

Analiza technologii realizacji budynku wysokiego na przykładzie Shanghai World Financial Center (SWFC)

Mgr inż. Błażej Gwozdowski, dr hab. inż. Tomasz Błaszczyński,
dr inż. Jacek Wdowicki, Politechnika Poznańska

1. Wprowadzenie

Realizowane w dzisiejszych czasach budynki wysokie coraz częściej zaskakują nie tylko rozwiązaniami architektonicznymi, ale także nowatorstwem konstrukcyjnym i nowymi technologiami realizacji. Ambicje inwestorów sprawiają, że obiekty te sięgają coraz wyżej, a przy tym ich realizacja przebiega znacznie szybciej przy zachowaniu najwyższych standardów bezpieczeństwa. Aby to było jednak możliwe, trzeba dokonać szczegółowej analizy dostępnych technologii i wybrać optymalne rozwiązania. Im wyższe budynki chcemy budować, tym trudniejsze zadania przed nami stają. Wynikiem procesu optymalizacji musi być bowiem koncepcja, która:

- zaproponuje optymalne (ze względu na czas, jakość i koszty) z punktu widzenia pracy konstrukcji oraz technologii jej realizacji rozwiązania konstrukcyjne;
- spełni wszelkie normy dotyczące bezpieczeństwa i komfortu pracy ludzi;
- pozwoli maksymalnie wykorzystać wykreowaną przestrzeń;
- nie zaburzy architektonicznej harmonii obiektu, ale pozwoli uzyskać zamierzony efekt wizualny.

Podczas tworzenia finalnej koncepcji budynku nie należy ograniczać się jedynie do fazy projektowania. Koncepcja budynku powinna bowiem obejmować swoim zakresem wszystkie etapy realizacji obiektu,

aż po wykonanie ostatnich elementów. Bogate obecnie doświadczenie dotyczące realizacji budynków wysokich daje solidne podstawy, by większość potencjalnych trudności przewidzieć i już na etapie koncepcji znaleźć ich optymalne rozwiązania. Jest to o tyle istotne, że budynek powinien spełniać liczne kryteria, wśród których najważniejsze to [1]:

- optymalne zarządzanie energią i jej wykorzystanie;
- odpowiednia funkcjonalność;
- zabezpieczenie przed wpływami atmosferycznymi;
- stabilność i wytrzymałość;
- trwałość;
- bezpieczeństwo pożarowe;
- odpowiednie właściwości akustyczne;
- komfort widzenia;
- efektywność ekonomiczna.

Spełnienie wszystkich tych kryteriów w przypadku budynków wysokich jest trudne. Dlatego, by taki cel można było osiągnąć, obiekt musi funkcjonować jako zintegrowana całość. Hardkopf [2] zaproponował podział działalności budynku na sześć sfer: sprawność termiczna, właściwości przestrzenne, jakość powietrza wewnętrznego, właściwości akustyczne, komfort widzenia i integralność obiektu. W celu spełnienia wymagań w tak różnych sferach funkcjonowania budynku, występować musi ścisła współpraca między wszystkimi uczestnikami procesu budowlanego, poczynając od inwestora, przez

projektantów, technologów, wykonawców, producentów, a na pracownikach budowlanych kończąc.

2. Metodyka prowadzenia analizy

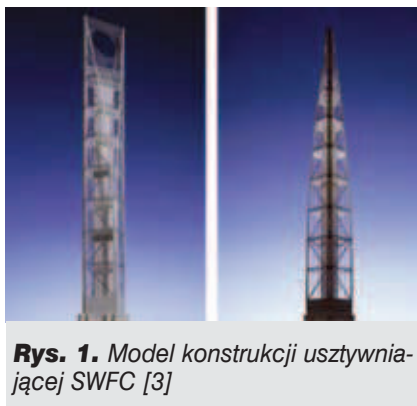
Prowadzenie kompleksowej analizy technologii realizacji tak złożonego i w wielu sferach nowatorskiego obiektu, jakim bez wątpienia jest Shanghai World Financial Center (SWFC), wymagało szczególnego podejścia. W związku z tym, opracowana została metodyka, zgodnie z którą wyodrębniono cztery etapy:

- zebranie informacji na temat technologii realizacji SWFC oraz skompletowanie zdjęć i filmów dokumentujących przebieg prac budowlanych;
 - praca nad materiałem zdjęciowym i filmowym – poszerzenie bazy informacji na temat technologii realizacji SWFC poprzez studiowanie referencji uczestniczących w projekcie firm;
 - interpretacja zebranych informacji na bazie literatury, podejmującej w sposób ogólny problem technologii realizacji budynków wysokich, budowa planu pracy;
 - prowadzenie wg ułożonego planu analizy technologii realizacji budynku wysokiego SWFC.
- Taki system pracy nad tematem ułatwił prowadzenie uporządkowanej analizy, na podstawie zebranej bazy informacji na temat technologii realizacji budynków wysokich, ze szczególnym uwzględnieniem

rozwiązań zastosowanych przy powstawaniu SWFC.

3. Geneza realizacji SWFC

Shanghai World Financial Center został wzniesiony w samym centrum Szanghaju, pośród innych monumentalnych konstrukcji. Budynek z założenia miał stać się centrum finansowym na miarę jednej z trzech największych gospodarek światowych. Oryginalny projekt ukończony w 1996 roku przewidywał 460-metrową konstrukcję, która miała zdezonizować Sears Tower i stać się najwyższym budynkiem na świecie. Już rok później gotowe były fundamenty i nic nie wskazywało na to, że cel nie zostanie osiągnięty. Nadchodzący kryzys finansowy zmusił jednak inwestorów do poszukiwania tańszych rozwiązań. We współpracy z Nippon Steel Corp. udało się stworzyć koncepcję, która nie tylko obniżyła koszty, ale także dawała nadzieję na szybszą i łatwiejszą realizację inwestycji. Niestety mimo starań projekt musiał zostać wstrzymany na kilka lat i dopiero w 1999 roku biuro Kohn Pedersen Fox (KPF) zajęło się ponownie pracami nad projektem monumentalnego wieżowca, mającego stanąć w samym sercu Szanghaju. Tym razem ograniczeń było jednak więcej, a i wyzwania stało się znacznie trudniejsze. W międzyczasie powstały bowiem dwie wieże Petronas Towers, a w trakcie realizacji była kolejna wielka inwestycja, Taipei 101. W tej sytuacji podjęto prace nad podwyższeniem obiektu, co było o tyle trudne, że kosztowne fundamenty zostały wykonane już wcześniej. Problem optymalizacji stał się zatem trudny do rozwiązania. Ze względu na koszty – od razu odrzucone zostało pierwsze z możliwych rozwiązań – wzmocnienie istniejących fundamentów. W takiej sytuacji jedynym sposobem na dodanie cennych metrów projektowanej konstrukcji było jej „odchudzenie”. Myśl ta prowadziła jednak



Rys. 1. Model konstrukcji usztywniającej SWFC [3]

do kolejnego problemu, jakim było przeniesienie przez konstrukcję sił poprzecznych wywołanych działaniem wiatru oraz ruchami tektonicznymi. Ponad 10-procentową redukcję ciężaru konstrukcji osiągnięto poprzez zmniejszenie grubości ścian trzonu usztywniającego. To z kolei zmniejszyło jego udział w przenoszeniu sił poziomych i sprawiło, że trzeba było rozbudować konstrukcję usztywniającą, która miała odpowiadać za przeniesienie większego niż przewidywano wcześniej obciążenia poziomego (rys. 1). Biuro konstrukcyjne Leslie E. Robertson Associates (LERA) zaprojektowało system usztywniający obejmujący kratownice opaskowe, usztywnienie diagonalne łączące te kratownice oraz outriggery (tzn. poziome wysięgniki), które zespały konstrukcję usztywniającą z trzonem żelbetowym. Aby taki pomysł mógł być zrealizowany, konieczna była ścisła współpraca osób odpowiedzialnych za architekturę obiektu (KPF), konstruktorów (LERA) oraz inwestora (Mori Building Company) [3, 4, 5].

4. Nowoczesne rozwiązania technologiczne

Jeden z najwyższych budynków na świecie, a zarazem bezpieczne i wygodne miejsce pracy wielu ludzi, nie mógłby powstać bez wykorzystania możliwości, jakie dają najnowocześniejsze technologie. Firma Johnson Controls odpowiadała za projektowanie, instalację oraz wdrożenie dla SWFC mode-

lu technologicznego. Celem było stworzenie centralnie sterowanej sieci wspierającej wszystkie instalacje. Najważniejsze z zastosowanych rozwiązań to [6]:

- odśrodkowe agregaty chłodnicze York (10kV);
- klimatyzacja – terminale o zmiennym strumieniu powietrza (VAV);
- zintegrowana sieć bezprzewodowa;
- zapasowy podsystem niskiego napięcia (ang. extra low voltage – ELV);
- system zarządzania budynkiem Metasys.

Wszystkie prace projektowe były prowadzone przy ścisłej współpracy ze zleceniodawcami.

Stając kontrolę nad wszystkimi instalacjami znacznie uprościł nowy system zarządzania Metasys łączący w sieci systemy zarządzania, łącznie z wszystkimi systemami elektromechanicznymi w jedną wielką platformę. Do stworzenia optymalnego systemu zarządzania niezbędna była dokładna analiza aktualnych potrzeb, zarówno właścicieli poszczególnych obiektów usytuowanych w budynku, jak i potrzeb i zwyczajów wszystkich użytkowników. Na podstawie takich analiz zoptymalizowano system kontroli procedur, zmodyfikowano preferencje i ustawienia oraz zaprojektowano najbardziej odpowiedni graficzny interfejs użytkownika. Platforma Metasys stale monitoruje budynek, gromadzi dane, sprawuje kontrolę nad instalacjami i dostarcza personelowi zarządzającemu budynkiem informacje, które są potrzebne, by wydajnie zarządzać i konserwować wszystkie instalacje i systemy funkcjonujące w budynku. Tym samym są oni w stanie zapewnić zdrowe i bezpieczne warunki wszystkim użytkownikom i gościom. Shoji Haginoya, dyrektor projektu, w taki sposób określił funkcjonowanie wszystkich systemów budynku, kontrolowanych przez Metasys:

System wprowadzony przez Johnson Controls do tego obiektu, jest

jak sieć neuronowa w naszym ciele. To jest rdzeń budynku, jeśli chodzi o systemy zarządzania i reagowanie w sytuacjach kryzysowych. To on bezpośrednio determinuje zarówno koszty, jak i efektywność zarządzania oraz zapewnia bezpieczeństwo i komfort wewnątrz budynku [6].

W przypadku nagłego zagrożenia dla bezpieczeństwa konstrukcji lub przebywających w nim ludzi, kontrolę przejmują fachowcy monitorujący budynek wraz z jego wszystkimi systemami z centrum zarządzania (rys. 2) [6].

Bezpieczeństwo zawsze było najważniejszym z wymogów stawianych nie tylko najwyższym konstrukcjom, ale nasilenie terroryzmu sprawiło, że stało się ono ważniejsze niż kiedykolwiek wcześniej. SWFC to bardzo zróżnicowane powierzchnie użytkowe, do których dostęp musi być kontrolowany w odpowiedni sposób. Różne są także wymagania, jeśli chodzi o postępowanie w krytycznych sytuacjach. Tradycyjny system bezpieczeństwa po prostu nie jest w stanie zaoferować jednocześnie szybkości, wygody oraz elastyczności, jaką daje złożony system, powstały na podstawie wymagań wszystkich użytkowników obiektu. W przypadku SWFC zastosowane zostały innowacyjne karty procesorowe z możliwością zapisu danych (rys. 3).

Pojedyncza karta uprawnia użytkownika obiektu do wstępu zarówno do części publicznej, jak i biurowej. Stworzono również oparty na działaniu sieci system zarządzania gośćmi z możliwością zdalnej rejestracji. Odbyna się to w ten sposób, iż goście, również hotelowi, muszą najpierw przejść właściwą identyfikację. Następnie wydane im są karty procesorowe, które umożliwiają wstęp do odpowiednich części obiektu. Ponieważ system oparty jest na sieci, goście mogą się zdalnie zarejestrować za pośrednictwem Internetu, choćby podczas podróży. W takim przypadku odpowiednia karta zo-



Rys. 2. Centrum zarządzania w sytuacjach kryzysowych [6]



Rys. 3. Urządzenia automatycznie wydające oraz pobierające karty procesorowe [6]



Rys. 4. Hol z dostępem do wind dwupoziomowych [10]

stanie przygotowana i będzie czekać na ich przyjazd.

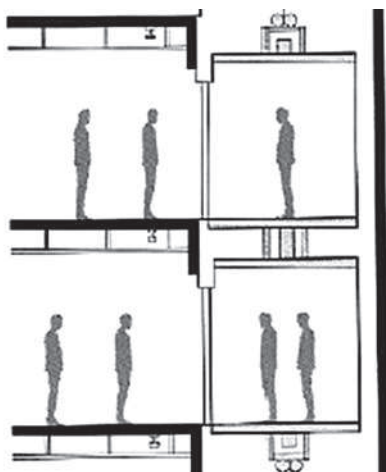
Jest to niezwykle wygodne rozwiązanie, zarówno dla obsługi obiektu, jak i gości, którzy nie muszą tracić czasu na rejestrację będąc już na miejscu [6].

Ściśle związana z bezpieczeństwem jest stabilność działania wszystkich systemów i instalacji. Jako światowej klasy centrum biznesowe, SWFC nie może sobie pozwolić na jakikolwiek brak stabilności w działaniu nowoczesnych systemów zarządzania obiektem. Charakter budynków wysokich sprawia, że radzenie sobie w przypadku większych awarii lub innych sytuacji kryzysowych jest bardzo skomplikowane. W SWFC zastosowano innowacyjne rozwiąza-

nie, modyfikujące tradycyjny system ELV, które znacząco zwiększyły stabilność i niezawodność wszystkich systemów, w które wyposażono budynek. Każdy z przewodów został odpowiednio zabezpieczony, a rezerwowe światłowody w wielofunkcyjnym okablowaniu dedykowano do różnych zastosowań. W ten sposób stworzono coś na wzór głównej sieci rezerwowej. Dzięki temu zwiększyła się też wytrzymałość na zniszczenie mechaniczne instalacji budynku. Dla zwiększenia stabilności i bezpieczeństwa, konfiguracja głównego centrum zarządzania kryzysowego i pozostałych centrów zarządzania kryzysowego zostały wykonane w taki sposób, aby każde z nich stanowiło wsparcie dla pozostałych. Jednocześnie każde centrum zarządzania kryzysowego może niezależnie sprawować nadzór, zarządzać systemami i prowadzić monitoring, bez wpływu na działanie głównego centrum zarządzania [6].

Bardzo ważne w budynkach jest rozwiązanie problemu transportu. Wszyscy użytkownicy obiektu powinni mieć możliwość szybkiego, wygodnego i bezpiecznego poruszania się w zakresie wszystkich kondygnacji. W SWFC zastosowano aż 91 wind, 39 dwupoziomowych, 24 z regulacją poziomów. Podróż z kondygnacji podziemnych na szczyt jednego z najwyższych budynków na świecie trwa zaledwie minutę. Najnowocześniejsze urządzenia dostarczyły Thyssen Krupp, Toshiba, Hitachi oraz OTIS. Firma Hitachi dostarczyła sześć dwupoziomowych wind, dwie mogące osiągnąć prędkość 480 m/min. oraz cztery poruszające się z prędkością maks. 360 m/min. (rys. 4).

Ciekawym osiągnięciem mogą pochwalić się konstruktorzy firmy OTIS, którzy przygotowali i zainstalowali unikalną windę, dającą możliwość transportowania samochodów na 94. kondygnację, na której umiejscowione zostały sale ekspozycyjne. Winda może przewieźć ła-



Rys. 5. Schemat pracy windy dwupoziomowej [11]

dunek o wadze trzech ton w zaledwie dwie minuty. Natomiast największej urządzeń transportowych znajdujących się w SWFC jest dziełem Thyssen Krupp oraz Toshiba. Pierwsza z wymienionych firm dostarczyła 44 windy. Wśród nich było 15 pasażerskich (w tym cztery dwupoziomowe), 28 serwisowych oraz jedna towarowa. Za najbardziej spektakularne osiągnięcie jeśli chodzi o transport, w przypadku SWFC, należy uznać rozwiązanie, na które zdecydował się każdy z wymienionych potentatów, czyli windę dwupoziomową (rys. 5). W przypadku tak wysokich budynków niezwykle ważna jest szybkość transportu. Pojemność wynikająca z konstrukcji oraz niebywała prędkość, z jaką owe windy się poruszają sprawiły, że znacząco zredukowano liczbę pasażerów oczekujących na środek transportu.

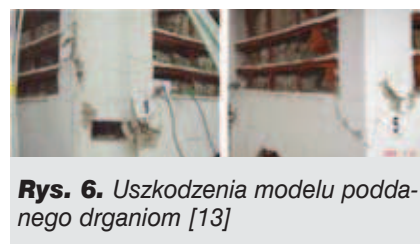
Kolejną oczywistą korzyścią wynikającą z zastosowania tego rozwiązania jest oszczędność energii. Nowatorskim rozwiązaniem jest też możliwość regulacji poziomów w windach. Daje to możliwość, aby w przyszłości można było płynnie przemieszczać się w budynkach, w których wysokość kondygnacji jest bardzo zróżnicowana. Dając windom dwupoziomowym taką możliwość, wyeliminowano ich jedyną wadę. Sukcesem są też dwie windy panoramiczne, które

dowozą klientów na umiejscowioną na najwyższych kondygnacjach luksusową restaurację 100 Century Avenue Restaurant. Wykończenie tych wind zostało zaprojektowane ze smakiem. Ściany z ręcznie wytwarzanego krystalicznego szkła w formie paneli, których obramowania wykonano z drewna, ceramiczna podłoga oraz zrobione z brązu drzwi zdobione orientalnymi ornamentami. Wszystko razem robi ogromne wrażenie [7–10].

5. Badania terenowe i weryfikacyjne

Rozwój dzielnicy Pudong na dobre rozpoczął się dopiero w 1990 roku, kiedy przedstawiono pierwsze plany zagospodarowania terenu. Prace ruszyły z wielkim rozmachem i bardzo szybko teren stał się jednym wielkim placem budowy. Lokalizacja sprawiała jednak pewien problem, zwłaszcza jeśli w planach była budowa wieżowców. Podmokły teren należało osuszyć, aby w ogóle można było przystąpić do prac budowlanych. Pomimo tych zabiegów, usytuowanie na wysokości zaledwie 4 m n.p.m., 1 km od koryta rzeki Huangpu oraz 30 km od Morza Wschodniochińskiego miało swoje odbicie w wysokim poziomie wód gruntowych (0,5 m poniżej poziomu terenu). Badania gruntowe wykonane dla SWFC wskazały, że pod 3-metrową warstwą nasypów znajdują się warstwy glin i ilów przewarstwionych pyłami i piaskami drobnymi, sięgające do głębokości aż 80 m. Dopiero poniżej znajdowały się piaski drobne, a miąższość tej warstwy dochodziła do 50 m. Wyniki badań gruntowych potwierdziły zatem to, co można było wywnioskować na podstawie badań wykonanych przy realizacji sąsiednich konstrukcji – jedynym rozwiązaniem było posadowienie budynku na palach zawieszonych [12]. Ważnym badaniem weryfikacyjnym wykonanym dla SWFC był test na stole wibracyjnym. Usytuowanie obiektu na terenie ak-

tywnym sejsmicznie wiąże się z koniecznością poznania charakterystyk dynamicznych konstrukcji, odpowiedzi dynamicznych oraz mechanizmu zniszczenia. Właśnie w tym celu stworzono model konstrukcji w skali 1:50. Skalując obiekt należało odpowiednio dobrać materiały, z których zostanie on stworzony. Stalowe elementy konstrukcyjne wykonane zostały z miedzi, natomiast elementy żelbetowe z betonu na bazie drobno-kruszywa wzmocnionego cienkimi siatkami. Do badania użyto platformy wibracyjnej MTS w State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering na Uniwersytecie Tongji w Szanghaju. Platforma o wymiarach 4 x 4 m jest w stanie generować ruch w trzech kierunkach i czyni podstawę modelu układem o sześciu stopniach



Rys. 6. Uszkodzenia modelu poddrganiom [13]

swobody. Maksymalne przyspieszenia podczas drgań po kierunkach poziomych wynoszą 1,2 g oraz 0,8 g, natomiast po kierunku pionowym 0,7 g. W ramach testów można wytwarzać drgania o częstotliwościach od 0,1 do 50 Hz. Na podstawie zebranych podczas testów wyników można przewidywać, że tak zaprojektowana konstrukcja jest w stanie przetrwać trzęsienia ziemi o 7 poziomie intensywności, bez uszkodzeń konstrukcji. Tymczasem przy rzadko występujących trzęsieniach o 8 poziomie intensywności, w modelu pojawiły się spękania betonu megakolumn na 6. piętrze oraz wyboczyły się stalowe słupy obwodowe na tej samej kondygnacji (rys. 6). Badanie wskazało zatem projektantom potencjalny słaby punkt konstrukcji, z którym trzeba było się uporać, zwiększając wytrzymałość ścian i słupów [13].

6. Fundamenty i kondygnacje podziemne

Ze względu na bardzo niekorzystne warunki gruntowo-wodne, SWFC został posadowiony na palach zawieszonych. Ponad nimi zaprojektowano płytę fundamentową o grubości 4,5 m, którą wykonano 18,5 m poniżej poziomu terenu. Powyżej znalazło się miejsce dla trzech kondygnacji podziemnych. Pod konstrukcją zasadniczą budynku wykonano około 200 pali sięgających na głębokość 80 m. Łączna liczba pali wykonanych dla tego obiektu to jednak aż 2271. Zastosowano technologię polegającą na zagłębieniu w gruncie rur stalowych, umieszczeniu w nich zbrojenia i wypełnieniu betonem. Możliwe szybko wykonano pierwsze badania ich nośności. Pierwsze próbne obciążenia rozpoczęto w lipcu 1996 roku i zakończono we wrześniu tego samego roku. Badaniom poddano 15 pali o średnicy 700 mm, zagłębionych na 80 m, 79 m, 60 m oraz 48 m. Na podstawie wyników obciążeń próbnych i obliczeń stwierdzono, że przyjęte rozwiązanie jest wystarczające [12].

Przy wykonywaniu kondygnacji podziemnych SWFC, wykorzystano zalety metody „top-down”, przy czym nie wykonywano od razu kolejnych stropów wraz z postępem prac ziemnych. Spośród części pali wyprowadzone zostały aż do powierzchni terenu elementy dwuteowe. W ten sposób stworzono słupy osadzone w palach, które przy późniejszej realizacji podziemia miały stanowić podparcie dla stropów kondygnacji podziemnych, a także dać możliwość jednoczesnego wznoszenia konstrukcji części nadziemnej obiektu. Wykonywanie kondygnacji podziemnych z wykorzystaniem pewnej modyfikacji metody „top-down”, wymagało oczywiście odpowiedniego zabezpieczenia wykopu, także przed dostępem wód gruntowych. Ponieważ w przypadku dzielnicy Pudong w Szanghaju,

nawodniony, słaby grunt czynił warunki ekstremalnie trudnymi, zdecydowano się na rozwiązanie często stosowane w przypadku konstrukcji hydrotechnicznych, takich jak platformy wiertnicze, mosty czy zapory.



Rys. 7. Koferdam na rzucie okręgu stabilizujący wykop [4]



Rys. 8. Pompa dostarczająca mieszankę betonową na najwyższe kondygnacje [15]

Wykonano na rzucie okręgu koferdam. Wybór właśnie takiego rozwiązania był korzystny ze względu na permanentne ograniczenie dostępu wody do wykopu. Ponadto koferdam na rzucie okręgu posiada tę cechę, że nie ma potrzeby stosowania dodatkowych rozpór, ograniczających swobodę pracy. Taka konstrukcja jest bowiem wystarczająco usztywniona sama w sobie. Na poziomach stropów kondygnacji podziemnych, obwodowo konstruowano niewielkie wsporniki, dodatkowo usztywniające całą konstrukcję stabilizującą wykop. Wewnątrz wykonano specjalne podesty pod żurawie, kotwione do konstrukcji koferdamu. Na rysunku 7 widać postęp prac wewnątrz okrągłego koferdamu [4].

7. Transport na placu budowy i mechanizacja

W przypadku prostych konstrukcji, transport materiałów budowlanych oraz pracowników na plac

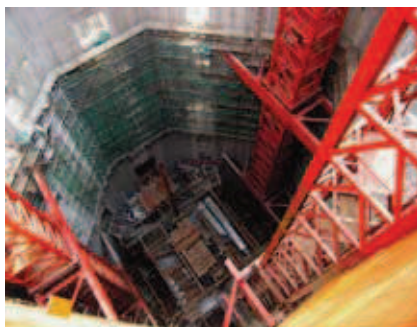
budowy nie jest trudny do rozwiązania. Sprawa komplikuje się jednak znacząco, jeśli obiekt sięgać ma blisko pół kilometra w górę, a sam plac budowy jest dość ograniczony. Właśnie z taką sytuacją miano do czynienia przy wznoszeniu SWFC. Dostarczenie mieszanki betonowej na wysokość blisko 500 metrów, transport wielkogabarytowych elementów stalowych na tę samą wysokość, wygodne i szybkie przemieszczanie się pracowników – bez wątplenia dokonanie tego jest sporym wyzwaniem.

Za transport mieszanki betonowej odpowiadał światowy potentat w tej dziedzinie, firma SANY, uczestnicząca przy realizacji wielu obiektów wysokich na całym świecie. Podczas wykonywania płyty fundamentowej, firma SANY przy użyciu samobieźnych pomp o wysięgu 32 metrów, dostarczyła około 30 000 metrów sześciennych mieszanki betonowej w 40 godzin. Najtrudniejszym zadaniem było jednak dostarczenie mieszanki betonowej na najwyższe kondygnacje obiektu. Firma SANY wykorzystowała swoje doświadczenie. Już wcześniej za pomocą monstrualnej pompy HBT90CH2122D dostarczyła beton klasy C60 na wysokość 406 metrów. Po dokonaniu pewnych modyfikacji ten sam sprzęt można było wykorzystać przy realizacji jeszcze wyższej konstrukcji, jaką jest SWFC (rys. 8). W 2008 roku udało się ustanowić nowy rekord wysokości w transporcie mieszanki betonowej. Podczas konstrukcji dachu SWFC pojedyncza zmodyfikowana pompa HBT90CH2122D dostarczyła odpowiednią mieszankę na wysokość 492 m. Podczas realizacji ostatnich kondygnacji za dostarczenie mieszanki betonowej odpowiadały trzy takie pompy [14].

Przed przystąpieniem do jakiegokolwiek betonowania stropów, megalolumn, czy też elementów trzonu trzeba było najpierw wbudować konstrukcję stalową. Tylko na jedną kondygnację potrzebnych było 650 ton stali, głównie elemen-

tów dwuteowych i profili „jumbo” o sporych gabarytach i masie. Podczas budowy SWFC za transport większych elementów konstrukcyjnych, paneli elewacyjnych, czy zbrojenia odpowiedzialne były żurawie samowznoszące. Do konstruowania kondygnacji podziemnych wystarczyły żurawie wieżowe, dla których stanowiska zostały odpowiednio przygotowane oraz dźwigi samochodowe. Kiedy jednak trzon zaczął sięgać poziomu terenu, po wewnętrznej stronie jego ściany zainstalowany został pierwszy z żurawi samowznoszących, produkcji Favelle Favco. Wraz ze zwiększaniem się wysokości trzonu, nastąpiła konieczność wprowadzenia kolejnego z żurawi samowznoszących. Oba urządzenia, które dostarczyła firma Favelle Favco, to M900D o wysokości wieży dochodzącej do 56 m oraz wysięgu 55 m. Sprawną pracę zapewniał dieslowski silnik Caterpillara, który był w stanie podnieść ładunek do 32 ton, natomiast przy mniejszych ładunkach do 6 ton, osiągał prędkość podnoszenia do 140 m/min. Taki zestaw wystarczał, przy ładunkach o średniej masie około 20 ton. Dopiero przy konieczności montażu elementów stalowych megakolumn zachodziła konieczność współpracy dwóch żurawi. Udźwig współpracujących urządzeń wynosił 64 tony (przy wysięgu 19,2 m), co wystarczało do podnoszenia 50-tonowych elementów kolumn. Kiedy trzon sięgnął 50 metrów, aby usprawnić realizację obiektu, wewnątrz trzonu zamontowano trzeci żuraw M900D. Pracował on aż do momentu, w którym trzon sięgnął poziomu, na którym nastąpiła jego znaczna redukcja. Ponieważ w takiej sytuacji nie była już możliwa praca trzech żurawi M900D, jako trzeci zainstalowany został Favelle Favco M440D, który zdemontowano dopiero na etapie, w którym wysokość obiektu dochodziła już do 350 metrów. Ważne było odpowiednie zakotwienie każdego żurawia, który wraz z przeciwwa-

gami miał masę aż 263 tony. Trzon w formie ośmioboku o ścianach grubości dochodzącej do 1,8 m (na najniższych kondygnacjach), wzmocnionych profilami stalowymi tworzącymi kratownicę, zapewniał komfortowe warunki dla zamocowania żurawi (rys. 9). Zainstalowane wewnątrz trzonu żurawie przesuwają się wraz z budową samego trzonu. Proces ten był możliwy dzięki potężnym dźwignikom hydraulicznym, które były w stanie przemieścić ponad 250-tonową konstrukcję nawet 14 metrów pionowo w górę. Wraz ze wzrostem obiektu dodawane były także kolejne sekcje każdej z wieży żurawi. Dzięki sprawnej pracy samowspinających żurawi wieżowych, prace toczyły się w dobrym tempie. Na wykonanie jednej kondygnacji potrzebne były średnio cztery doby. Jedynym ograni-



Rys. 9. Kotwienie żurawi wewnątrz trzonu [17]

eniem, które sprawiało, że prace na pewien czas musiały być wstrzymane, była zła pogoda. Przy gęstej mgle, która do rzadkich zjawisk w tym regionie nie należy, poziom widoczności bardzo drastycznie spadał. Zespół obsługujący jeden żuraw składał się z operatora oraz dwóch pracowników obsługujących jego pracę z poziomu terenu, i na maksymalnej na dany czas wysokości, a kiedy konstrukcja dochodziła do 80 kondygnacji, do zespołu dochodził trzeci obserwator na wysokości około 50. kondygnacji. Jednak nawet taka organizacja była niewystarczająca, jeśli mgła gęstniała i nie można było zobaczyć ładunku nawet z odległości kilku metrów [15, 16].

Poza transportem materiałów budowlanych, na każdym placu budowy musi być zapewniony sprawnny transport pracowników. Podczas prac na dużych wysokościach transport ludzi musi odbywać się możliwie szybko, ale i bezpiecznie. W budynkach wysokich do najpopularniejszych sposobów na przemieszczanie pracowników należą dźwigi towarowo-osobowe oraz tzw. gondole i podesty ruchome. Zarówno dźwigi towarowo-osobowe (rys. 10), jak i gondole znalazły zastosowanie przy budowie SWFC, zapewniając pionowy transport pracowników i niewielkich ładunków. Szanghajaska firma Baoda dostarczyła i zainstalowała na jednym z boków budynku sześć dźwigów towarowo-osobowych. Dodatkowo, na etapie, w którym trzon był konstruowany szybciej i wznosił się na 8–10 kondy-



Rys. 10. Dźwigniki towarowo-osobowe pracujące na SWFC [19]

gnacji powyżej najwyższego ze stropów, dźwignik został zainstalowany także na ścianie trzonu. Wszystkie dźwigniki zastosowane przy budowie SWFC to Baoda SCD320/320V o ładowności 3200 kg, przemieszczające się z maksymalną prędkością 90 m/min. Poruszały się one po pionowym torze wzdłuż kratownicowej wieży stalowej, kotwionej do stropów. Maksymalna wysokość, na którą dźwigniki dostarczały ładunki oraz pracowników sięgała 450 m [18].

8. Realizacja konstrukcji nośnej

Konstrukcja SWFC składa się z wzmocnionego elementami sta-

lowymi żelbetowego trzonu, który połączony jest z systemem narożnych kompozytowych megakolumn oraz rozmieszczonych na obwodzie budynku stalowych słupów za pośrednictwem belek stropowych oraz outriggerów. Megakolumny i słupy połączone są natomiast ze sobą dodatkowo co 12 poziomów za pomocą kratownic opaskowych.

Ośmioboczny trzon SWFC realizowany był przy użyciu systemu samowspinającego (rys. 11). Urządzenie formujące wraz z konstrukcją stalowych rusztowań przesuwane było za pomocą hydraulicznych podnośników. Krok, z jakim konstrukcja urządzenia formującego posuwała się ku górze wynosił 4,2 m. Ze względu na zmiany grubości ścian trzonu na wysokości, a także jego przekroju poprzecznego, sama konstrukcja urządzenia formującego i rusztowań była w trakcie realizacji budynku wielokrotnie modyfikowana. Za opracowanie technologii urządzenia formującego do realizacji trzonu, jak i nachylonych, rozwidlających się megakolumn, odpowiadało Shanghai Construction General Company. Nachylone i rozwidlające się megakolumny w narożach budynku wymagały zastosowania elastycznego rozwiązania. Urządzenia formujące musiały idealnie tworzyć zewnętrzną i wewnętrzną powierzchnię, zgodnie z założoną krzywizną. Za wdrożenie technologii samo-wznoszących deskowań w tym przypadku odpowiedzialna była firma Doka, specjalizująca się w tego typu projektach. Zastosowano urządzenie wspinające SKE 50 wraz z wielkopowierzchniowymi formami Top50 (rys. 12). Utrzymano 4-dniowy cykl wznoszenia. Stropy SWFC zostały wykonane jako stalowo-żelbetowe, w których na rusztach belkowych układana była blacha trapezowa, ale przy najwyższych kondygnacjach zastosowano także rozwiązanie wykorzystujące płaskie blachy stalowe [15, 20].

9. System ścian osłonowych

System konstrukcyjny ścian osłonowych SWFC składa się z około 10 tysięcy paneli okiennych, powstałych z połączenia aluminium, tworzyw sztucznych oraz szkła o wysokiej wytrzymałości. Przy wykonywaniu każdej z kondygnacji instalowane były na krawędziach stropów specjalne systemy kotwienia, do których mocowane były panele ściany osłonowej. Sam montaż jednego elementu polegał na opuszczeniu go z wyższej kondygnacji na linach, obróceniu o 180 stopni, a następnie przymocowaniu do konstrukcji nośnej obiektu (rys. 13). Biorąc pod uwagę utrudnienia, takie jak porywisty wiatr czy mgła, w ciągu jednego dnia pracownicy byli w stanie zamontować średnio około 14 paneli, a wykonanie ściany osłonowej na wysokości jednej kondygnacji trwało ponad cztery dni. Szczególnie utrudniony był montaż paneli ściennych stanowiących jedynie element elewacji pokrywający megakolumny. W tym przypadku za montaż odpowiadali pracownicy opuszczani na dany poziom w tzw. gondoli.

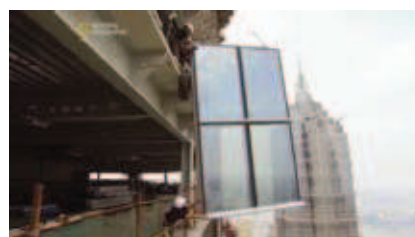
Bez względu na wybór systemu ścian osłonowych, podczas jego projektowania trzeba pamiętać o stałych oddziaływaniach, którym system zamocowania oraz każdy z elementów będą poddane. Wśród nich należy wymienić wpływy różnic temperatur, znaczne obciążenia siłami wiatru oraz niezwykle istotne przemieszczenia poziome budynków, które przecież w budynkach wysokich są znaczne. Trzeba wziąć pod uwagę fakt, że stosunek wielkości parcia wiatru na dolnych i górnych kondygnacjach może wynosić nawet 1:6, dlatego konieczne jest zróżnicowanie konstrukcji ściany osłonowej pod względem wytrzymałości. Nie można bagatelizować także wpływu ssania wiatru, które może doprowadzić do powstania znacznych uszkodzeń. Ponadto spore przemieszczenia poziome budynków wysokich w połączeniu z nagrzaniem konstrukcji



Rys. 11. Wznoszenie trzonu przy zastosowaniu samowspinających urządzeń formujących i rusztowań [19]



Rys. 12. Wznoszenie jednej z megakolumn przy zastosowaniu urządzeń formujących samowspinających i rusztowań Doka [20]



Rys. 13. Montaż jednego z paneli ściany osłonowej SWFC [15]

ścian osłonowych, mogą sprawić, że na wysokości zaledwie jednej kondygnacji wystąpią różnice przemieszczeń dochodzące do 2–3 mm. Dla wykonywanych ze znaczną dokładnością konstrukcji ścian osłonowych, takie przemieszczenia mogą wywołać lokalne awarie. Złuszczają wtedy, kiedy pojawiają się cyklicznie. W związku z wymienionymi czynnikami oraz ze względu na konieczność połączenia materiałów o tak różnych właściwościach fizycznych i mechanicznych jak aluminium oraz szkło, trzeba było znaleźć odpowiednie rozwiązanie, na potrzeby konstrukcji ścian osłonowych w SWFC. Do połączenia aluminiowej ramy ze szklanym elementem okiennym użyte zostało dwuskładnikowe szczeliwo silikonowe o dużej wytrzymałości, ela-



Rys. 14. Wysięgnik umożliwiający konserwację i czyszczenie ścian osłonowych [23]

styczności i trwałości. Zastosowanie silikonu do łączenia elementów ścian osłonowych jest bardzo duże ze względu na jego właściwości. Oprócz wspomnianych zalet szczeliwa silikonowego, należy także wymienić zdolność do zachowania elastyczności nawet w ekstremalnie niskich temperaturach oraz odporność na działanie wysokich temperatur. Dzięki temu szczeliwo silikonowe może z powodzeniem służyć do łączenia elementów o różniących się znacznie współczynnikami rozszerzalności termicznej.

Konserwacja i czyszczenie około 120 tys. m² ścian osłonowych nie należy do najłatwiejszych zadań. Aby usprawnić prace z tym związane, firma CoxGomyl stworzyła system specjalnych wysięgników wyposażonych w kosze do transportu pracowników (rys. 14). Dzięki temu systemowi pracownicy odpowiedzialni za konserwację czy czyszczenie ścian osłonowych mogą bez większych problemów dostać się do każdego z 10 tys. paneli [1, 15, 21, 22, 23].

10. Kondygnacje najwyższe i konstrukcja zwieńczenia

SWFC pod względem konstrukcji najwyższych kondygnacji i dachu jest obiektem unikalnym. Po ukończeniu budowy, szanghajski wieżowiec nie stał się co prawda najwyższym obiektem na świecie, ale żaden z ukończonych do 2008 roku budynków nie posiadał wyżej usytuowanej kondygnacji. Sięgająca 474 metrów, znajdująca się na 100. kondygnacji kładka ze szklaną podłogą, przez którą można podziwiać widoki oraz położone ni-

żej, na 97. kondygnacji, obserwatorium z otwieranym dachem, stanowi niemałą atrakcję. Poniżej znalazło się miejsce dla areny widowiskowej, w której odbywać się mogą wystawy czy wydarzenia rozrywkowe. Na ten poziom docierają także windy samochodowe, dzięki którym arcydzieła motoryzacji mogą być dostarczone na salę wystawową. Wewnątrz stalowej konstrukcji wieńczącej znalazło się ponadto miejsce dla najbardziej ekskluzywnych apartamentów i restauracji hotelu Park Hyatt Shanghai. Unikalne wykorzystanie przestrzeni użytkowej najwyższych kondygnacji budynku było możliwe dzięki ciekawemu projektowi konstrukcji tej części obiektu. Zmienność przekroju poprzecznego, jaką zakładał projekt bryły obiektu, prowadziła do powstania u szczytu budynku sporej powierzchni, która potencjalnie byłaby narażona na znaczne parcie wiatru. Aby uwolnić projekt od takiego problemu, zaprojektowano okrągły otwór o średnicy około 50 m, znacznie redukując powierzchnię obciążoną parciem wiatru. Ostatecznie względy polityczne zadecydowały, że zmieniono otwór z okrągłego na trapezowy o podobnej powierzchni. Dzięki temu znacznie ułatwiono także pracę wykonawcom, ponieważ okrągły otwór był trudniejszy w realizacji. Zmniejszenie wpływu parcia wiatru na górną część konstrukcji przyniosło jednak skutek uboczny. Smukła konstrukcja zwieńczenia obiektu osłabiona wielkim otworem musiała mieć odpowiednią sztywność.



Rys. 15. Realizacja konstrukcji zwieńczenia [19]

W tym celu zaprojektowana została stalowa, kratowa konstrukcja przestrzenna, oparta na megakolumnach kompozytowych, podtrzymująca kładkę, a także będąca podporą ściany kurtynowej. Stalowe zwieńczenie obiektu dzięki gęstemu skratowaniu jest wystarczająco sztywne, a przy tym stosunkowo lekkie (rys. 15). Pomimo ograniczenia wpływu parcia wiatru na zwieńczenie budynku oraz zwiększenia sztywności jego konstrukcji, nadal pozostawał problem ograniczenia wychyleń szczytu obiektu. Pod wpływem porywistego wiatru lub wstrząsów sejsmicznych szczyt budynku, ze względu na mniejszą sztywność w stosunku do reszty konstrukcji, doznawałby znacznych przemieszczeń. Ze względów konstrukcyjnych, nie byłby to wielki problem, ponieważ o zagrożeniu dla stabilności budynku nie mogło być mowy. Dla ludzi przebywających na najwyższych kondygnacjach znaczne wychylenia budynku byłyby bardzo nieprzyjemnym przeżyciem. Aby ograniczyć przemieszczenia, na 90. kondygnacji zainstalowane zostały dwa 150-tonowe tłumiki masowe, dzięki którym maksymalne wychylenia zostały zredukowane do 1 m [4, 5, 15].

11. Podsumowanie

Omówiono realizację jednego z najwyższych budynków na świecie, Shanghai World Financial Center (SWFC). Wzniesiony w dzielnicy Pudong, w Szanghaju, obiekt ma ciekawą historię, a jego realizacja przebiegała dwuetapowo. Na przestrzeni 12 lat wizja tego wieżowca stale ewoluowała, a w podwyższeniu obiektu nie przeszkodził nawet fakt, że fundamenty były wykonane dla budynku o ponad 30 m niższego. Analiza różnych etapów realizacji pozwala stwierdzić, że prace były prowadzone w dobrym, równym tempie. Było to możliwe przede wszystkim dzięki nowoczesnemu rozwiązaniu problemu transportu pionowego na placu budowy. Przy tym bezpieczeństwo pracowni-

ków nie było zagrożone, a prac nie spowolnił nawet pożar, który tylko na krótko przerwał prace, nie niosąc za sobą żadnych konsekwencji. Realizacja SWFC dowodzi, że dziś największym ograniczeniem są finanse. Wypracowane przez ostatnie lata technologie wykorzystywane przy wznoszeniu budynków wysokich znacznie przyspieszyły prace budowlane. Dodatkowo prestiż, jaki wiąże się z uczestnictwem w tak dużym projekcie sprawia, że potencjali w dziedzinach związanych z realizacją budynków wysokich tworzą unikalne rozwiązania, czyniąc tym samym kolejny krok w rozwoju budownictwa wysokiego. Pomimo tego, że szanghajskie Centrum Finansowe nie jest najwyższym budynkiem na świecie, a w niedalekiej przyszłości przestanie być nawet najwyższym obiektem w dzielnicy Pudong, w Szanghaju (w trakcie realizacji jest Shanghai Tower – 632 m), to zastosowane przy jego realizacji rozwiązania technologiczne

oraz sama konstrukcja obiektu sprawiają, iż jest on jednym z najbardziej interesujących budynków wysokich. Prosta i efektywna bryła kryje w sobie najnowocześniejsze technologie i rozwiązania konstrukcyjne, dzięki którym SWFC jest obiektem nowatorskim i bezpiecznym.

BIBLIOGRAFIA

[1] M. Y. L. Chew, Construction Technology for Tall Buildings [3rd Edition]; World Scientific Publishing, Singapur 2009
 [2] V. Hartkopf, The Office of the future; Seminar Notes, CIDB Annual Seminar, October 1990
 [3] P. Katz, L. E. Robertson, Case Study: Shanghai World Financial Center; CTBUH Journal, 2 (2008) 10–14
 [4] A. Chen, KPF crowns an ever-expanding skyline with the SWFC, Architectural Record, May 2009
 [5] Informacja prasowa; Mori Building Co. (28.08.2008)./www.mori.co.jp/en/img/article/090828e.pdf/
 [6] Broszura firmy Johnson Controls; Case Study, Shanghai World Financial Center, Pudong Shanghai, China; USA 2010. /www.johnsoncontrols.com/publish/etc/medialib/jci/be/case_studies.Par.6131.File.tmp/CSST-10-135ShanghaiFinal.pdf/

[7] Hitachi.com
 [8] Otis.com
 [9] En.prnasia.com
 [10] Toshiba-elevator.co.jp
 [11] Paulkoppen.com
 [12] Jian Gong, Xihong Zhao, Baoliang Zhang; Prediction of Behavior of Piled Raft Foundation for Shanghai World Financial Center of 101-Storey Using Comparison Concept; Sixth International Conference on Tall Buildings, Hong Kong 2005
 [13] Xilin Lu, Yun Zou, Wensheng Lu, Bin Zhao; Shaking table model test on SWFC; Earthquake Engng & Struct. Dyn., 36 (2007) 439–457
 [14] Sanygroup.com
 [15] Steven R. Talley, Max Quinn; Megastructures: Shanghai Super Tower – Shanghai World Financial Center; National Geographic, 2008 r.
 [16] Cranestodaymagazine.com
 [17] Xitek.com
 [18] Unicrane.com.sg
 [19] Skyscrapers.cn
 [20] Doka.com
 [21] A. Z. Pawłowski, I. Cała, Budynki Wysokie; Oficyna Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006
 [22] Siliconeforbuilding.com
 [23] Bosie Vincent; Vertical City, season 1., episode 13. – Shanghai World Financial Center; Electric Sky Productions, 2009 r.

18. OGÓLNOPOLSKIE TARGI BUDOWLANE

MUREXPO

oraz **10. Targi Wyposażenia Wnętrz**

MODNE WNĘTRZE

13–15 kwietnia 2012

Warszawa, Torwar

tel.: 22 829 66 62, e-mail: biuro@muratorexpo.pl, www.targibudowlane.pl

organizator

patron medialny

murator EXPO **murator** **zbuduj dom** **zumi** **RADIO VOXX FM WARSZAWA 93,3**