

## Konstrukcje zespolone w budynkach wysokich

Budynki wysokie są nieodłącznym i ważnym elementem współczesnych miast. Ich historia sięga lat osiemdziesiątych dziewiętnastego wieku, kiedy w odbudowywanym się po wielkim pożarze Chicago został zbudowany pierwszy budynek Home Insurance Building wysokości 55 m. W tym budynku jako ustrój konstrukcyjny po raz pierwszy zastosowano ramy stalowe (a właściwie ramy z żeliwa) zamiast tradycyjnych murowych ścian nośnych. Od tego czasu datuje się szybki rozwój budynków wysokich zarówno pod względem ich liczby, jak i wysokości. Statystyki opracowane przez Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH) wskazują, że w 2017 r. było 1319 budynków wysokości powyżej 200 m, w tym 126 budynków wysokości ponad 300 m i 3 budynki powyżej 600 m [1].

Nie ma precyzyjnej definicji budynku wysokiego wskazującej na liczbę kondygnacji lub wysokość, od której należałoby uważać budynek za mieszczący się w kategorii budynków wysokich. CTBUH określa budynek jako wysoki wtedy, gdy wysokość stanowi podstawowy parametr w jego projektowaniu, realizacji lub eksploatacji. W aspekcie ustroju konstrukcyjnego za budynki wysokie uważa się takie, w których decydującym parametrem jest ich wysokość, co zwykle znaczy, że podstawowymi obciążeniami decydującymi o rozwiązaniu konstrukcyjnym są obciążenia poziome – obciążenia od wiatru i obciążenia sejsmiczne.

Oddziaływanie wiatru na budynek należy rozpatrywać w dwóch aspektach – jako oddziaływanie statyczne i oddziaływanie dynamiczne. Wiatr działający na budynek wywołuje ciśnienie na jego powierzchni nawietrznej, ssanie na powierzchni zawietrznej oraz opory na powierzchniach bocznych, które opływa. Przyjmując określoną wartość działania wiatru na konstrukcję, należy uwzględnić wszystkie trzy wymienione efekty. Należy też pamiętać, że prędkość wiatru zwiększa się z wysokością oraz że sąsiedztwo budynków wysokich (istniejących lub planowanych) może znacząco wpływać na siłę i kierunek wiatru działającego na projektowany budynek. Z tego powodu działanie wiatru na budynek wysoki powinno być badane w tunelu aerodynamicznym po zapewnieniu odpowiedniej skali modelowej i dokładnym odwzorowaniu środowiska, w jakim się znajduje [2, 3].

Efekty dynamiczne mogą wystąpić nawet przy małych prędkościach wiatru, jeśli powodują one wywołane zawirowaniami pulsujące siły, których częstotliwość jest bliska częstotliwości drgań własnych konstrukcji [2]. Jeśli budynek znajduje się w strefie sejsmicznej, to należy przy jego projektowaniu uwzględnić obciążenia sejsmiczne, jakie powstają w czasie trzęsienia ziemi. W zależności od lokalizacji budynku obciążenia sejsmiczne oblicza się według reguł podanych w odpowiednich przepisach (np. International Building Code IBC). W przypadku obciążeń sejsmicznych poza wychyleniem budynku istotne jest

obliczenie poziomych odkształceń między poszczególnymi kondygnacjami (inter-story drift). Te odkształcenia, wskutek nieelastycznej odpowiedzi budynku, mogą być duże. Muszą one być uwzględnione przy projektowaniu ścian zewnętrznych i ścian działowych, jak również wszystkich pionowych ustrojów budynków [2].

### Podstawowe kryteria projektowania

Podstawowymi kryteriami projektowania budynku wysokiego są: wytrzymałość (nośność), użytkowość, komfort użytkowników oraz ekonomiczność. Pierwsze kryterium odnosi się do zapewnienia całości konstrukcji i wszystkim jej elementom odpowiedniej wytrzymałości, czyli odpowiedniego zapasu bezpieczeństwa w stanach granicznych nośności. Drugie kryterium odnosi się przede wszystkim do ograniczenia wychylenia konstrukcji pod wpływem obciążeń poziomych, a więc do sztywności konstrukcji. Wychylenia są zwykle ograniczone – od  $H/500$  do  $H/1000$ , gdzie  $H$  jest wysokością budynku. Komfort użytkowników jest zapewniony, jeśli przyspieszenia drgań budynku są poniżej pewnej granicy tolerancji.

Bardzo ważnym kryterium jest ekonomiczność rozwiązania. *Fazlur Khan*, znany konstruktor budynków wysokich, jako pierwszy wprowadził pojęcie „premium for height” i wskazał, że wraz ze zwiększeniem wysokości budynku zwiększa się wpływ działania sił poziomych, które musi przenieść konstrukcja, a to wpływa na zużycie materiałów. Gdyby na budynek nie działały żadne siły poziome, wówczas można by go projektować tylko na działanie obciążeń grawitacyjnych. W przypadku stałej rozpiętości stropów zużycie materiału na jednostkę powierzchni stropu jest takie samo i nie zależy od liczby kondygnacji, ale od rozpiętości stropu, czyli od rozstawu słupów konstrukcji, nie zależy natomiast od wysokości budynku. Wymiary słupów zwiększają się od najwyższej kondygnacji ku fundamentom. W przypadku braku sił poziomych przyrost zużycia materiału wraz z wysokością byłby liniowy. W rzeczywistości budynek wysoki poza obciążeniami grawitacyjnymi jest poddany obciążeniom poziomym, jak wiatr i obciążenia sejsmiczne. Powyżej pewnej wysokości (10 kondygnacji) wychylenie konstrukcji zaczyna wpływać na projektowanie, więc sztywność, a nie wytrzymałość staje się podstawowym parametrem. Ponieważ wychylenie budynku zwiększa się w czwartej potęgze wysokości ( $\Delta = CH^4$ ), zatem zapewnienie odpowiedniej sztywności wymaga dodatkowych elementów usztywniających i w konsekwencji zużycie materiału jest coraz większe.

Aby uzyskać racjonalne i ekonomiczne rozwiązania jest konieczny wybór takiego ustroju konstrukcyjnego, który umożliwi uzyskanie odpowiedniej sztywności budynku przy jak najmniejszym dodatkowym koszcie. Przy większej liczbie kondygnacji zastosowanie układów sztywnych ram staje się nieekonomiczne i jest konieczne poszu-

kiwanie racjonalniejszych rozwiązań. *Khan* opracował wykres, który pokazuje, jak bardzo wraz ze zwiększeniem wysokości może się zmieniać zużycie materiału na konstrukcję, jeśli jest ona zaprojektowana nieracjonalnie. *Sarkisian* [2] na swoim wykresie zużycia materiału na konstrukcję podaje rzeczywiste wartości tego zużycia, które jest konieczne w celu uzyskania racjonalnego konstrukcyjnego rozwiązania budynku wysokiego. Przytacza on przykład 15-kondygnacyjnego budynku Reliance building o konstrukcji ramowej, w którym zużycie stali wynosiło 68 kg/m<sup>2</sup>. Gdyby zastosowano taki sam ustrój ramowy w budynku o wysokości 50 kondygnacji, to zużycie stali mogłoby sięgać 244 kg/m<sup>2</sup>. Jeśli jednak zastosowano by ustrój kratownicowy w trzonie budynku, a ustrój ramowy do kondygnacji wokół trzonu, to zużycie stali mogłoby być zredukowane do 122 kg/m<sup>2</sup>. Oba wykresy wyraźnie wskazują, że w celu uzyskania racjonalnego rozwiązania konstrukcji budynku wysokiego, który będzie spełniał zarówno warunki wytrzymałościowe, jak i warunek odpowiedniej sztywności, przy której jego wychylenie od pionu będzie się mieściło w granicach dopuszczalnych, dodatkowo koszt (zużycie materiału) zwiększa się nieliniowo wraz z wysokością. Aby rozwiązanie było jak najbardziej ekonomiczne, konstruktor powinien w projektowanej konstrukcji w jak największym stopniu wykorzystać ustrój przenoszący obciążenia pionowe także do przeniesienia obciążeń poziomych.

### Konstrukcje zespolone

Konstrukcje zespolone w budynkach wysokich zdobywają coraz szersze zastosowanie. Gdy w roku 1995 ukazała się książka „Structural Systems of Tall Buildings” [3], w indeksie rzeczowym wskazywano w tekście tylko 7 odnośników dotyczących konstrukcji zespolonych, a już w książce „Designing Tall Buildings” [2] jest tych odnośników 37. Z danych Council on Tall Buildings and Urban Habitat wynika, że w latach 2009–2015 udział konstrukcji zespolonych (w literaturze anglojęzycznej określanych jako composite structures) w konstrukcji budynków 200+ (wysokości powyżej 200 m) zwiększył się około 4-krotnie (z około 12 do około 45%), głównie kosztem konstrukcji żelbetowych (ten zmniejszył się z około 74 do 49%). W tych danych podano też udział konstrukcji stalowych oraz konstrukcji mieszanych (np. stalowo-betonowych).

W zestawieniach dotyczących 100 najwyższych budynków na świecie [3] podano, że w 43 zastosowano konstrukcje zespolone (composite). Przykładowo w tabl. 1 zestawiono 24 najwyższe budynki z tej listy [3].

Jako konstrukcje zespolone stalowo-betonowe w niniejszym artykule rozumie się takie konstrukcje, które powstają w wyniku odpowiedniego połączenia (zespolenia)

dwóch materiałów – stalowego elementu konstrukcyjnego z betonem zbrojonym lub sprężonym. Mechanizm współdziałania i zgodność odkształceń obu materiałów w przenoszeniu obciążeń są zapewnione przez tarcie i połączenie mechaniczne za pomocą łączników na powierzchniach styku obu materiałów. Najprostsze przykłady takich konstrukcji są zestawione na rys. 1 [5].

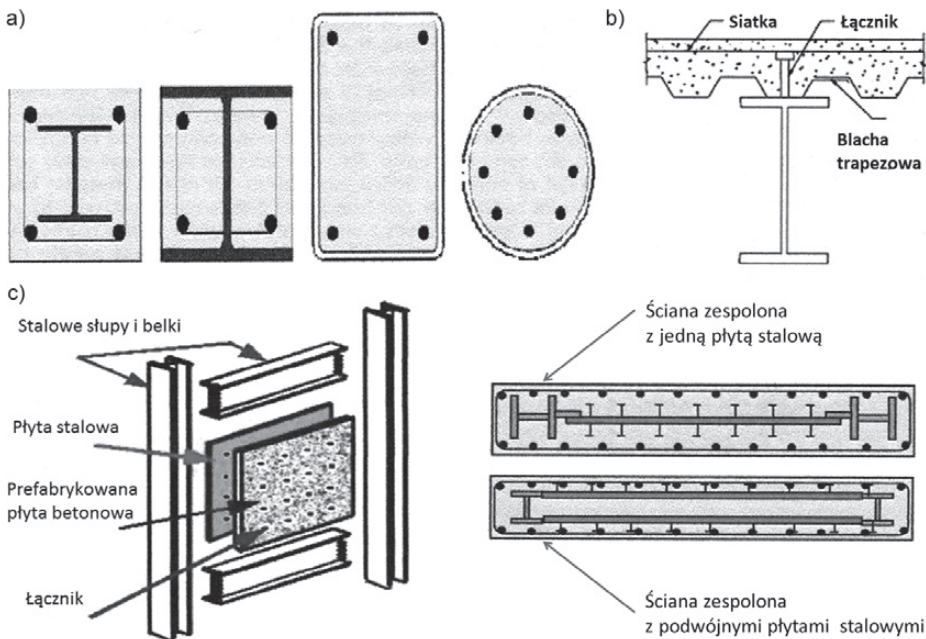
### Zastosowania konstrukcji zespolonych w budynkach wysokich

Najwcześniej stosowane w budynkach wysokich były stropy zespolone jako elementy konstrukcji przenoszącej obciążenia pionowe. Era zastosowań nowoczesnych zespolonych rozwiązań konstrukcyjnych, wykorzystujących współpracę stali i betonu w słupach, w ustrojach konstrukcyjnych budynków wysokich przenoszących obciążenia poziome rozpoczęła się od projektów konstrukcyjnych zaproponowanych przez *Fazlura Khana* w 1966 r. [7]. *Khan* uważał, że można uzyskać w płaszczyźnie pionowej podobne współdziałanie kształtowników stalowych z betonem, jak kilka dekad wcześniej uzyskano w konstrukcji stropów zespolonych. Ten pomysł doprowadził do skonstruowania pierwszego nowoczesnego budynku o konstrukcji zespolonej: 20-kondygnacyjnego Control Data Center w Huston w 1968 r. Z systemowego punktu widzenia konstrukcja stanowiła konwencjonalną ramę stalową, z wyjątkiem zastosowania bardzo małych kształtowników

Tablica 1

Zestawienie najwyższych 24 budynków [3], w tym 14 budynków o konstrukcji zespolonej

Lp.	Nazwa budynku	Miasto	Wysokość, m	Liczba pięter	Rok ukończenia	Materiał/konstrukcja
1.	Burj Khalifa	Dubai (AE)	828	163	2010	stal/beton
2.	Shanghai Tower	Shanghai (CN)	632	128	2015	zespolona
3.	Makkah Royal Clock Tower Hotel	Mocca (SA)	601	120	2012	stal/beton
4.	One World Trade Center	New York City (US)	541,3	94	2014	zespolona
5.	Taipei 101	Taipei (TW)	508	101	2004	zespolona
6.	Shanghai World Financial Center	Shanghai (CN)	492	101	2008	zespolona
7.	International Commerce Centre	Hong Kong (CN)	484	108	2010	zespolona
8.	Petronas Tower 1	Kuala Lumpur (MY)	451,9	88	1998	zespolona
9.	Petronas Tower 2	Kuala Lumpur (MY)	451,9	88	1998	zespolona
10.	Zifeng Tower	Nanjing (CN)	450	66	2010	zespolona
11.	Willis Tower	Chicago (US)	442,1	108	1974	stal
12.	KK100	Shenzen (CN)	441,8	100	2011	zespolona
13.	Guangzhou International Finance Center	Guangzhou (CN)	438,6	103	2010	zespolona
14.	Marina 101	Dubai (AE)	426,5	101	2015	beton
15.	432 Park Avenue	New York (US)	425,5	88	2015	beton
16.	Trump International Hotel & Tower	Chicago (US)	423,2	98	2009	beton
17.	Jin Mao Tower	Shanghai (CN)	420,5	88	1999	zespolona
18.	Princess Tower	Dubai (AE)	413,4	101	2012	stal/beton
19.	Al. Hamra Tower	Kuwait City (KW)	412,6	80	2011	beton
20.	Two International Finance Centre	Hong Kong (CN)	412	88	2003	zespolona
21.	23 Marina	Dubai (AE)	392,4	88	2012	beton
22.	CITIC Plaza	Guangzhou (CN)	390,2	80	1996	beton
23.	Capital Market Authority Tower	Riyadh (SA)	385	76	2015	zespolona
24.	Shun Hing Square	Shenzen (CN)	384	69	1996	zespolona



Rys. 1. Konstrukcje zespolone stosowane w budynkach wysokich: a) przekroje prostych słupów zespolonych, b) przykład stropu zespolonego, c) ściany zespolone z pojedynczą lub podwójną płytą stalową [5, 6]

stalowych w zewnętrznych słupach ramy. Wykonanie ramy stalowej wyprzedzało mniej więcej o 8 kondygnacji układanie betonu w słupach zewnętrznych i ryglach ramy. Sekwencja budowy konstrukcji stalowej wyprzedzającej postęp betonowania była kontynuowana do osiągnięcia pełnej wysokości budynku. Stosowano tymczasowe usztywnienia wszystkich stalowych słupów nim ukończono betonowanie. W rezultacie system konstrukcyjny miał na zewnątrz ramę o konstrukcji zespolonej stal – beton, która przejmowała obciążenia pionowe i całość obciążeń poziomych [7]. Zaletą takiej konstrukcji jest zachowanie tempa wznoszenia charakterystycznego w przypadku konstrukcji stalowych, zapewnienie sztywności i ognioodporności słupów zewnętrznych dzięki betonowi otaczającemu kształtowniki stalowe oraz ekonomiczności zastosowania konstrukcji zespolonej.

Generalnie ustroje konstrukcyjne można podzielić na dwie zasadnicze grupy [5]:

- przenoszące obciążenia pionowe (grawitacyjne),
- przenoszące obciążenia poziome.

Zastosowanie elementów zespolonych w przenoszeniu obciążeń pionowych ma wieloletnią historię, głównie w płytach stropowych. Jednak w nowoczesnych budynkach wysokich zakres stosowania konstrukcji zespolonych jest coraz szerszy. Konstrukcje te są stosowane jako zespolone elementy stropowe (por. rys. 1b), słupy (por. rys. 1a), ściany nośne (por. rys. 1c), kratownice, prętowe ustroje przestrzenne [5].

Jeśli chodzi o konstrukcje zespolone stosowane w systemach przenoszenia sił poziomych, to można tu wymienić: systemy usztywniające ściany nośnych, systemy ściana nośna – rama, systemy trzonowe, systemy mieszane, układy megaram i megasłupów, powłokowe przestrzenne układy prętowe [5].

Usztywniające zespolone ściany nośne w budynkach wysokich są stosowane jako zabudowa trzonów mieszczących szyby dźwigowe, instalacje elektryczne i mechaniczne, klatki schodowe. Tego rodzaju rozwiązania są obecnie stosowane w konstrukcjach budynków wysokości

od 50 do 60 kondygnacji. Całość sił poziomych jest przenoszona przez ściany nośne trzonów, a więc pozostała konstrukcja przenosi jedynie siły pionowe i może być wykonana ze stali.

Systemy ściany nośne – ramy zewnętrzne stosuje się, gdy trzon wewnętrzny nie jest w stanie przenieść całości sił poziomych. Ustrój konstrukcyjny złożony z układu ramowego i wewnętrznego trzonu poprawia ogólną sztywność konstrukcji i zmniejsza wychylenie budynku.

Systemy trzonowe to albo układy trzon w trzonie, albo wiązki trzonów. Trzony zewnętrzne składają się z gęsto rozstawionych słupów łączonych sztywnymi ryglami. Stosuje się obecnie dwa rozwiązania: w jednym są zespolone słupy i żelbetowe rygle, w drugim – rygle stalowe. W obu przypadkach większą szybkość wznoszenia budynku uzyskuje się przez wykonanie najpierw wewnętrznego stalowego szkieletu z metalowymi

stropami i lekkimi słupami zewnętrznymi. Zwykle system ramowy wykonuje się 6÷8 kondygnacji wcześniej w stosunku do betonowania zewnętrznego trzonu.

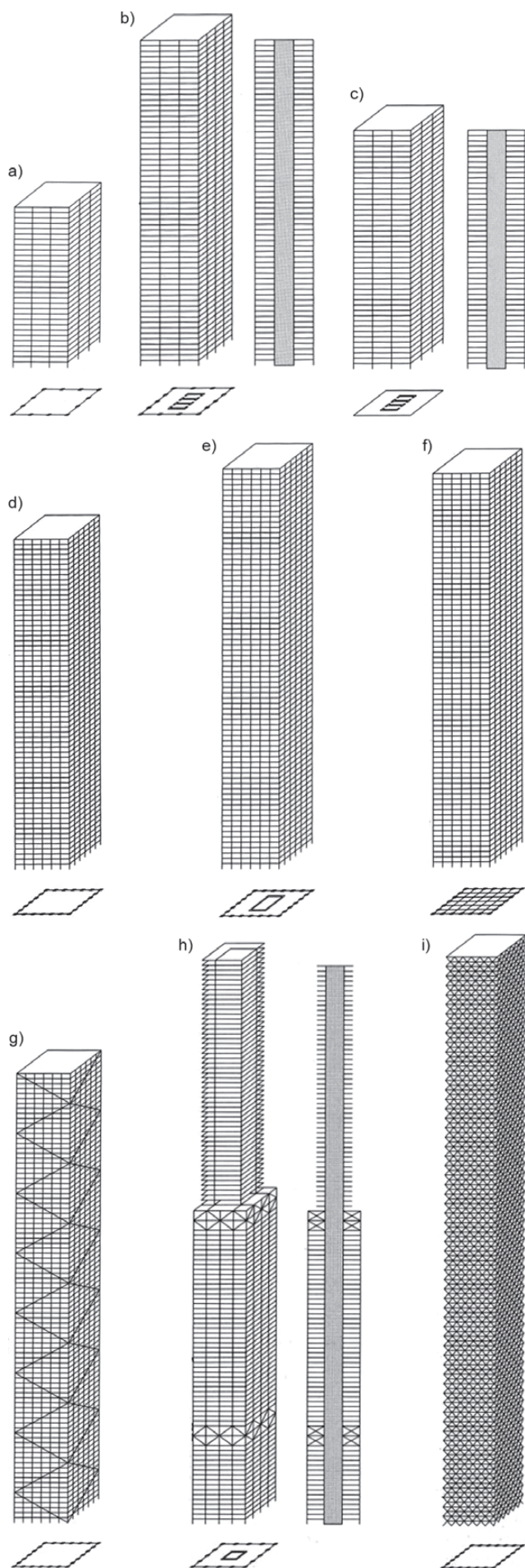
W systemach mieszanych część budynku może być wykonana jako zespolona, a inna część (np. wyższe kondygnacje) jako stalowa. Ta koncepcja doprowadziła do nowego ustroju konstrukcyjnego z zastosowaniem konstrukcji zespolonych, charakteryzującego się zastosowaniem megasłupów.

Ustrój konstrukcyjny w postaci megaram polega na zastosowaniu megasłupów (inna nazwa: super słupy) usytuowanych na obwodzie budynku i połączenie tych słupów na kilku poziomach za pomocą elementów usztywniających (outriggers). Tworzy to konstrukcję sztywnej megaramy przenoszącej obciążenia poziome (Taipei 101, Shanghai Tower, Tianjin Golden Finance Tower, Shanghai Financial Centre). Jako megasłupy generalnie stosuje się dwa rozwiązania: rury stalowe dużej średnicy lub rury stalowe prostokątne, które wypełnia się betonem, albo kształtowniki stalowe, które stanowią sztywne zbrojenie słupa. Więcej szczegółów podano niżej w opisach wybranych budynków wysokich, stanowiących przykłady zastosowania konstrukcji zespolonych.

Konstrukcje zespolone są również stosowane w elementach zewnętrznych prętowych powłok w konstrukcji budynków wysokich. Są to najczęściej zamknięte przekroje prostokątne wypełniane betonem (np. Guangzhou West Tower).

W książce „Designing Tall Buildings” *Mark Sarkisian* [2], omawiając typowe systemy konstrukcyjne, w których mają zastosowanie konstrukcje zespolone, wymienia rozwiązania przedstawione na rys. 2. Są to systemy (ustroje) ramowe w budynkach do 30 kondygnacji (a), ściany nośne (trzon wewnętrzny) połączone ze słupami stalowymi przez stropy zespolone (b), kombinowane układy: żelbetowe ściany nośne – ramy zespolone do wysokości 60 kondygnacji (c), zespolone ramowe trzony zewnętrzne do 65 kondygnacji (d), zespolone układy trzon w trzonie do wysokości 75 kondygnacji (e), zespolone wiązki trzonów





Rys. 2. Ustroje konstrukcyjne budynków wysokich, w których stosuje się konstrukcje zespolone: a) rama, b) trzon wewnętrzny i stalowe słupy połączone z trzonem stropami o konstrukcji zespolonej, c) żelbetowy trzon i rama o konstrukcji zespolonej, d) trzon ramowy zespolony, e) zespolone trzon w trzonie, f) zespolona wiązka trzonów, g) trzon kratownicowy w konstrukcji zespolonej, h) zespolony, usztywniony kratownicami pasowymi układ masztowy, i) zespolony trzon powłokowy [2]

także do 75 kondygnacji (f), zespolone trzony kratownicowe do 90 kondygnacji (g), zespolone usztywnione układy masztowe do 110 kondygnacji (h), trzony utworzone z prętowych trójkątnych układów przestrzennych do 120 kondygnacji (i).

W przypadku budynków bardzo wysokich zastosowanie układów megaramy i megasłupów wymaga bardzo silnego i skomplikowanego zbrojenia złożonego z kształtowników stalowych, jak również stosowania betonów wysokiej wytrzymałości. Obecnie najbardziej rozpowszechnione są rozwiązania z zastosowaniem stalowych rur wypełnionych betonem lub w postaci przekrojów skrzynkowych utworzonych przez spawanie grubych blach.

W ramach Council on Tall Buildings and Urban Habitat przeprowadzono szeroko zakrojone badania doświadczalne zespolonych megasłupów zbrojonych kilkoma walcowanymi na gorąco kształtownikami oraz prętami zbrojeniowymi i strzemiętami zatopionymi w betonie. Wyniki tych badań zostały niedawno opublikowane, wraz z podaniem uproszczonej metody projektowania [8].

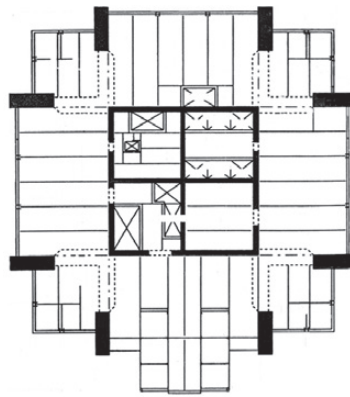
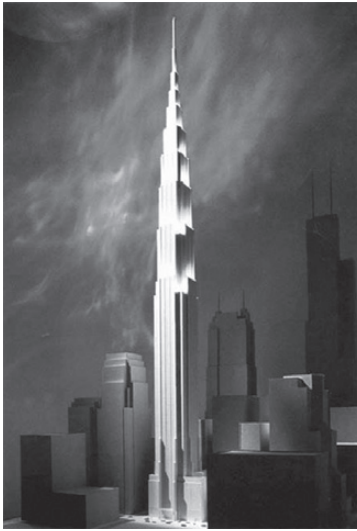
#### Przykłady zastosowania konstrukcji zespolonych w budynkach wysokich

Niżej opisano przykłady budynków wysokich, w których zastosowano konstrukcje zespolone przenoszące obciążenia poziome działające na budynek. Wybrano budynek superwysokie, aby prześledzić indywidualne rozwiązania, w szczególności megasłupów. Pominięto budynki, w których elementami zespolonymi są tylko zespolone stropy albo proste słupy zespolone wykonane jako przekroje rurowe wypełnione betonem.

- **Miglin Beitler Tower w Chicago (610 m, niezrealizowany, proponowany w 1988 r.).** Jednym z pierwszych projektów, niestety niezrealizowanych, w którym zastosowano megaramę i megasłupy oraz konstrukcje zespolone, był zaprojektowany pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku przez architekta *Cezarego Pelli* i firmę konstrukcyjną *Thornton Tomasetti* budynek Miglin Beitler Tower w Chicago. Budynek miał mieć wysokość wraz z iglicą 610 m i miał być najwyższym budynkiem na świecie w tym okresie (rys. 3).

Konstrukcja budynku miała się składać z kilku podstawowych elementów: żelbetowego trzonu  $19 \times 19$  m, ośmiu monolitycznych megasłupów o konstrukcji zespolonej o wymiarach u podstawy  $2,0 \times 11,0$  m, w środku wysokości  $1,7 \times 5,0$  i w pobliżu szczytu  $1,4 \times 4,5$  m, ośmiu belek usztywniających łączących na każdej kondygnacji trzon z megasłupami, zespolonych stropów, zewnętrznych stalowych dźwigarów *Vierendela*, które eliminują konieczność wykonania słupów narożnych.

- **Bank of China (367 m, wybudowany w 1990 r.).** W tym budynku (rys. 4; architektura *I.M. Pei*, konstrukcja *Lessie E. Robertson*) po raz pierwszy zastosowano przestrzenną kratownicę, która przenosi prawie całkowity ciężar budynku i jednocześnie przejmuje całość sił poziomych. Wszystkie

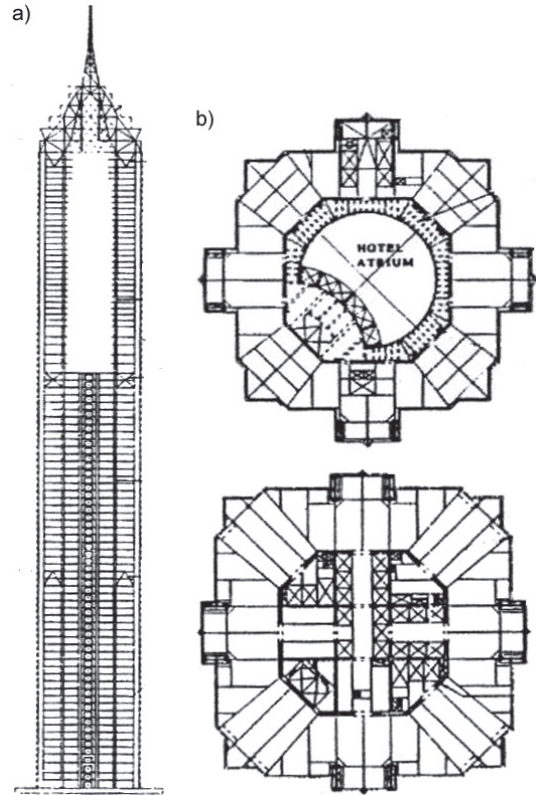


Rys. 3. Miglin Beitler Tower – niezrealizowany projekt budynku w Chicago [8]: wizualizacja i przekrój kondygnacji

obciążenia budynku są przekazywane przez układy ramowe na cztery narożne słupy o konstrukcji zespolonej. Piąty słup konstrukcji sięga od wierzchołka do 25. kondygnacji, gdzie przekazuje całość obciążeń po przekątnych na cztery słupy narożne.

● **Jin Mao Tower (421 m, ukończony w 1999 r.)**. Jest to budynek 88-kondygnacyjny (rys. 5), zaprojektowany przez amerykańską firmę Skidmore Owings and Merrill (SOM) w dostosowaniu do trudnych warunków miejscowych (w tym gruntowych) oraz obciążenia przez tajfuny i oddziaływania sejsmiczne. Ustrój konstrukcyjny składa się z ośmiokątnego żelbetowego trzonu wewnętrznego, wzmocnionego wewnętrznymi ścianami, ośmiu zewnętrznych zespolonych megasłupów i ośmiu stalowych megasłupów. Zewnętrzne słupy zespolone są połączone z trzonem wewnętrznym przez osiem kratownicowych dźwigarów usztywniających (outriggers) wysokości dwóch kondygnacji [11].

Rozwiązanie konstrukcyjne budynku nie tylko okazało się efektywne, jeśli chodzi o zachowanie się budynku pod obciążeniami, ale także ekonomiczne. Porównując koszt konstrukcji Jin Mao Tower z kilkoma innymi budynkami, autorzy [11] uzyskali rezultaty, które przedstawiono w tabl. 2.



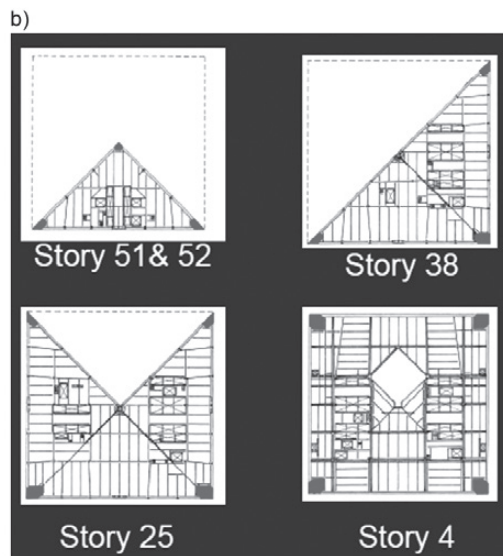
Rys. 5. Konstrukcja budynku Jin Mao Tower: a) przekrój, b) rzuty kondygnacji: u góry – części hotelowej, u dołu – części biurowej [1]

Tablica 2

Porównanie kosztów konstrukcji Jin Mao Tower z kosztami innych podobnych budynków

Budynek	Wysokość m	Konstrukcja	Koszt jednostkowy \$/ft <sup>2</sup>	Porównanie kosztu
Sears Tower	445	stalowa	36,30	1,67
Jin Mao Tower	421	zespolona	21,80	1,00
WorldTrade Center	417	stalowa	40,70	1,87
Amoco Building	346	stalowa	34,70	1,59
John Hancock Center	344	stalowa	32,80	1,51

\$/ft<sup>2</sup> – dolarów/stopę kwadratową.

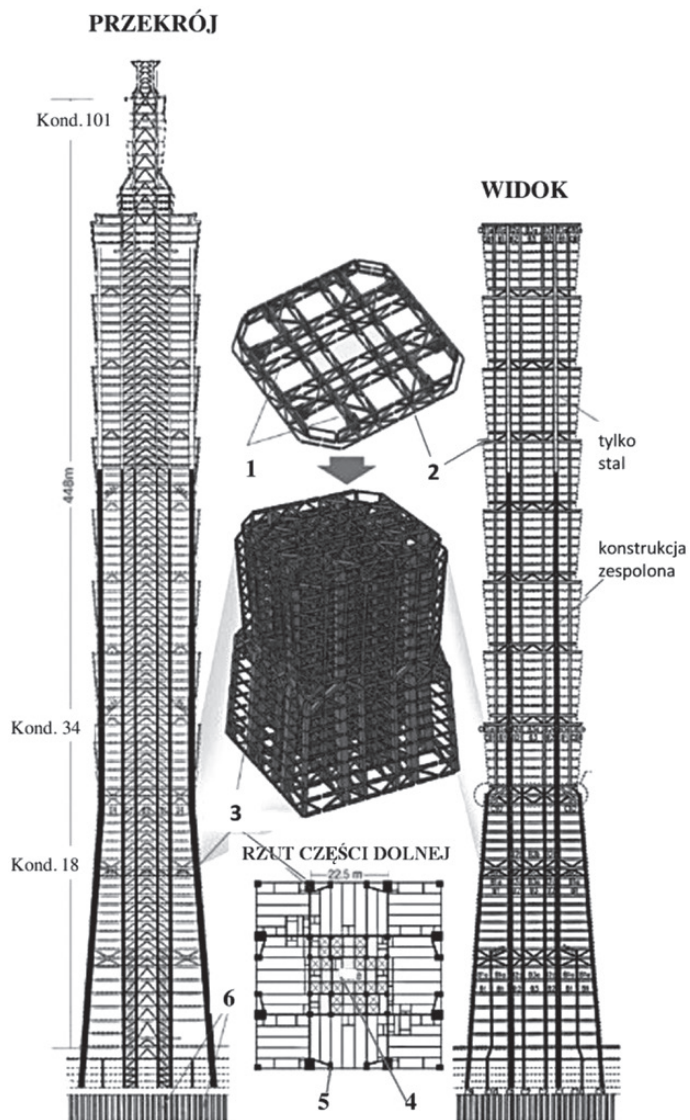


Rys. 4. Bank of China: a) widok, b) rzuty kondygnacji [10]

● **Taipei 101 (508 m, ukończony w 2004 r.)**. Budynek jest klasycznym przykładem celowego zastosowania konstrukcji zespolonych (konstrukcja: *Thornton Tomasetti*). Przez kilka lat był najwyższym budynkiem świata. Lokalizacja budynku w Taipei musiała zapewnić budynkowi bezpieczeństwo w strefie częstych i bardzo silnych tajfunów, wysokiego zagrożenia ciężkimi działaniami sejsmicznymi i trudnymi warunkami geologicznymi. Generalnie biorąc, konstrukcja budynku jest megaramą złożoną z trzonu wewnętrznego i szeregu megasłupów usytuowanych na obrysie zewnętrznym budynku, połączonych z trzonem co 8 kondygnacji za pomocą kratownicowych dźwigarów usztywniających (outriggers) oraz

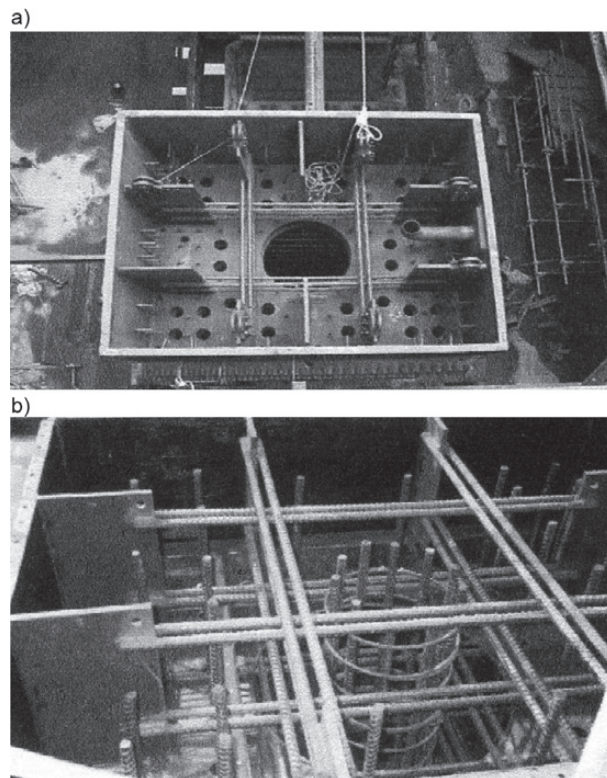


kratownic opasujących (rys. 6). Megasłupy zostały zaprojektowane jako stalowe przekroje skrzynkowe o wymiarach u podstawy  $2,4 \times 3,0$  m, spawanych z blach grubości od 50 do 80 mm. Spawanie tych blach trwało 16 h i było wykonywane równocześnie przez sześciu spawaczy, aby zrównoważyć efekty skurczowe. Słupy miały dodatkowe zbrojenie (rys. 7) i były wypełnione betonem o wytrzymałości 69 MPa do poziomu 62. kondygnacji, a powyżej pozostały niewypełnione jako konstrukcja stalowa. Również stalowa kratownica w ścianach trzonu wewnętrznego została zabetonowana do wysokości 8. kondygnacji.



Rys. 6. Konstrukcja Taipei 101. Przekrój; widok; rzut części dolnej. 1 – dźwigary usztywniające outriggers, 2 – kratownice opasujące, 3 – pochylone megasłupy, 4 – trzon wewnętrzny, 5 – dodatkowe pochylone słupy, 6 – pale [13, 14]

• **Shanghai World Financial Center (492 m, ukończony w 2008 r.).** Zaprojektowana przez LERA (*Leslie Robertson*) konstrukcja budynku o zwiększonych wymiarach zarówno w rzucie, jak i wysokości musiała być dostosowana do wcześniej wykonanego palowania, wynikającego z pierwotnego projektu (*Kohn, Pedersen, Fox Assoc.*). Wymagało to zmniejszenia ciężaru budynku o ponad 10% i przejścia większych obciążeń poziomych przez nowo zaprojektowaną konstrukcję. Aby zmniejszyć ciężar budynku, projektant zmniejszył grubość ścian trzonu wewnętrznego.

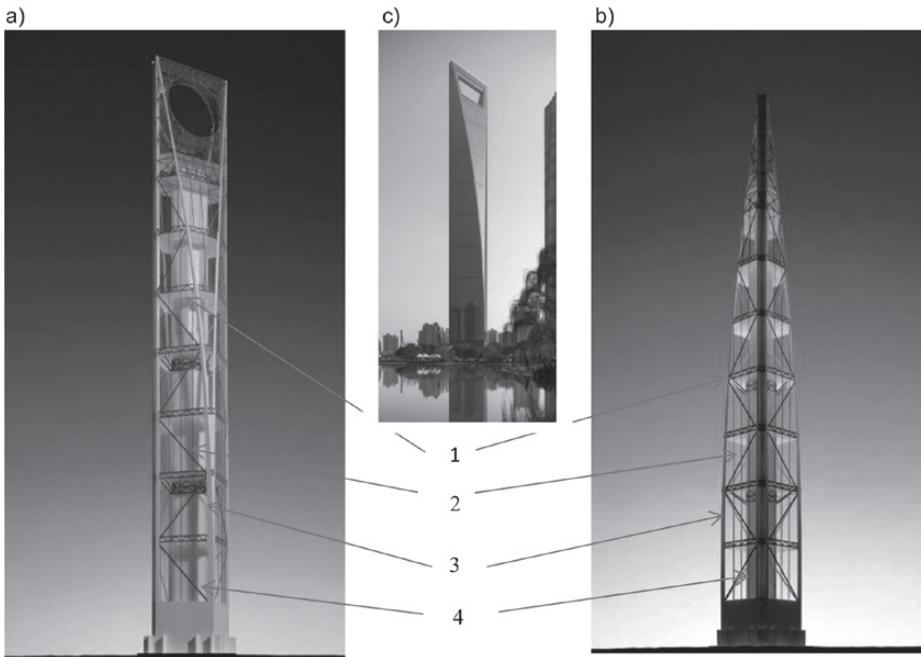


Rys. 7. Taipei 101. Konstrukcja megasłupów zespolonych – zbrojenie: a) przekrój skrzynkowy megasłupa, b) układ zbrojenia w megasłupie [13]

W ten sposób zmniejszył udział tego trzonu w przenoszeniu sił poziomych i zwiększył udział konstrukcji na obrysie, czyli usytuowanych tam megasłupów oraz układu dźwigarów usztywniających (outriggers), zapewniających współpracę trzonu wewnętrznego z konstrukcją na obrysie budynku. Zaprojektowana megakonstrukcja składa się z megasłupów, krzyżulców i dźwigarów opasujących, żelbetowego trzonu wewnętrznego i dźwigarów usztywniających (outriggers) wiążących trzon wewnętrzny z megasłupami [15]. Szczegóły ilustrują rys. 8 i 9.

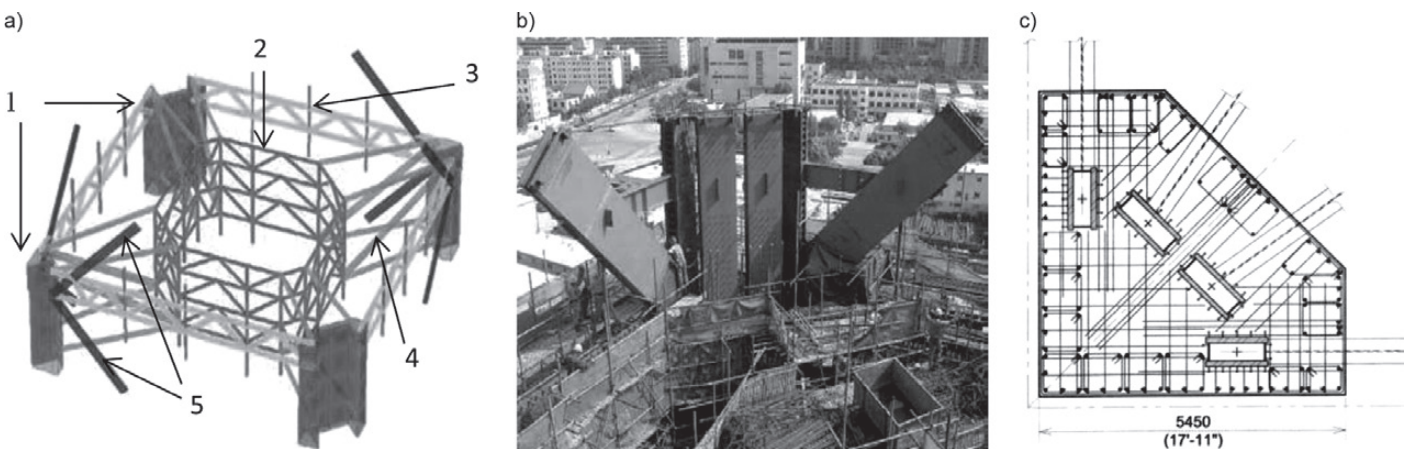
• **Shanghai Tower (632 m, ukończony w 2015 r.).** Ustrój konstrukcyjny budynku składa się z trzech zasadniczych elementów: trzonu wewnętrznego o konstrukcji zespolonej, zewnętrznej megaramy (złożonej z superśłupów i podwójnych kratownic opasujących) i kratownic usztywniających na sześciu poziomach (Concrete Composite Core, Exterior Mega Frame (Super Columns and Double Belt Trusses and Outrigger Trusses) [16] (rys. 10). Zarówno trzon wewnętrzny, jak i superśłupy są konstrukcjami zespolonymi wykonanymi z kształtowników stalowych i otaczającego ich betonu. Trzon ma dziewięć komór o powierzchni w rzucie  $30 \text{ m}^2$  w strefach od 1 do 4. Cztery narożne komory znikają w strefach 5 i 6 i trzon otrzymuje w planie kształt krzyża w strefie 7 i 8. Grubość zewnętrznych ścian zmienia się od 1,2 m u podstawy do 0,5 m u szczytu, a ścian wewnętrznych od 0,9 do 0,5 m. Zatiopione w betonie stalowe słupy z dwuteowników szeroko-stopowych zostały umieszczone we wszystkich strefach połączeń i w narożach zarówno w celu wzmocnienia trzonu, jak również utworzenia wyraźnej drogi strumienia sił z dźwigarów usztywniających (outriggers) na trzon. Betonowe ściany trzonu na poziomach 1 i 2 są zbrojone płytami stalowymi, aby zwiększyć podatność ścian (ductility) i umożliwić zmniejszenie ich grubości [17]. Zewnętrzna



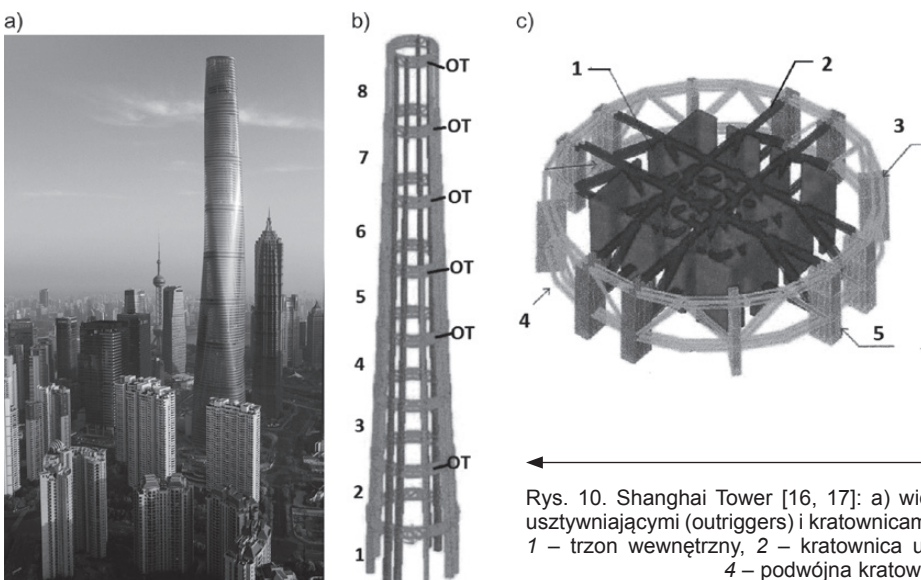


Rys. 8. Widok (c) i model (a i b) megakonstrukcji Shanghai World Financial Center [15]: 1 – kratownice opasujące, 2 – usztywnienia diagonalne (megakrzyżulce), 3 – megasłupy, 4 – ściany trzonu wewnętrznego

megarama składa się z ośmiu super-słupów sięgających aż do strefy 8 i czterech słupów usytuowanych po przekątnej sięgających strefy 5. Przekrój stalowych kształtowników w super-słupach wynosił od 4 do 6% przekroju słupa. Super-słupy, wraz z ośmioma zespołami podwójnych, sięgających dwóch kondygnacji, kratownic opasujących (belt trusses) tworzyły „zewnętrzną megaramę”. Zewnętrzna i wewnętrzna kratownica opasująca są ze sobą powiązane i tworzą przestrzenną skrzyńkową kratownicę, wspomagając sztywność skrętną konstrukcji. Te kratownice służą również do przenoszenia obciążeń pionowych z drugorzędnych słupów na super-słupy [17]. Sześć zespołów dźwigarów usztywniających (outriggers) wysokości dwóch kondygnacji zostało usytuowanych na kondygnacjach technicznych (między strefą 2 i 3, między strefą 3 i 4 i potem na szczycie każdej strefy).



Rys. 9. Konstrukcja Shanghai World Financial Center [15]: a) schemat konstrukcji (1 – megasłupy, 2 – kratownice ścian betonowego trzonu wewnętrznego, 3 – kratownice opasujące, 4 – dźwigary usztywniające (outriggers) łączące trzon wewnętrzny z megasłupami, 5 – megakrzyżulce), b) mega-krzyżulce: spawane przekroje skrzyńkowe wypełnione betonem, c) przekrój przez narożny megasłup na najniższych kondygnacjach (wymiar 5,45 m), konstrukcja zespolona, poza przekrojami stalowymi zbrojenie wiązkami prętów 4  $\phi$  50 mm



Rys. 10. Shanghai Tower [16, 17]: a) widok, b) megarama i strefy oddzielone dźwigarami usztywniającymi (outriggers) i kratownicami opasującymi, c) schemat układu konstrukcyjnego; 1 – trzon wewnętrzny, 2 – kratownica usztywniająca (outrigger), 3 – słup na przekątnej, 4 – podwójna kratownica opasująca, 5 – super-słup

• **China Zun Tower, Beijing (528 m, przewidywane ukończenie 2018 r.)** W większości omawianych wyżej budynków trzon wewnętrzny stanowił podstawowy element zapewniający sztywność poziomą, a konstrukcja zewnętrzna była elementem uzupełniającym. Taka strategia w przypadku Zun Tower nie pozwalała na uzyskanie wystarczającej sztywności i dlatego konstrukcja zewnętrzna wraz z trzonem

centralnym stanowiła w nim dualny system przeciwdziałania siłom poziomym [19].

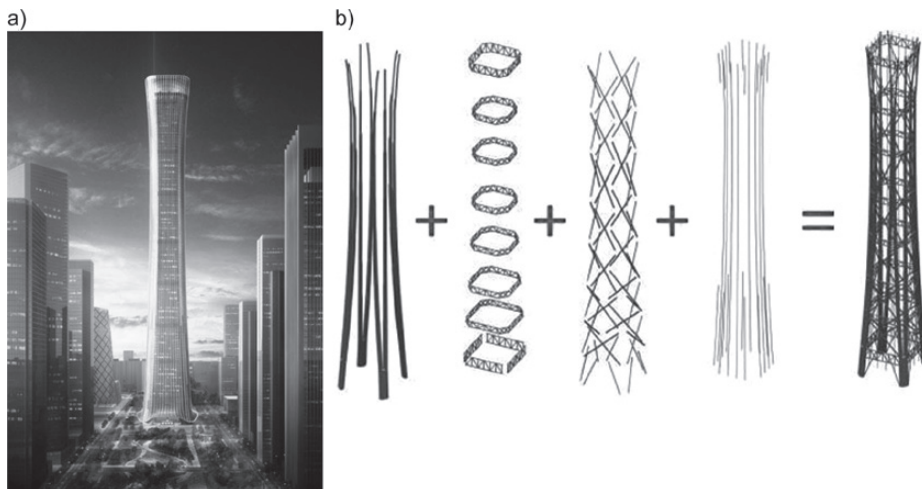
W Zun Tower zastosowano jako konstrukcję zewnętrzną kratownicową megaramę utworzoną z megasłupów, megakrzyżulców i kratownic usztywniających. Kondygnacje mechaniczne i ewakuacyjne dzielą budynek na 9 stref, które stanowią segmenty megaramy (rys. 11, 12). W większości stref dwa megasłupy, wykonane jako rura wypełniona betonem (CFT), są usytuowane w narożach przekroju. W strefie 0 słupy te łączą się ze sobą, tworząc jeden słup. Na każdej stronie słupy są powiązane stalowymi krzyżulcami oraz kratownicami opasującymi [19].

Megasłupy są utworzone przez płaszczyznę stalową wypełnioną zbrojeniem i betonem, co ułatwia połączenie z kratownicami opasującymi i krzyżulcami. W strefie 0 megasłupy tworzą potężny wieloboczny przekrój składający się z kilku wypełnionych betonem rur (CFT) i dodatkowego zbrojenia prętami. Do wypełnienia zastosowano beton klasy C70÷C50.

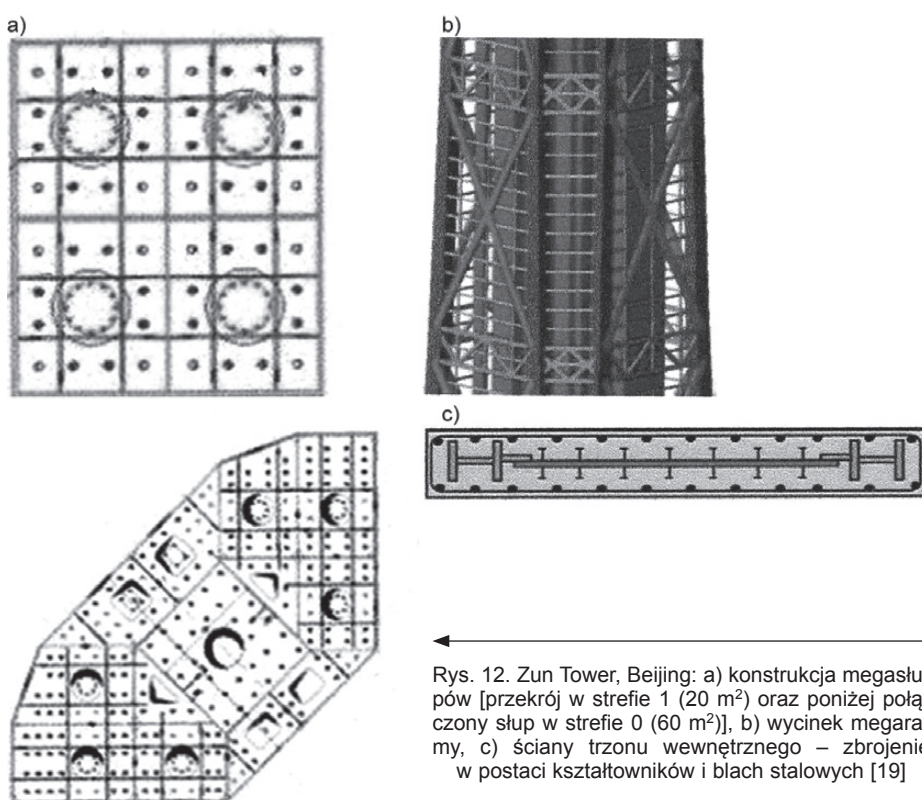
Trzon wewnętrzny ma wymiary u podstawy 39 × 39 m. Jego ściany zostały wykonane z betonu klasy C60, a zbrojenie stanowią pręty zbrojeniowe i płyta stalowa (w angielskiej nomenklaturze CSW – Composite Shear Wall). Takie rozwiązanie zwiększa wytrzymałość konstrukcji i jej sztywność oraz zapewnia ognioodporność. Grubość ścian u podstawy wynosiła 1200 mm, a u szczytu 400 mm. Płyta stalowa zbrojona miała u podstawy grubość 60 mm, a od 41. kondygnacji 30 mm. Stalowe pionowe kształtowniki umieszczone w narożach i zakończeniach ścian były zabezpieczeniem przed możliwością powstania sił rozciągających i zwiększały podatność konstrukcji (ductility). W budynku zastosowano zespolone stropy [19].

• **Guangzhou International Finance Center (440 m, ukończony w 2010 r.).** Konstrukcja budynku jest przestrzennym układem prętowym (diagrid) i nie ma megasłupów, kratownic opasujących ani dźwigarów usztywniających (outriggers). Ustrój konstrukcyjny (rys. 13) składa się z żelbetowego trzonu wewnętrznego i zewnętrznego układu prętowego, których współpraca została zapewniona przez wewnętrzny układ ramowy i krzyżulce. Elementy układu prętowego są wykonane ze stalowych rur wypełnionych betonem. Maksymalna średnica tych rur wynosi 1800 mm, a grubości ścianki 35 mm. Długość ramion elementów trójkątnych układu prętowego wynosi 27 m [20, 21].

• **Tianjin Goldin Finance 117 Tower (597 m, przewidywane ukończenie 2019 r.).** Budynek ma przekrój



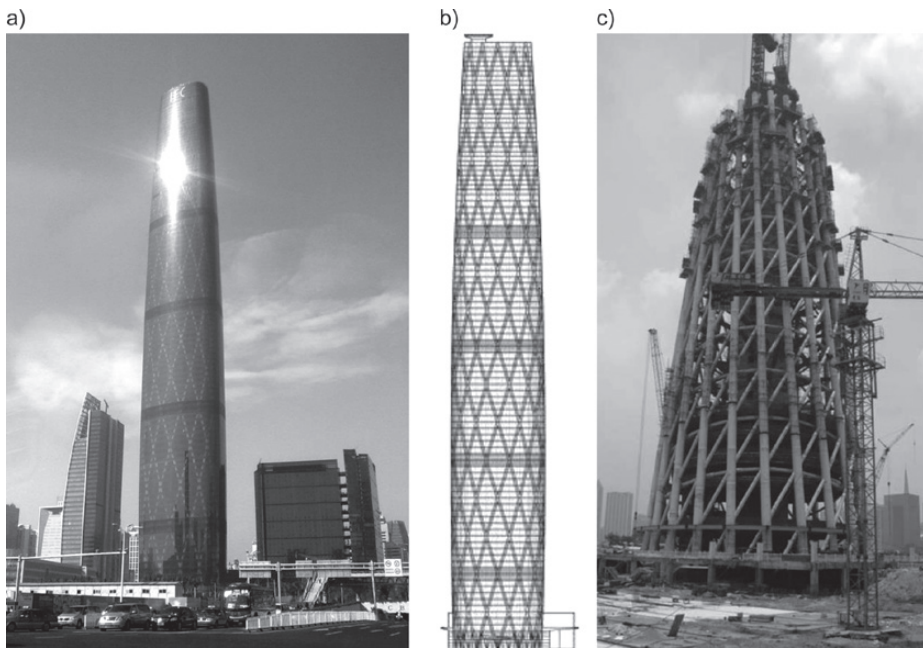
Rys. 11. Zun Tower, Beijing: a) widok, b) megarama zewnętrzna i jej elementy: megasłupy, stalowe kratownice opasujące, krzyżulce, dodatkowe słupy przenoszące obciążenia pionowe



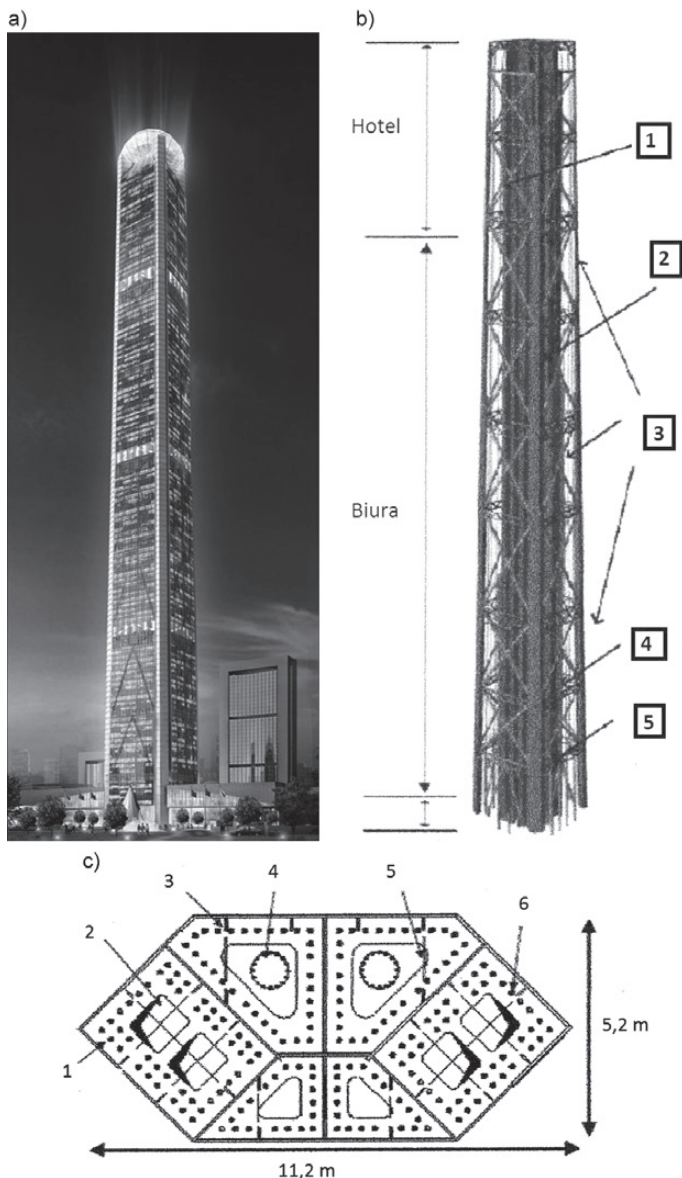
Rys. 12. Zun Tower, Beijing: a) konstrukcja megasłupów [przekrój w strefie 1 (20 m<sup>2</sup>) oraz poniżej połączony słup w strefie 0 (60 m<sup>2</sup>)], b) wycinek megaramy, c) ściany trzonu wewnętrznego – zbrojenie w postaci kształtowników i blach stalowych [19]

kwadratowy o boku u podstawy 65 × 65 m, zwężający się u szczytu do 45 × 45 m. Ustrój konstrukcyjny składa się z zewnętrznego trzonu kratownicowego, który tworzą cztery megasłupy, każdy o powierzchni 45 m<sup>2</sup>, dziewięć kratownic opasujących i megakrzyżulce (rys. 14). Trzon wewnętrzny stanowią ściany żelbetowe, zbrojone dodatkowo kształtownikami stalowymi i płytami stalowymi. Megasłupy są utworzone z sześciobocznych stalowych skrzyń i dodatkowych blach stalowych dzielących ten przekrój na szereg komór, umieszczonego wewnątrz każdej z komór zbrojenia prętami stalowymi oraz wypełnienia betonem klasy C70÷C50. Zbrojenie prętami zbrojeniowymi 0,5÷0,8%. Wszystkie płyty zewnętrzne są usztywnione na wewnętrznej powierzchni pionowymi żebrami i połączone ze zbrojeniem. Sześcioboczny przekrój ułatwia połączenie z megausztywnieniami i kratownicami opasującymi. Z uwagi na ograniczenia transportowe i możliwości podnoszenia przez





Rys. 13. Guangzhou International Finance Center: a) widok, b) zewnętrzny przestrzenny układ prętowy, c) konstrukcja w trakcie budowy [21]



dźwig, przekrój megastupa składa się z dwóch połówek łączonych spawaniem już po podniesieniu na miejsce. Również stropy są wykonane jako konstrukcje zespolone [21, 22].

• **Wuhan Greenland Center (636 m, przewidywane ukończenie 2018 r.)** [23].

Ustrój konstrukcyjny został bardzo starannie dostosowany do architektury budynku i zapewnienia budynkowi jak najlepszych cech aerodynamicznych. W celu zmaksymalizowania sztywności konstrukcji, jaką zapewnia rzut budynku w kształcie litery "Y", zostały dodane po dwa supersłupy (SC1) na końcach każdego ze skrzydeł budynku. Dodatkowo umieszczono także po dwa supersłupy (SC2) na zewnętrznym obrysie budynku (rys. 15). Ściany trzonu wewnętrznego wykonano jako konstrukcje zespolone zbrojone lokalnie płytami stalowymi. Takie rozwiązanie zwiększa zarówno wytrzymałość, jak również odkształcalność (ductility) ścian. Super słupy o wymiarach w rzucie do  $3,3 \times 4,6$  m, o konstrukcji zespolonej (SRC) składają się z zatopionych w betonie spawanych kształtowników stalowych i żelbetu. Stalowe outriggery wysokości dwóch i trzech kondygnacji łączą supersłupy ze ścianami trzonu wewnętrznego na poziomach  $36 \div 39$ ,  $67 \div 70$  i  $101 \div 103$ , a na wysokości  $121 \div 123$  kondygnacji zastosowano kratownice szczytowe.

Na obrysie zewnętrznym zastosowano dziesięć zespołów stalowych kratownic opasujących rozłożonych na wysokości budynku.

Wszystkie outriggery i kratownice opasujące zostały umieszczone na piętrach mechanicznych i ewakuacyjnych [23]. W konstrukcji rozważano zastosowanie megastupów CFT (concrete filled tubes) (por. rys. 15c) [6]. Słupy te mają średnicę 3 m i maksymalną grubość ścianek 60 mm.

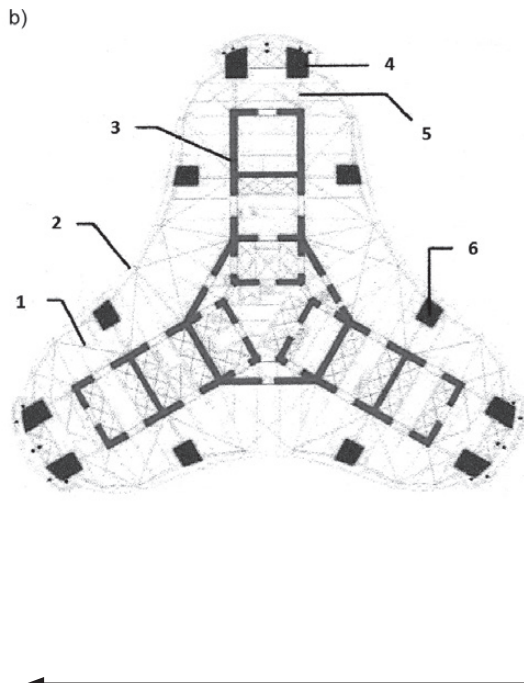
**Innowacyjne rozwiązania zespolonych elementów budynków wysokich**

Z przytoczonych przykładów widać, że rozwiązania elementów zespolonych konstrukcji budynków wysokich różnią się między sobą kształtem, rozłożeniem materiału, proporcjami między stali do betonu – w zależności od potrzeb danego budynku. Wzorując się na publikacji *Liu Peng* [6] można wyodrębnić w nowoczesnych budynkach wysokich i superwysokich (powyżej 300 m) wiele omówionych niżej rozwiązań innowacyjnych.

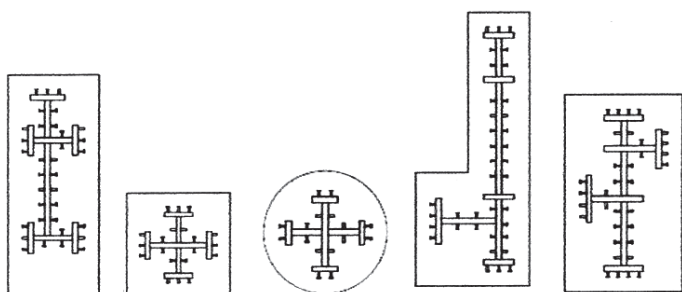
• **Słupy zespolone.** Tego rodzaju słupy (rys. 16) są szeroko stosowane we wszystkich rodzajach budynków wysokich, ale pojawiło się wiele nowych kształtów i konfi-

Rys. 14. Tianjin Goldin Finance 117: a) widok, b) system konstrukcyjny: 1 – megakrzyżulec, 2 – kratownica opasująca o wysokości jednej kondygnacji, 3 – kratownica opasująca o wysokości dwóch kondygnacji, 4 – megastup, 5 – żelbetowy trzon ze ścianami w konstrukcji zespolonej, c) megastup na poziomie parteru: 1 – pręty zbrojenia, 2 – otwór-właz, 3 – pionowe żebro, 4 – wiązka prętów zbrojeniowych, 5 – poziome strzemię, 6 – otwór odpowietrzający





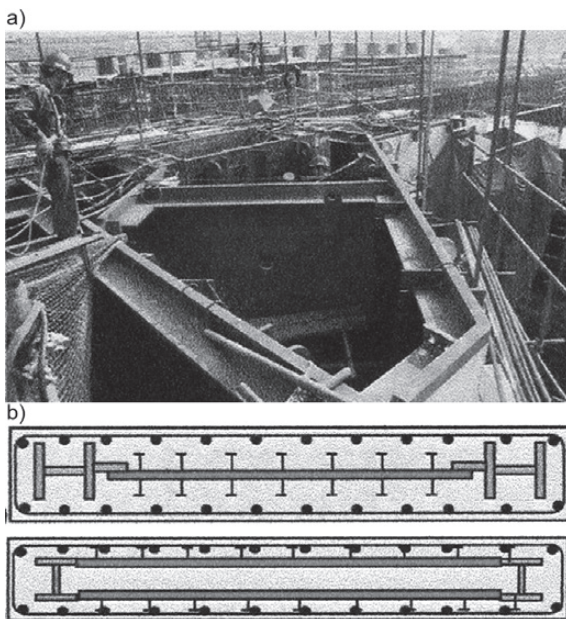
Rys. 15. Wuhan Greenland Center: a) widok, b) schemat konstrukcyjny: 1 – poziome usztywnienia stropowe, 2 – obwodowa kratownica opasująca, 3 – ściana trzonu, 4 – superstupy SC1, 5 – kratownica usztywniająca (outrigger), 6 – superstupa SC2 [6, 23]



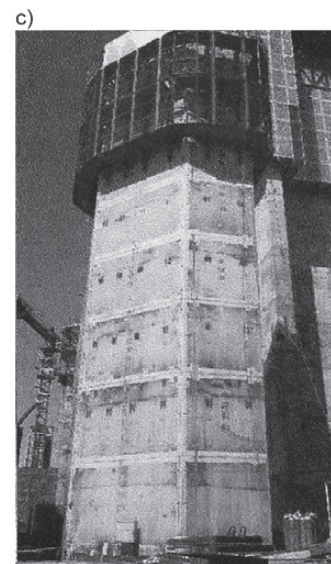
Rys. 16. Różne kształty słupów zespolonych [6]

guracji z uwagi na wymagania architektoniczne i użytkowe.

Kształtowniki stalowe w zespolonych słupach (SRC – Steel Reinforced Concrete) są mniej narażone na wyboczenie niż w konstrukcjach stalowych i dzięki temu istnieje większa swoboda rozłożenia ich w przekroju. Jest rzeczą ważną, aby płyty stalowe zostały rozłożone równomiernie w przekroju betonowym, tak aby uzyskać współpracę całego przekroju stalowo-betonowego. Z uwagi na różne kształty i konfiguracje przekrojów stalowych zwykle do analizy wytrzymałościowej stosuje się metodę elementów skończonych, przyjmując zasadę płaskich przekrojów oraz właściwości mechaniczne każdego z materiałów. Powinno się jednak uwzględnić dodatkowy moment wynikający ze smukłości i efektów drugorzędnych [6].



Rys. 17. Tianjin Goldin 117 Tower: a) wykonywanie megastłupa, b) ściana zespolona: z pojedynczą płytą stalową oraz z dwiema płytami stalowymi, c) fotografia z budowy [6]



• **Zespolone megastłupy.** Megastłupy prawie zawsze są wykonywane jako zespolone z uwagi na wymaganą dużą sztywność i wytrzymałość. Przekrój megastłupa powinien być tak ukształtowany, aby uprościć połączenia z innymi elementami konstrukcji. Ponieważ przekrój megastłupa może być bardzo duży (największe dotychczas stosowane to 60 m<sup>2</sup>), więc powinien być traktowany jako minikonstrukcja, w której płyty stalowe są łączone przez spawanie, a współpracę przekrojów stalowych z betonem zapewniają łączniki. Każdy strumień sił powinien zapewniać skuteczne przekazanie sił zewnętrznych na odpowiednie przekroje, tak jak to było założone w modelu, ponieważ w przeciwnym przypadku nie zostaną spełnione warunki płaskich przekrojów i wytrzymałość może być niedoszacowana [6].

Do przekazania sił ścinających między kształtownikami i betonem w zespolonych megastłupach kształtowniki powinny mieć łączniki rozmieszczone na całej ich powierzchni.

Przekroje skrzynkowe wypełnione betonem (CFT) uzyskują coraz szersze zastosowanie w megastłupach nowoczesnych budynków superwysokich (w Chinach: Shenzhen Kingkey 100 Tower, Tianjin Goldin 117 Tower, Guangzhou East Tower, Beijing China Zun Tower). W dużych megastłupach (rys. 17) przekrój słupa może się składać z szeregu komór utworzonych z zespalanych blach stalowych. W takich słupach blachy tworzące wielokomorowy przekrój są łączone, stanowiąc ciągłą obudowę słupa. Do blach tworzących wielokomorowy przekrój mogą być przyspawane płyty usztywniające, aby zapobiegać lokalnym wybočeniom, gdy słup jest wypełniany betonem. Do wypełnienia używa się mieszanki betonu samozagęsz-



czalnego. Duże megasłupy powinny mieć dodatkowe zbrojenie z pojedynczych prętów lub zespołów prętów, aby polepszyć odkształcalność (ductility) przekroju. W przypadku wielkich wymiarów przekroju zespolonego (np. Tianjin Goldin 117 Tower) kształt dwóch połówek przekroju sześciobocznego megasłupa upraszcza połączenie megakrzyżulców i kratownic opasujących. Wymiary połówek słupa zostały tak dobrane, aby mogły być przetransportowane i podniesione za pomocą istniejącego sprzętu, a następnie połączone w całość przez spawanie [6].

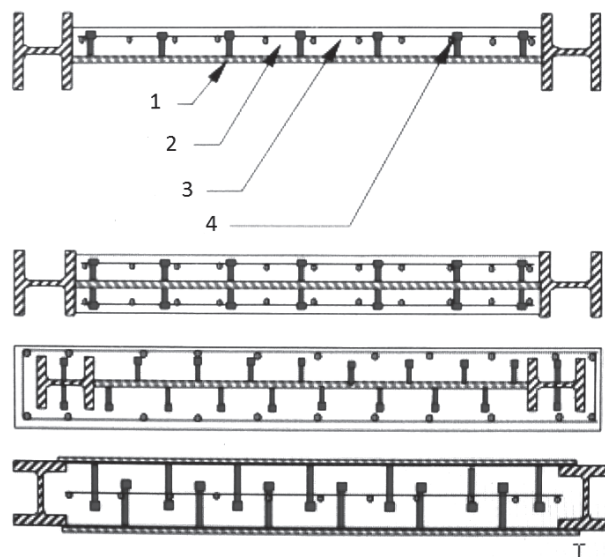
• **Ściany zespolone.** Ściany żelbetowe są elementem, który zapewnia dużą sztywność, i jednocześnie służą jako naturalne przegrody urządzeń transportu pionowego. Charakteryzują się jednak kruchym zniszczeniem przy obciążeniach powtarzalnych (hysteretic loading) i ich zastosowanie w regionach sejsmicznych jest ograniczone. W budynkach superwysokich, w których ściany nośne są obciążone dużymi siłami osiowymi, ich wytrzymałość wskutek tego znacząco się zmniejsza. W takich budynkach stosuje się ściany zespolone, w których jest zatopiona jedna lub dwie płyty stalowe (por. rys. 1c). Otaczający beton chroni płyty przed wyboczeniem. Dzięki temu można wykorzystać pełny przekrój stalowy, a nośność takiej ściany znacznie się zwiększa. Płyta stalowa przejmuje osiowe obciążenie pionowe, a poza tym można zredukować grubość ściany. Na krawędziach płyt stalowych umieszcza się zwykle kształtowniki stalowe (elementy pionowe i poziome), które są ograniczeniami płyty. Te kształtowniki stanowią również część ukrytego słupa oraz przenoszą siły osiowe i momenty zginające działające na ścianę. Ściana zespolona z podwójnymi płytami stalowymi jest stosowana wówczas, gdy pojedyncza płyta stalowa jest zbyt gruba, aby mogła być spawana na budowie bez wprowadzenia dużych naprężeń od spawania. Podwójne płyty stalowe mogą być montowane jako gotowe elementy skrzynkowe łączone ze sobą na placu budowy. W takich rozwiązaniach nie jest konieczne zbrojenie prętami przestrzeni między płytami. Po zmontowaniu skrzynkowych elementów stalowych wykonuje się po obu stronach zewnętrzną warstwę ściany jako żelbetową. W rezultacie gotowa ściana wygląda jak zwykła ściana żelbetowa.

Takie ściany z podwójnym zbrojeniem płytami stalowymi po raz pierwszy zostały zastosowane w Chinach w budynku China World Trade Center (Beijing, wysokość 330 m) ukończonym w 2009 r. Później to rozwiązanie było szeroko stosowane w wielu budynkach superwysokich. Żelbetowy trzon z elementami konstrukcji zespolonej staje się rozwiązaniem najbardziej ekonomicznym. To rozwiązanie różni się od pierwowzoru stosowanego w USA (rys. 18) [6, 24+26].

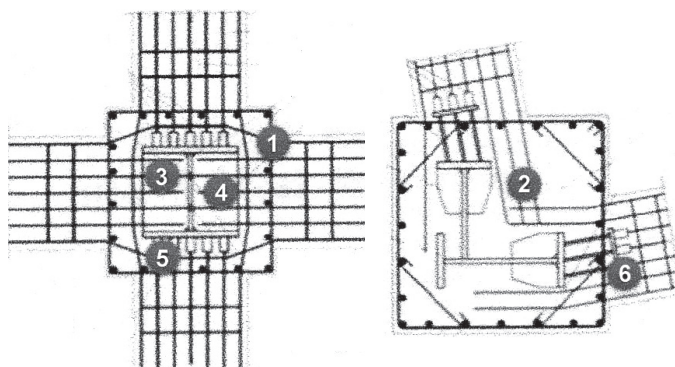
• **Połączenia w konstrukcjach zespolonych.** Połączenia w tych konstrukcjach mają decydujący wpływ na zachowanie się konstrukcji pod wpływem obciążeń. Specyfika projektowania połączeń w konstrukcjach zespolonych obejmuje:

- dokładne rozważenie współpracy między elementami stalowymi i prętami zbrojenia;
- zapewnienie odpowiedniej jakości mieszanki betonowej stosowanej w konstrukcjach, szczególnie tam, gdzie istnieje silne zagęszczenie przez zbrojenie kształtownikami stalowymi i prętami.

Różne rozwiązania zakotwienia prętów zbrojenia w konstrukcjach zespolonych przedstawiono na rys. 19 [6].



Rys. 18. Ściany zespolone stosowane w Stanach Zjednoczonych [28]: 1 – płyta stalowa, 2 – ściana betonowa, 3 – zbrojenie, 4 – łączniki (shear connectors)



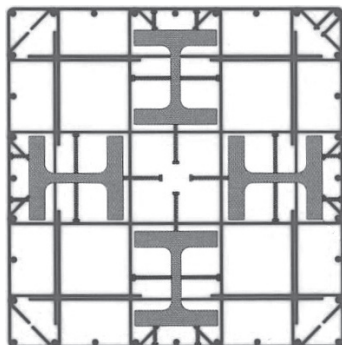
Rys. 19. Różne rozwiązania zakotwienia prętów w zespolonym połączeniu [6]: 1 – pręty proste, 2 – pręty wygięte w celu lepszego zakotwienia, 3 – pręty penetrujące, 4 – pręty spawane do płyty, 5 – łącznik prostopadły, 6 – łącznik ukośny

### Przyszłość konstrukcji zespolonych

Zastosowanie konstrukcji zespolonych w budynkach wysokich będzie coraz szersze i coraz bardziej doskonałe. Wykorzystane w sposób strategiczny konstrukcje zespolone staną się podstawowym rozwiązaniem w nowoczesnych budynkach wysokich. Istnieje pilna potrzeba optymalizacji wykorzystania materiałów i redukcji wymiarów elementów stosowanych w konstrukcjach budynków wysokich. Stałym dążeniem jest zminimalizowanie wymiarów elementów pionowych konstrukcji, bez uszczerbku dla ekonomiczności rozwiązań, ułatwienie w wykonawstwie i ograniczenie ich udziału w rzucie budynku. Stosowanie konstrukcji zespolonych z zastosowaniem materiałów (betonu i stali) wyższej jakości jest jednym z kierunków w nowych rozwiązaniach [8].

Obecnie konstrukcje zespolone w postaci rury lub przekroju skrzynkowego wypełnionego betonem (CFT – concrete filled tubes), wykonane z grubych blach spawanych, są rozwiązaniem podstawowym. Ich głównymi wadami są: wysoki koszt, potrzeba zatrudnienia wysokokwalifikowanych specjalistów, skomplikowane połączenia i konieczność zagwarantowania odpowiednich warunków do spawania grubych płyt, takich jak podgrzewanie, przygotowanie krawędzi płyt. Badania podjęte przez CTBUH we współpracy z AcelorMittal, Magnusson Klemencic

Association, China Academy of Building Research Technologies i laboratorium uniwersytetu Tsinghua dotyczyły megasłupów złożonych z kilku walcowanych na gorąco kształtowników stalowych otoczonych betonem zbrojonym (rys. 20) – jako nowego rozwiązania, które mogłoby być stosowane w budynkach wysokich. Wyniki tych badań i metody przybliżonego obliczania zawiera publikacja CTBUH „Composite Megacolumns” [8].



Rys. 20. Przekrój elementów próbnych do badań statycznych (450 × 450 mm), zbrojenie: kształtowniki 4HEM100 (H120×106×12×20),  $f_{yk} = 355$  MPa oraz pręty zbrojeniowe i strzemiona jak na rysunku (zbrojenie: pręty średnicy 8 mm, strzemiona średnicy 3,25 mm co 80 mm,  $f_{yk} = 400$  MPa, beton klasy C60,  $f_{ck} = 60$  MPa [8])

#### PIŚMIENNICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] CTBUH 2013: A Tall Building Review; CTBUH Journal 2014 issue. <http://www.ctbuh.org/Publications/Journal/InNumbers/tabid/1108/language/en-US/Default.aspx>.
- [2] *Sarkisian M.*: Designing Tall Buildings Structure as Architecture. Routledge, New York 2012.
- [3] *Kowalczyk R., Sinn R., Kilmiste M.*: Structural Systems for Tall Buildings. McGraw-Hill, Inc. New York 1995.
- [4] *Gu W.*: Trends and Innovations in High-Rise Buildings over the Past Decade. University of Illinois at Urbana-Champaign, MSc Thesis, 2014.
- [5] *Danai P., Parekh U.*: Study of Structural Systems for Composite Construction in High Rise Buildings. Research Paper. "Indian Journal of Research", Vol. 5, Issue 3, March 2016.
- [6] *Peng L.*: Form Follows Function – The Composite Construction and Mixed Structures in Modern Tall Buildings. "International Journal of High-Rise Buildings", September 2014.
- [7] *Colaco J.*: Concrete for Tall Residential and Composite Office Buildings. <http://www.nbmw.com/concrete/5528-concrete-for-tall-residential-and-composite-office-buildings.html>.
- [8] *Trabucco D., Gerardy C., Xiao C., Davies D.*: Composite Megacolumns. Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH), October 2016. Research Report.
- [9] *Thornton Ch., Prasad J., Hungspruke U., DeScenza R.P.*: Miglin Beitler Tower Chicago III. IABSE Congress Report Band 14 (1992).
- [10] *Gu Ch., Yan H., Song Y., Jiang Y., Su Z.*: Bank of China Hong Kong ARCH 631 – [https://www.google.pl/?gfe\\_rd=cr&ei=sFusWMPPDdHi8Afzi6jIDA&gws\\_rd=ssl#q=bank+of+china+structural+system+pdf](https://www.google.pl/?gfe_rd=cr&ei=sFusWMPPDdHi8Afzi6jIDA&gws_rd=ssl#q=bank+of+china+structural+system+pdf).
- [11] *Korista D.S., Sarkisian M.P., Abdelrasaq A.K.*: Jin Mao Tower's Unique Structural System CTBUH Research Paper, 1995.
- [12] *Teng W., Wang Y., Huang F., Chen H.*: Mengyuan. The Jin Mao Tower. [https://www.google.pl/?gfe\\_rd=cr&ei=sFusWMPPDdHi8Afzi6jIDA&gws\\_rd=ssl#q=jin+mao+tower+shanghai+structure+pdf](https://www.google.pl/?gfe_rd=cr&ei=sFusWMPPDdHi8Afzi6jIDA&gws_rd=ssl#q=jin+mao+tower+shanghai+structure+pdf).
- [13] *Poon D.C.K., Shieh S., Joseph L.M., Chang Ch.*: Structural Design of Taipei 101. World's Tallest Building. CTBUH Research Paper, 2004.
- [14] *Chang K.C.*: Taipei 101 (Taipei Financial Center). A New Challenge in Structural Engineering. Internet: [https://www.google.pl/?gfe\\_rd=cr&ei=ZLzCWP2IOcri8AfzobvYBA&gws\\_rd=ssl#q=Kuo-Chun+Chang,+Taipei+101+&](https://www.google.pl/?gfe_rd=cr&ei=ZLzCWP2IOcri8AfzobvYBA&gws_rd=ssl#q=Kuo-Chun+Chang,+Taipei+101+&). PP Presentation.
- [15] *Katz P., Robertson L.*: Case Study: Shanghai World Financial Center. CTBUH Research Paper, 2008.
- [16] *Zhu Y., Poon D., Velivasakis E.E.*: Structural Design Challenges of Shanghai Tower. Internet: [https://www.google.pl/?gfe\\_rd=cr&ei=bK-7KWMLVAqTi8AfJqr1o#q=shanghai+tower+structure+pdf&](https://www.google.pl/?gfe_rd=cr&ei=bK-7KWMLVAqTi8AfJqr1o#q=shanghai+tower+structure+pdf&).
- [17] *Liu Y., Qu Z., Yue W., Liu D.*: Shanghai Tower. ARCH 631 Applied Arch Structure | Case Study.
- [18] *Xia J., Poon D., Mass D.C.*: Case Study: Shanghai Tower. "CTBUH Journal" 2010. Issue II.
- [19] *Peng L., Yu C., Yan-Song Z.*: The Structural Design of "China Zun" Tower, Beijing. CTBUH Research Paper, 2016.
- [20] *Xwok M., Lee A.*: Engineering of Guangzhou International Financial Centre. CTBUH Research Paper, 2017.
- [21] *Bao L., Chen J., Huang Y., Tong J., Wang D.*: The New Structural Design Process of Supertall Buildings in China. CTBUH Research Paper, 2015.
- [22] *Liu P., Ho G., Lee A., Yin C., Lee K., Liu G., Huang X.*: The Structural Design of Tianjin Goldin Finance 117 Tower. "International Journal of High-Rise Buildings", December 2012.
- [23] *Fu G., Betancur J., Poon D., Dannettel M.*: Wuhan Greenland Center Main Tower: Seamlessly Integrating Structure and Architecture. Sep 2012 – CTBUH 2012 9th World Congress, Shanghai.
- [24] ANSI/AISC 341-16 An American National Standard Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. July 12, 2016.
- [25] *Sarkisian M., Mathias N.J., Huang Z.*: Steel Plate Shear Walls, Efficient Structural Solution. CTBUH Research Paper, 2008.
- [26] *Seillie I.F., Hooper J.D.*: Steel Plate Shear Walls: Practical Design and Construction. "Modern Steel Construction", April 2005.
- [27] *Astaneh-Asl A.*: Steel Plate Shear Walls. Proceedings, U.S.-Japan Partnership for Advanced Steel Structures, U.S.-Japan Workshop on Seismic Fracture issues in Steel Structures, February 2000, San Francisco.
- [28] *Astaneh-Asl A.*: Seismic Behavior and Design of Composite Steel Shear Walls, Structural Steel Education Council, May 2002.
- [29] *Kowalczyk R.*: Konstrukcje zespolone w budynkach wysokich. XI konferencja naukowa „Konstrukcje zespolone”, Zielona Góra 29–30.06.2017.