



Budowa nowego mostu Trojskiego w Pradze

tekst: prof. Ing. **JAN L. VÍTEK**, CSc., FEng., Metrostav a.s., współautorzy: Ing. **LADISLAV ŠAŠEK**, CSc.,
Ing. **ROBERT BROŽ**, PH.D., Ing. **VLADIMÍR JANATA**, CSc.
zdjęcia: **JAN L. VÍTEK**, **JOSEF HUSÁK**

Obecnie w Pradze budowana jest północna część obwodnicy miasta. Projekt ten jest znany pod nazwą kompleks tunelowy Blanka, a w jego skład wchodzi liczne budowle tunelowe. Do kompleksu zaliczany jest również nowy most przez Wełtawę, który będzie służył komunikacji tramwajowej, samochodowej oraz pieszej. Po jego ukończeniu możliwa będzie rozbiórka istniejącego mostu tramwajowego, który jest eksploatowany od czasu ostatniej przebudowy mostu Barykadników.

Artykuł opisuje proces powstawania głównych elementów mostu. Nie wspomniano w nim o projektowaniu, analizach statycznych, posadowieniu czy sposobie podparcia. Celem artykułu jest bowiem poinformowanie opinii publicznej o wydarzeniach na placu budowy, możliwych do zaobserwowania w pobliżu terenów rekreacyjnych Troi oraz doliny Wełtawy.

Wstęp

Most Trojski powstał w ramach projektu kompleksu tunelowego Blanka. W 2006 r. inwestor zdecydował o zmianie projektu mostu i zorganizował konkurs na wykonanie nowego. Zwycięski projekt – łukowa konstrukcja hybrydowa – jest aktualnie w trakcie realizacji i będzie się zaliczał, zwłaszcza biorąc pod uwagę jego rozpiętość, do największych mostów w Cze-

chach. Oryginalny system konstrukcyjny oraz sposób budowy są przedmiotem szerokiej dyskusji.

Opis mostu

Przeprawa składa się z dwóch samodzielnych konstrukcji, oddzielonych dylatacją nad filarem stojącym na trojskim brzegu. Główne przesłono nad Wełtawą zaprojektowano jako prosto podpartą łukową konstrukcję stalową z betonowym pomostem o rozpiętości 200,4 m. Łączące się z nim od strony Troi przesłono zalewowe jest prosto podpartą konstrukcją dwubelkową o rozpiętości 40,35 m, wykonaną z monolitycznego betonu sprężonego.

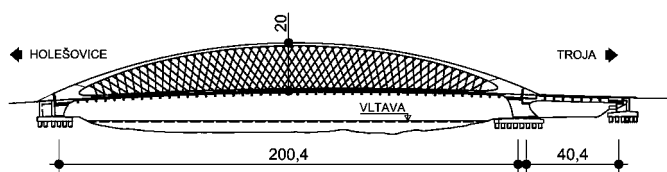
Most pod względem wizualnym stanowi niemal symetryczną całość, a to dzięki spójnej koncepcji oraz formie



Ryc. 1. Wznoszenie skrajnej części łuku po stronie Troi

przekroju poprzecznego (kształt poprzecznicy i płyty) oraz jednakowym detalom wyposażenia. Całkowita szerokość mostu wynosi 36,2 m (wraz z barierami) i jest pod względem konstrukcyjnym podzielona na pasy ruchu, odpowiednio do poszczególnych rodzajów komunikacji. Na środku, na samodzielnym korpusie, poprowadzono dwutorową linię tramwajową, po jej obu bokach symetrycznie biegną dwie jezdnie dwupasmowe oraz chodniki dla pieszych i rowerzystów.

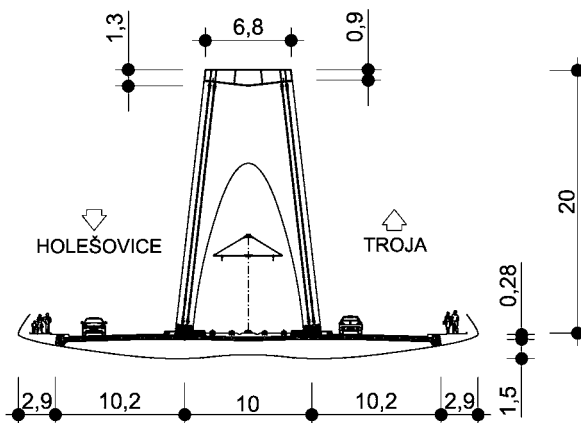
Projekt mostu Trojskiego jest konstrukcją znaczącą i odważną, wykorzystującą niezwykle, jak dotąd, wzajemne połączenia elementów konstrukcji, składającej się ze stalowego łuku oraz sprężonej betonowej płyty pomostowej, połączonych wzajemnie za pomocą sieci wieszaków. Rozwiązania i kształt przeprawy tworzą unikatową konstrukcję na skalę światową. Obiekt uzyskał niezwykłą elegancję dzięki stosunkowi nachylenia do rozpiętości łuku 1:10, co decyduje o jego smukłości, oraz stosunkowi wysokości konstrukcyjnej łuku i jego rozpiętości 1/182. Takie parametry uzyskano w wyniku zastosowania gęstej sieci wieszaków, która zapewnia wytrzymałość i sztywność konstrukcji. Przekrój podłużny mostu pokazano na rycinie 2.



Ryc. 2. Przekrój podłużny mostu

Rozwiązania konstrukcyjne

Płyta pomostowa sprężona poprzecznie i podłużnie jest podparta poprzecznicyami prefabrykowanymi. Środkowy pas tramwajowy jest otoczony konstrukcją stalowo-betonowych cięgien łuku (sprężonych wewnętrznie), oddzielających przestrzeń komunikacyjną od korpusu tramwajowego. Reakcje łuku przenoszone przez płytę pomostową są eliminowane dzięki sprężeniu podłużnemu. Wykorzystanie poprzecznicy prefabrykowanych umożliwiło znaczne przyspieszenie postępu robót oraz zmniejszyło liczbę tymczasowych konstrukcji podporowych przy jednoczesnym spełnieniu wysokich wymagań co do precyzji i jakości wykonania. Przekrój poprzeczny mostu ilustruje rycina 3.



Ryc. 3. Przekrój poprzeczny w środku rozpiętości

Łuk stalowy, wznoszący się na 20 m w części środkowej, ma przekrój komorowy w kształcie pentagonu o wysokości 0,9–1,3 m. Mniej więcej w jednej czwartej rozpiętości rozdziela się obustronnie w kierunku podstaw na dwa czworokątne przekroje komorowe, odpowiednio do rozwiązań przestrzennych profilu korpusu tramwajowego.

Jednocześnie ukształtowano łuk stalowy, spełniając przy tym wymagania statyczne dotyczące jednakowej sztywności i powierzchni przekroju na całej jego długości oraz zachowania stałej grubości blach.

Most Trojski stanowi konstrukcję zawierającą szereg zaawansowanych rozwiązań, łącznie z jego wyposażeniem. Po raz pierwszy w Czechach zastosowano wypróbowane dylatacje francuskiej firmy. Odwodnienie jezdni i chodników wykonano na całej długości mostu oraz na przyczółkach z użyciem wpustów ulicznych angielskiego producenta. Dwutorowa linia tramwajowa w środkowej części płyty pomostowej jest poprowadzona na pływającej monolitycznej płycie żelbetowej. Płytę od konstrukcji nośnej oddziela elastomerowa mata antywibracyjna o grubości 23 mm.

Do płyty zakotwiono podstawy słupów trakcyjnych, szyny oraz kątowniki zabezpieczające. Na moście zaprojektowano tory połączone spawami. Kolejowe urządzenia dylatacyjne są umieszczone na przyczółkach za konstrukcją nośną.

Przebieg robót

Podczas gdy długo dywagowano o sposobie wznoszenia głównego przęsła przez rzekę, na rusztowaniu stałym zostało wykonane betonowanie przęsła zalewowego. Główne przęsło mostu stanowi złożony system konstrukcyjny, zoptymalizowany



Ryc. 4. Stanowisko montażowe i część wysuniętego rusztu



Ryc. 5. Walce do wysuwania rusztu nośnego pomostu



Ryc. 6. Widok wysuwanej konstrukcji z lotu ptaka

zgodnie z docelowo pełnionymi funkcjami. Na poszczególnych etapach budowy, kiedy konstrukcja jeszcze nie była kompletna, pojawiły się problemy związane z powstawaniem niezwykłych obciążeń. Ze względu na to starannie opracowywano kolejność wykonywania poszczególnych robót oraz rozważono cały szereg wariantów, zanim wybrano optymalny. W celu podjęcia odpowiednich decyzji analizowano różne kryteria, z których główne to: solidność wykonania konstrukcji i eliminacja ryzyka powstałego ze złej jakości wykonania oraz opóźnień w realizacji, opłacalność i liczba tymczasowych konstrukcji pomocniczych, ograniczenie niekorzystnego wpływu podnoszącego się poziomu wody w Wełtawie, możliwość wykorzystania ograniczonej przestrzeni na placu budowy.

Po szczegółowej analizie zdecydowano, że w pierwszej kolejności zostanie wykonana płyta pomostowa, z której następnie będzie montowany stalowy łuk z wieszakami.

Płyta mostowa składa się z prefabrykowanych poprzecznicy, płyty monolitycznej i stalowo-betonowego ciągną łuku. Poprzecznicę są zawieszane na stalowej części ciągną łuku przy pomocy elementów stalowych i złączy śrubowych. Ze względu na konstrukcję płyty pomostowej trzeba było zaprojektować pięć podpór tymczasowych. Pomost został następnie usztywniony tymczasową konstrukcją kratownicową. Na hołszowickim brzegu zorganizowano stanowisko montażowe (ryc. 4), na którym stopniowo montowano tymczasową konstrukcję kratową, stalową część ciągną łuku oraz prefabrykowane poprzecznicę. W ten sposób powstała konstrukcja rusztowa, którą stopniowo wysunięto na drugi brzeg rzeki.

Tymczasowa konstrukcja stalowa kratownicowa składa się z pasa dolnego i krzyżulców. Górny pas tworzy stalowa część ciągną łuku. Montaż na stanowisku montażowym rozpoczęto od połączenia pasa dolnego tymczasowej konstrukcji kratowej z krzyżulcami. Na betonowe podpory wykonane na stanowisku montażowym ustawiano zawsze po cztery prefabrykowane poprzecznicę. Na koniec instalowano stalową część ciągną, na którą przykręcano śrubami prefabrykowane poprzecznicę i krzyżulce. Powstawały w ten sposób konstrukcje o standardowej długości 16 m, które były kolejno wysuwane. Montaż był nadzwyczaj trudny ze względu na konieczną precyzję w celu zachowania wymaganego kształtu konstrukcji oraz aby umożliwić dokładne ustawienie wszystkich połączeń śrubowych. Dlatego też wygodniej było wykonywać wszystkie te operacje na stanowisku montażowym na hołszowickim brzegu rzeki. Pozycja poprzecznicy została precyzyjnie ustawiona z użyciem urządzeń hydraulicznych.

Przy wysuwaniu konstrukcji rusztowa była ciągnięta za pomocą prętów sprężających. W sumie przewidziano osiem prętów, ale w praktyce korzystano w większości tylko z czterech. Każdy pręt był ciągnięty przez walec hydrauliczny o mocy 60 t (ryc. 5). Przednia część konstrukcji została ustawiona za pomocą krótkiego kratowego awanboku (ryc. 6), który zapewniał płynny najazd na łożyska przesuwne. Łożyska przesuwne zostały uproszczone w celu zredukowania liczby pracowników wykonujących wysuwanie konstrukcji. Na łożyskach umieszczono płyty, po której bezpośrednio wysuwano dolny pas konstrukcji kratowej. Odpadła więc kwestia blach nierdzewnych i stopniowe przesuwanie płytek teflonowych między łożyskiem a wysuwaną konstrukcją. W ten sposób zmniejszono również ryzyko błędów przy wkładaniu płytek. Siły wysuwające

były starannie mierzone, dzięki czemu osiągnięto bardzo małe wartości tarcia (1–3%). Cała konstrukcja o długości 200 m była wysuwana przez ok. dwa i pół miesiąca wiosną 2011 r.

W dalszym etapie wykonano betonowanie końcowych poprzecznic mostu. Jeszcze przed tym trzeba było osadzić stalowe podstawy łuku, które miały być zespawane z poprzeczną końcową (ryc. 7). Stalowe stopki zostały osadzone na konstrukcji stalowej, przez co stały się częścią końcowej poprzecznicy. Deskowanie końcowych poprzecznic o skomplikowanym kształcie podparto rusztowaniem stałym. Po zabetonowaniu końcowych poprzecznic kontynuowano stopniowe betonowanie płyty pomostowej, znów w odcinkach po 16 m. Deskowanie płyty pomostowej za każdym razem po stężeniu betonu było opuszczane na łodzi i przewożone na następny odcinek, gdzie ponownie ustawiano je we właściwej pozycji. Deskowanie zakotwiono do kotew zabetonowanych w prefabrykowanych poprzecznicach. Zaraz po betonowaniu poszczególnych odcinków pomostu aktywowano sprężenie poprzeczne. Po zakończeniu betonowania płyty pomostowej wykonano etapami betonowanie zespolonego stalowo-betonowego ciągu łuku. Sprężenie podłużne pomostu i cięgien łuku aktywowano w trzech krokach. Pierwsza część sprężenia podłużnego została wykonana po zakończeniu betonowania całej płyty pomostowej głównego przęsła mostu. W ten sposób powstała konstrukcja, która miała już nośność wystarczającą do montażu łuku. Wysoką sztywność konstrukcji osiągnięto zwłaszcza dzięki pomocniczej konstrukcji kratowej, współdziałającej z całą docelową płytą pomostową i ciągnem łuku.

Podstawy łuku są najbardziej obciążoną częścią konstrukcji. Przenoszą siły łuku na pomost i ciągną, są w nich również zakotwione wielkie 37-splotowe kable, podłużnie sprężające ciągną łuku. Sama konstrukcja stalowa podstaw wymagałaby dużej ilości zbrojenia do przeniesienia lokalnego napięcia. Ilość zbrojenia zredukowano dzięki wypełnieniu stalowych podstaw łuku betonem samozagęszczającym o wysokiej wytrzymałości, klasy C80/95, który rozprasza lokalne naprężenia.

Na gotowej płycie pomostowej postawiono wieże konstrukcji podporowej z materiału PIZMO, które służyły do montażu łuku mostu. Jednocześnie w miejscu przyszłej linii tramwajowej zbudowano tymczasowe tory, po których przewożono poszczególne elementy łuku, a następnie spawano w większe całości. Do przewożenia stalowych elementów wykorzystywano wózki sterowane hydraulicznie. Poszczególne elementy konstrukcji stalowej łuku były spawane w zestawy o długości zbliżonej do 1/3 łuku. Montaż pierwszej części łuku rozpoczął się od strony Troi, gdzie wzniesiono łuk u podstawy i połączono ze sworzniem konstrukcji pomocniczej przy podstawie. Następnie element ten był podnoszony wolnym końcem do wymaganej wysokości (ryc. 8a, 8b), po czym przyspawano podstawę łuku, by wreszcie konstrukcję pomocniczą ze sworzniem zdemontować. Podobnie wzniesiono część łuku po hołszowickiej stronie mostu (ryc. 9). Jako ostatni podnoszono środkowy element łuku. Wszystkie operacje podnoszenia przeprowadzono przy pomocy wieszaków prętowych oraz walców hydraulicznych (ryc. 10). Ciężar skrajnych części łuku wynosi ok. 720 t, środkowy element waży natomiast ok. 680 t.

Kiedy łuk zostanie całkowicie zespawany, stanie się konstrukcją samonośną i będzie można zdemontować wieże podporowe, po czym nastąpi instalacja wieszaków. Wieszaki będą po zain-



Ryc. 7. Osadzanie podstawy łuku



Ryc. 8a. Skrajna część łuku w pozycji transportowej



Ryc. 8b. Skrajna część łuku osadzona na sworzniu

stalowaniu napinane ze stosunkowo małą siłą ok. 5–10 % nośności, aby ograniczyć ich ugięcia pod ciężarem własnym i tym samym wyeliminować nieliniową sztywność wieszaków. Będą instalowane grupami w pięciu etapach, tak aby przy instalacji i sprężaniu nie dochodziło do nadmiernej, niesymetrycznej deformacji łuku. Po instalacji wszystkich wieszaków dolny pas pomocniczej konstrukcji kratowej zostanie przerwany, nastąpi aktywacja drugiego z trzech etapów sprężenia podłużnego i całe główne przęsło mostu zostanie opuszczone z łożysk przesuwanych na podporach tymczasowych – będzie opierać się jedynie na łoż-



Ryc. 9. Wznoszenie skrajnej części łuku po stronie Troi

żyskach docelowych. Płyta pomostowa opadnie według założeń statycznych prawdopodobnie o 250 mm i w ten sposób dojdzie do pełnej aktywacji wszystkich wieszaków. Następnie zostanie zdemontowana pozostała część tymczasowej konstrukcji kratowej oraz nastąpi ostatnia faza sprężania podłużnego i kontrola sprężenia wieszaków. W przypadku ewentualnych odchyśleń od zakładanego napięcia wieszaki zostaną skalibrowane w optymalny sposób z wykorzystaniem metod programowania oraz matryc powiązanych. Oczekuje się, że rektyfikacja mogłaby dotyczyć ok. 10% wieszaków, po czym budowę mostu będzie można dokończyć. Zostaną zamontowane stalowe kapy chodnikowe, będzie położona wierzchnia warstwa jezdni, osadzone tory tramwajowe i oświetlenie itd.

Konstrukcje betonowe

Wszystkie konstrukcje betonowe są zaprojektowane z betonów wysokich klas dla zapewnienia wieloletniego użytkowania mostu. Poprzecznice są prefabrykowane z dodatkowo sprężonego betonu C70/85 XF2. Prefabrykaty nietypowych kształtów mają 29,28 m długości, 0,50 m szerokości i zmienną wysokość od 0,41 do 1,53 m, są sprężone dwoma dziewięciosplotowymi kablami systemu SUSPA-DSI (ryc. 11). Poprzecznice zostały wykonane w zakładzie produkcyjnym segmentów mostowych SMP CZ w Brandysie nad Labem. Sprężanie poprzecznic przebiegało w dwóch fazach, pierwsza faza miała miejsce jeszcze w zakładzie, druga po instalacji poprzecznic na ciągniku łuku przed wysuwaniem. Poprzecznice w trakcie transportu i montażu były narażone na szereg obciążeń, dlatego pełna akty-



Ryc. 10. Stan robót po wzniesieniu obu części skrajnych łuku

wacja sprężenia w zakładzie produkcyjnym była niemożliwa. Do poprzecznic zabetonowano stalowe elementy kotwiące, które przenoszą obciążenia z płyty pomostowej do cięgna łuku (ryc. 12). Elementy te zostały w zakładzie przymocowane za pomocą połączeń śrubowych do stalowej części cięgna łuku.

Konstrukcje monolityczne przęsła zalewowego i głównego przęsła mostu wykonano z betonu sprężonego C50/60 XF2, tylko cięgno łuku, ze względu na większe narażenie na sole rozmrzające, wykonano z betonu C50/60 XF4. Wszystkie betony konstrukcji monolitycznych zostały dostarczone przez firmę TBG Metrostav s.r.o. Kompletnie deskowanie konstrukcji monolitycznych mostu dostarczyła firma Česká Doka. Końcowe poprzecznice przęsła zalewowego i głównego stanowią maszyną konstrukcję o wymiarach ok. 30 x 4 x 1,8 m. Z tego powodu przywiązywano nadzwyczajną wagę do wpływu ciepła hydratacyjnego na konstrukcję. Przy betonowaniu w miesiącach letnich (poprzecznice przęsła zalewowego) beton był chłodzony ciekłym azotem. W celu ograniczenia pęknięć powstających w początkowych fazach twardnienia betonu dodano do niego włókna polipropylenowe. Przęsło zalewowe ma ok. 1200 m³ objętości. Ze względu na złożoną formę konstrukcji oraz konieczność bardzo ostrożnego wylewania betonu konstrukcja przęsła zalewowego była betonowana w trzech częściach. Szczególną uwagę zwrócono na betonowanie cięgien mostu. Przestrzeń wewnątrz cięgna została wypełniona stalowymi elementami cięgna oraz zbrojeniem, które było przewidziane głównie dla ograniczenia pęknięć (ryc. 13). Idealne byłoby użycie do betonowania cięgna betonu samozagęszczającego, okazało się to jednak niemożliwe, ponieważ powierzchnia cięgna osiągała znaczne nachylenie – do 8%. Dlatego wyprodukowano specjalny beton, lekko gęstniejący, który umożliwił betonowanie elementów z nachyleniem powierzchni, a przy tym jest na tyle rzadki, że przeniknął przez małe otwory do niedostępnych części deskowania między gęsto ułożonym zbrojeniem. Technologia betonowania była przetestowana na modelowym wzorcu w skali 1:1, przy czym skontrolowano betonowanie wszystkich detali.

Beton wykorzystany przy wypełnianiu podstaw łuku został zaprojektowany na podstawie doświadczeń zdobytych przy opracowywaniu betonów wysoko wytrzymałościowych w firmie TBG Metrostav, s.r.o. Celem było osiągnięcie wysokiej wytrzymałości betonu (ostateczna projektowana klasa to C80/95), aby beton mógł w bezpieczny sposób przenieść wysokie obciążenia mechaniczne, powstające zwłaszcza w okolicy zakotwienia sześciu 37-splotowych kabli wchodzących w skład cięgna łuku. Wymagana była również zdolność betonu do całkowitego wypełnienia przestrzeni ograniczonej zbrojeniem konstrukcji. Skład betonu i sposób betonowania został znowu szczegółowo przetestowany na modelu konstrukcji w skali 1:1, który zrobiono ze sklejki. Przez wykonanie odwiertów potwierdzono jakość betonu i jego zdolność do wypełnienia całej wymaganej przestrzeni. Dopiero po pomyślnych wynikach testów przystąpiono do realizacji. Beton samozagęszczający został wpompowany do podstawy łuku od dołu, a całe podstawy wypełniano stopniowo w czterech etapach. Wyniki testów wykazały, że rzeczywista wytrzymałość betonu przekracza 100 MPa.

Sprężenie konstrukcji betonowych

Wszystkie betonowe konstrukcje nośne są sprężone, z wyjątkiem prefabrykowanych poprzecznic. Użyto w tym celu systemu



Ryc. 11. Walce hydrauliczne unoszące część łuku na prętach wieszakowych



Ryc. 12. Poprzecznice prefabrykowane na składzie



Ryc. 13. Element kotwiący przygotowany do zabetonowania w poprzecznicy

sprężającego VSL. Poprzeczne sprężenie płyt przęsła głównego i zalewowego zapewniają kable czterospłotowe w płaskich kanałach. Cięgna sprężenia podłużnego są umieszczone w kanałach okrągłych i składają się z kabli różnych wielkości, od 7- do 37-splotowych. Największe 37-splotowe kable znajdują się w cięgniach łuku (w każdej parze cięgien jest sześć kabli). Most leży w pobliżu dworca kolejowego Holešovice, przy tunelach metra linii C i biegnie po nim linia tramwajowa. Z tego powodu jest mocno wyeksponowany na zjawisko prądów błędzących. Był to jeden



Ryc. 14. Ciężno łuku przed i po betonowaniu



Ryc. 15. Przekrój łuku w części środkowej

z powodów zaprojektowania sprężenia z najwyższym stopniem zabezpieczeń. Wszystkie kable sprężające są zaprojektowane w stopniu zabezpieczeń PL3 (zgodnie z rekomendacją FIB), są więc umieszczone w plastikowych kanałach z izolacją elektryczną i monitorowane (umożliwia to pomiary odporności kiedykolwiek w trakcie żywotności konstrukcji). W ten sposób zapewniono maksymalną trwałość tego podstawowego systemu nośnego.

Konstrukcje stalowe

Budowa mostu wymagała wykonania konstrukcji stalowych zarówno docelowych, jak i tymczasowych. Konstrukcje tymczasowe obejmują zwłaszcza podpory tymczasowe w rzece oraz tymczasową konstrukcję kratową. Dalsze konstrukcje pomocnicze są już mniejsze, np. konstrukcje do wznoszenia łuku, wieże podporowe PIZMO, a to w ich części podporowej oraz w części platform górnych, konstrukcje pomocnicze sworzni do wznoszenia skrajnych elementów łuku, konstrukcje związane z wysuwaniem itd. Konstrukcje docelowe obejmują głównie łuk stalowy, ciężno łuku i wieszaki prętowe.

Podpory nurtowe o wymiarach 19 x 6,5 m są zaprojektowane jako ruszt stalowy, podparty czterema grubościennymi rurami o przekroju 1060 mm. Są one posadowione na palach wielkośrednicowych zakotwionych w podłożu nośnym. Po zakończeniu budowy ruty zostaną odcięte na głębokości 1 m pod dnem rzeki, ponieważ podpory tymczasowe muszą być kompletnie zdemontowane.

Tymczasowa konstrukcja kratowa złożona jest z pasa dolnego (profil I o wysokości 800 mm) oraz krzyżulców o średnicy

zewnętrznej ok. 400 mm, grubość ścian jest zróżnicowana w zależności od obciążenia i wynosi od 12 mm do 40 mm. Górny pas konstrukcji kratowej jest jednocześnie konstrukcją stalową ciężna łuku.

Wieszak poprzeczniczy jest dość specyficzną konstrukcją stalową, zabetonowaną w poprzeczniczy i przyśrubowaną do stalowego ciężna łuku. Przenosi obciążenie z płyty mostu do ciężna łuku i dalej do łuku. Dlatego stanowi on zasadniczą część konstrukcyjną mostu. Spawana konstrukcja jest wykonana z blach o grubości 25–70 mm z materiału S420 NL i S420 NL + Z 25. Kształt został dostosowany do funkcji statycznych i wymagań technologii montażu. Cały element o wymiarach 590 x 1368 x 1326 mm waży 1050 kg (ryc. 14).

Część stalowa ciężna łuku złożona jest z trzech głównych blach poziomych i dwóch pionowych. Roboczo element ten jest nazywany omegą, z powodu swojego przekroju, zbliżonego kształtem do greckiej litery. Do usztywnień poprzecznych są przyśrubowane wieszaki poprzeczniczy oraz krzyżulce tymczasowej konstrukcji kratowej. Na powierzchni zewnętrznej do pionowych blach przyspawano zaczepy wieszaków. Omega składa się z blach o grubości od 25 mm do 90 mm z materiału S420 NL oraz S420 NL + Z25. Długość typowych elementów wynosi 16 m, a waga ok. 23 t. Elementy te były stopniowo spawane ze sobą na stanowisku montażowym przy wysuwaniu rusztu.

Łuk stalowy jest najbardziej złożoną konstrukcją stalową mostu. Pusty przekrój ma w najwyższej części łuku szerokość ok. 6,9 m i zmienną wysokość od 0,9 m do 1,3 m (ryc. 15). W kierunku podpór przekrój rozszerza się, aż do rozdzielenia na dwie niezależne części (mniej więcej w 1/4 rozpiętości), które są zakotwione przy podstawach łuku do końcowej poprzeczniczy betonowej. Łuk jest wzmocniony szeregiem usztywnień, cztery podłużne przenoszą obciążenia z zaczepów wieszaków do całego przekroju, pozostałe zapewniają sztywność konstrukcji. Grubość blachy górnej i dolnej wynosi 60 mm, grubość podłużnych ścian obwodowych 50 mm. Wewnętrzne usztywnienia podłużne mają tylko 40 mm grubości, a przegrody poprzeczne 25 mm. Do wykonania zaczepów wieszaków przy podstawach łuku użyto blach o grubości 80 mm. Do wykonania ścian i pasów łuku wykorzystano materiał S420 ML, podczas gdy pozostałe części powstały z materiału podstawowego S355 NL. Wszystkie połączenia tej złożonej konstrukcji są zaprojektowane tak, aby umożliwiały kontrolę spawów konstrukcyjnych.

Łuk został wykonany w Horních Počernicích (Metrostav) i w Slaném (MCE) w częściach o wadze 43 do 83 t. Były one następnie dostarczane na budowę i stopniowo spawane. Dalej podłużnie zespawane elementy zostały przesunięte na przyszły pas tramwajowy, gdzie zespawano je w trzy zestawy, które następnie wznoszono do pozycji docelowej.

Zabezpieczenia antykorozyjne

Do zabezpieczenia konstrukcji stalowych wykorzystano różnorodne systemy powłokowe ze względu na zagrożenie korozyjne według TP 84. Ogólnie systemy powłokowe można scharakteryzować jako kombinację powłoki podstawowej z wysoką zawartością cynku, dwóch powłok podkładowych oraz powłoki zewnętrznej w kolorze białym. W najbardziej narażonych miejscach zabezpieczenia antykorozyjne są wzmocnione kolejnymi warstwami, ewentualnie uzupełnione cynkowaniem żarowym.

Wieszaki

W sumie 200 wieszaków prętowych Macalloy, które tworzą sieć łuku, ma średnice w granicach 76–105 mm. Na obu końcach wieszaków (na łuku i cięgnię) zostały zamocowane przy pomocy widełek i sworzni. Pręty systemu Macalloy są wykonane z materiału S520. System spełnia wymagania bezpieczeństwa dotyczących skutków zmęczenia elementów. System został przetestowany próbami 2 mln cykli przy zróżnicowanym napięciu 130 MPa. Widełki i inne detale były zmodernizowane tak, aby odpowiadały wysokim wymaganiom dotyczącym zmęczenia materiału. Napinaniu wieszaków urządzeniami hydraulicznymi przymocowanymi na gwintach przy elemencie napinającym poświęcono najwięcej uwagi. Przygotowano system stopniowej rektyfikacji z wykorzystaniem metod programowania liniowego i matryc powiązanych w celu osiągnięcia sił wymaganych w projekcie w poszczególnych wieszakach, i to jak najszybszym sposobem.

Monitoring mostu

Oryginalny projekt konstrukcji wykorzystujący możliwości materiałów i złożony proces budowy wymagają kontroli wykonywanych czynności w celu sprawdzenia, czy konstrukcja jest wznoszona zgodnie z założeniami projektowymi. Dlatego też w trakcie realizacji inwestycji konstrukcja jest na bieżąco monitorowana zarówno pod względem geodezyjnym, jak i pomiarów deformacji konstrukcji mostu przy pomocy wbudowanych tensometrów. Kontrola geodezyjna była stosowana przy wysuwaniu oraz przy dokładnej kontroli położenia i kształtu wszystkich części mostu w trakcie montażu. Poza geodetami usługi monitoringu i pomiarów tensometrycznych świadczy również wyspecjalizowana firma. W ramach programu obserwacji w trakcie budowy wykonuje się pomiary deformacji na pomocniczej konstrukcji kratowej, w betonowym pomoście, w łuku i na wszystkich wieszakach. Długoterminowy program monitoringu mostu zakłada pomiary w pomoście, łuku i na wybranych wieszakach mostu.

Podsumowanie

Most Trojski jest jedną z najbardziej znaczących budowli ostatnich lat, a możliwe, że i jednym z ostatnich mostów przez Wełtawę, które powstaną w Pradze. Dlatego też zrozumiała jest decyzja inwestora, aby wybudować most oryginalny, który będzie budowlą przyciągającą uwagę. Już swoją rozpiętością różni się bardzo od pozostałych praskich mostów. Zespół wykonawczy wkłada najwięcej wysiłku w to, aby powstająca konstrukcja była bezpiecznie zaprojektowana i wzniesiona oraz by spełniała wymagania nowoczesnej konstrukcji inżynierskiej. Szczególna uwaga została poświęcona trwałości i długiej żywotności konstrukcji. Zastosowano innowacyjne, ale sprawdzone technologie i materiały. Poza właściwą konstrukcją nośną zadbano o funkcjonalność, jakość i wygląd pozostałych elementów mostu. Obecnie kończy się etap wznoszenia łuku mostu. Nawet laicy potrafią sobie już wyobrazić, jak będzie wyglądała ta budowla. Zakończenie budowy mostu jest przewidziane na jesień 2013 r., jednak normalne użytkowanie rozpocznie się dopiero po ukończeniu całego projektu Blanka w pierwszej połowie 2014 r.

Przy budowie mostu wykorzystano wiedzę uzyskaną przy opracowywaniu projektu MPO CR nr FR-TI3/531.

Podstawowe informacje o inwestycji

Autorzy: Jiří Petrák, Ladislav Šašek, Roman Koucký, Libor Kábrt
Projektant: Mott MacDonald CZ, s.r.o., Ladislav Šašek, Petr Nehasil

Projektant konstrukcji stalowej: Excon, a.s., Vladimír Janata, Dalibor Gregor

Architekt i koordynacja 3D: Roman Koucký Boudo architektonické s.r.o., R. Koucký, L. Kábrt

Projektant wysuwania, koordynator: NOVÁK and PARTNER, s.r.o., L. Vráblík, M. Šístek

Koordinátor projektu Blanka: Satra a.s., Alexandr Butovič

Zarządca inwestycji: IDS a.s., Josef Kališek, Luděk Fuchs, Jiří Plachý

Wykonawca mostu: Metrostav a.s.

Kierownictwo projektu: Alexandr Tvrz, Zdeněk Račan, Petr Koukolík

Przygotowanie projektu: Robert Brož, Vladimír Hájek, Pavel Guňka

Eksperci: Jan L. Vitek, Miroslav Škaloud

Autor koncepcji: Petr Vitek

Wysuwanie mostu i montaż elementów: Metrostav a.s., Tomáš Wangler, Jiří Lukeš

Wykonawca konstrukcji stalowej: Metrostav a.s., Jindřich Hágle, Josef Olenič, Leoš Gurný, MCE Slaný a.s., Jan Svoboda, Vladan Michalík

Roboty geodezyjne: Metrostav a.s., Jakub Beneš, Martin Hanzl, CCE Praha, s.r.o., Jaroslav Pohan, Jiří Bouček

Dostawa, montaż i sprzężenie wieszaków Macalloy: Tension systems, s.r.o., Jiří Schlossbauer

Dostawca betonu: TBG Metrostav a.s., s.r.o., Milada Mazurová, Robert Coufal

Deskowanie konstrukcji monolitycznych: Česká Doka bednicí technika, s.r.o.

Monitoring: PONTEX, s.r.o., Tomáš Míčka, Tomáš Klir

Przekład: mgr Joanna Szprycha

Literatura

- [1] *The measurement of Scientific and Technological Activities, proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technical Innovation Data.* Wyd. pol. Komitet Badań Naukowych. Warszawa 1999.
- [2] Šašek L. et al.: *Projekt Trojského mostu.* Sborník 17. mezinárodního symposia Mosty 2012. Sekurkon 2012.
- [3] Vitek J.L. et al.: *Výstavba Trojského mostu v Praze.* Sborník 17. mezinárodního symposia Mosty 2012. Sekurkon 2012.
- [4] Hátle J.: *Výstavba Trojského mostu v Praze. „Silnice a železnice“ 2012, číslo 2.*
- [5] Gregor D. et al.: *New Troja Bridge in Prague – Concept and Structural Analysis of Steel Parts.* Steel Structures and Bridges 2012 – 23rd Czech and Slovak International Conference. “Procedia Engineering” 2012, Vol. 40, pp. 131–136. A special issue. Ed. by J. Bujňák and J. Vičan.
- [6] Janata, V. et al.: *New Troja Bridge in Prague – Structural Solution of Steel Parts.* Steel Structures and Bridges 2012 – 23rd Czech and Slovak International Conference. “Procedia Engineering” 2012, Vol. 40, pp. 159–164. A special issue. Ed. by J. Bujňák and J. Vičan.



Sztuka współpracy

Jakość, precyzja i konsekwencja w każdym detalu. Wspólna skoordynowana praca ludzi z dziesiątek branż i profesji. Zdolność rozwiązywania trudnych zadań i odwaga w poszukiwaniu nowych rozwiązań. Czy to jest sztuka? Może nie. Jedynie dobrze to umiemy.

Metrostav S.A., Oddział w Polsce
ul. Strażacka 81, Bielsko-Biała 43-382
T +48 338 196 321, F +48 338 196 320

METROSTAV

www.metrostav.pl