywnego zwiększania rozpiętości przy jednoczesnym zmniejszaniu gabarytów elementów nośnych. Dźwigary nośne składają się z kratownic przestrzennych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych i najnowocześniejszych rozwiązań technologicznych. Konstrukcje najczęściej są ukształtowane w układy kopułowe i formy owalne. Obiekty te charakteryzują się z reguły czytelnym i dominującym układem

kazuje się na zewnątrz obiektu, poprzez ekspozycję elementów konstrukcji (żebra kopuły Izumo Dome), a także przypór (fundamentów). Najczęściej są to obiekty wolnostojące, oddalone od centrów miast, dominujące na tle przestrzeni, która je otacza, lub obiekty, które „przykrywają” przestrzenie miejskie, w celu ich ochrony przed niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi (kopuły nad miastem Hudson).

Cechą charakterystyczną jest tu eksponowanie jednorodnej zasady konstrukcyjnej, z jednoczesnym redukowaniem formy budynku. Charakterystyczne dla projektowania tego typu konstrukcji jest powielanie sprawdzonych wzorców i rozwiązań w celu osiągnięcia, w pewnym sensie, klasycznych form. Konstrukcja ukształtowana jest z reguły na siatce modularnej, w geometrycznie uporządkowanym układzie. Porządek struktury wynika ze spo-

Geometria kształtowania planu za pomocą dźwigarów diagonalnych



konstrukcyjnym nawiązującym do przebiegu sił. Elementy konstrukcyjne są eksponowane we wnętrzu, nie tylko z powodów ekonomicznych i wizualnych, lecz także akustycznych, natomiast same formy są proste, jednorodne i oszczędne. W wielu obiektach strukturę konstrukcyjną po-

sobu łączenia elementów składowych oraz statycznych zależności pomiędzy nimi. Kształtowanie elementów konstrukcyjnych wprowadza określony rytm, na który składają się elementy nośne: słupy, dźwigary, żebra o różnych formach. Mogą to być dźwigary proste, łuki, łuki wzmocnione, hybry-

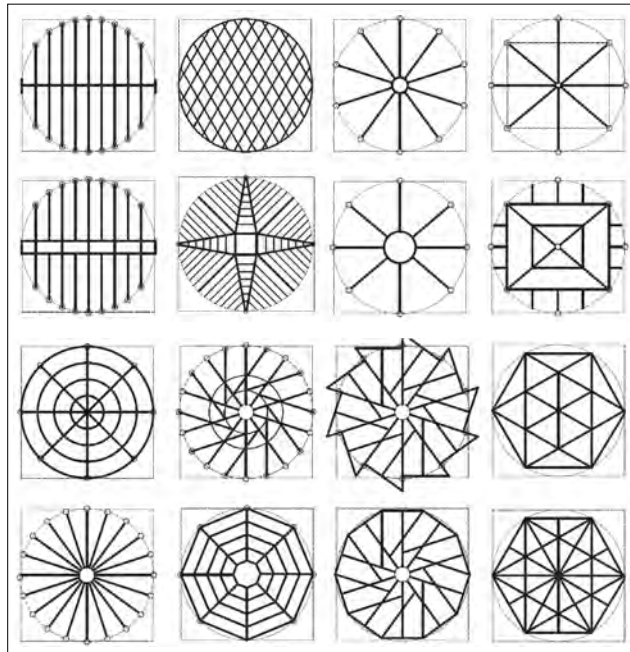
dowe drewniano-stalowe, kratownicowe i kratownice hybrydowe drewniano-stalowe, usztywnione przestrzennie przez elementy drugorzędne, takie jak płatywie, rygle, elementy stężące. Formy konstrukcyjne z jednej strony są podporządkowane zasadzie jak najpełniejszego, optymalnego przenoszenia sił działających na konstrukcję, z drugiej strony – są przystosowane do warunków funkcjonalnych (forma wynika z funkcji) i ekonomicznych.

Obiekty te pokazują ogromne możliwości w budowaniu różnych form architektonicznych, w których pokazanie dynamiki i dystrybucji sił jest dominujące. Wyeksponowanie dynamicznego układu nośnego niemal automatycznie narzuca ekspozycję struktury, a elementy konstrukcyjne wykorzystuje się jako zamierzone układy budujące ekspresję – cykle i dominanty. Obiekty te charakteryzują się czytelnym przebiegiem sił oraz rozwiązań konstrukcyjnych i technicznych. Są to zarówno obiekty o dużych rozpiętościach – 60, 80, 100 m – jak też obiekty o stosunkowo małych rozpiętościach, w których konstrukcję zastosowano w nietypowy, zaskakujący sposób.

Wymagania i rozwiązania dla lekkich konstrukcji

Tworząc konstrukcje o dużych rozpiętościach, trzeba pamiętać o działaniu na nie niekorzystnych obciążeń. Schlaich określił wymagania i rozwiązania dla lek-

Geometria kształtowania planu różnorodnych systemów konstrukcyjnych w układach centrycznych – regularnych, na planie koła



kich konstrukcji, o których warto pamiętać.

Szerokość przekroju dźwigara zginanego obciążeniem własnym zwiększa się nie tylko proporcjonalnie do rozpiętości, ale do jej kwadratu. Zwiększając rozpiętość, zwiększamy ciężar konstrukcji, dlatego trzeba unikać niczym nieuzasadnionych rozpiętości. Zasada ta może być jednak ograniczona przez różnorodne zmiany kształtów.

Należy unikać elementów zginanych na korzyść prętów ściskanych lub rozciąganych osiowo. Przykładem są kratownice. Dzięki prętom rozciągającym i ściskanim

cały przekrój może być równomiernie wykorzystany. W elementach zginanych w pełni wykorzystuje się jedynie wytrzymałość skrajnych włókien, a środkowe pasma są „martwym” obciążeniem. Z kolei ciągną się korzystniejsze niż pręty ściskane, które łatwo ulegają wyboczeniu.

Korzystne pręty rozciągane stają się jeszcze bardziej efektywne, gdy wytrzymałość materiału zwiększa się, a ciężar własny maleje. Drewno jest korzystniejsze niż stal, a włókna naturalne i sztuczne – jeszcze bardziej korzystne.

Przestrzenne, lekkie konstrukcje o podwójnej krzywiźnie otwie-

rają nowy świat architektury, z mnogością nowych form. Konstrukcje te przekazują obciążenie albo przez powłoki ściskane, albo przez siatki rozciągane lub membrany. Pomimo cienkich ścianek powłok lub kopuł przestrzennych ich geometryczny kształt stabilizuje je i uniemożliwia wyboczenie.

Na kształtowanie współczesnej architektury mają wpływ wybory konstrukcyjne, materiałowe i ekonomiczne. To uniwersalne stwierdzenie jest aktualne od początków architektury, świadomość zależności od technologii i techniki miał już bowiem Witruwiusz, co opisał w najstarszym traktacie o architekturze. W przypadku form nowatorskich zależność ta zacieśnia się, ponieważ dużo większą wagę mają tu rozwiązania konstrukcyjne, nierozdzielnie związane z technologią zastosowanego materiału konstrukcyjnego. Pod wpływem presji ekonomicznej powstają natomiast nowatorskie i „łżejsze” rozwiązania. Samo kształtowanie konstrukcji ma duży udział w działaniach twórczych, związanych z poszukiwaniem nowych form przestrzennych. Formy budynków mogą być zarówno rzeźbiarskie, dynamiczne, symboliczne i zaskakujące, jak też uniwersalne, rytmiczne, „zanikające”, płynne i zmienne lub nawiązujące do rozwiązań występujących w naturze. Pomimo różnego kształtowania formy struktura konstrukcyjna jest w nich bardzo często ważna i eksponowana.

Literatura:

- [1] Borusiewicz W., Konstrukcje budowlane dla architektów. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1973.
- [2] Furuyama M., Tadao Ando 1941 Geometria ludzkiej przestrzeni. Tashen/TMC Art 2008.
- [3] Giedion, S., Przestrzeń, czas i architektura. Narodziny nowej tradycji. Warszawa 1968.
- [4] Hempel S., Ekspresja architektoniczna konstrukcji. Warszawa 1938.
- [5] Jodidio P., Nowe Formy. Taschen, 1998.
- [6] Jodidio P., Santiago Calatrava 1951. Architekt, Inżynier, Artysta. Tashen/TMT Art, 2008.
- [7] Kolendowicz T., Mechanika budowlana dla architektów. Arkady, Warszawa 1996.
- [8] Pawłowski A.Z., Rokicki W., Niekonwencjonalna architektura wyzwaniem dla inżynierów. „Materiały Budowlane”, nr 6/2005.
- [9] Reichhart A., O koncepcyjnym projektowaniu konstrukcji. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2005.
- [10] Salvadori M., Dlaczego budynki stoją. Wydawnictwo Murator, Warszawa 2001.
- [11] Schlaich J., Koncepcyjne projektowanie lekkich konstrukcji. Artykuł opracowany przez prof. S. Kusia na podstawie referatu wygłoszonego na XI międzynarodowej konferencji „Konstrukcje metalowe”, ICMS 2006, Rzeszów 2006. „Inżynieria i Budownictwo” nr 3/2007.
- [12] Siegel C., Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze.
- [13] Stawińska J., Ekspresja sił w nowoczesnej architekturze. Arkady, Warszawa 1997.
- [14] Szparkowski Z., Zasady kształtowania przestrzeni i formy architektonicznej. Wydawnictwo PW, 1993.
- [15] Tołłoczko Z., Wybrane problemy współczesnej estetyki architektonicznej.
- [16] Witruwiusz: O architekturze ksiąg dziesięć. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1956.
- [17] Włodarczyk J., Technika jako czynnik inspirujący w architekturze. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice 2004, część 1. Współczesne techniki budowlane w architekturze, zagadnienia wybrane (autor Włodarczyk Jacek) część 2. Przekrycia wiszące w architekturze (autor Gerlic Krzysztof).
- [18] Zablocki W., Architektura/ Architecture.
- [19] Zalewski W., Moc i lekkość – muzy projektanta konstrukcji. „Architektura – Murator” nr 11/2000.
- [20] Zalewski W., O nauczaniu projektowania konstrukcji. Wykład podczas wręczenia dyplomu doktora Honoris causa Politechniki Warszawskiej. „Inżynieria i Budownictwo” nr 10/98.
- [21] Zalewski W., O wszczęciu nauczania projektowania konstrukcji. „Inżynieria i Budownictwo” nr 10-12/89.
- [22] Zalewski W., Wytrzymałościowe kształtowanie konstrukcji na minimum ciężaru. „Inżynieria i Budownictwo” nr 9/95.
- [23] Żórawski J., O budowie formy architektonicznej. Arkady, Warszawa 1962.