

# Unikalna konstrukcja i technologia – wiadukt Millau



fol. Eiffage

Fot. 1. Przekrój filara wiaduktu w czasie betonowania – widok z wysięgnika żurawia

W latach 2002-2004 zaciszna dolina rzeki Tarn we francuskim Masywie Centralnym stała się celem „pielgrzymek” specjalistów z wielu dziedzin budownictwa – mostowców, żelbetników, stalowców, technologów betonu i projektantów organizacji. Stało się tak za sprawą budowy jednego z najśmielszych obiektów komunikacyjnych – wiaduktu autostradowego Millau. Jest to obiekt na trasie nowej autostrady A75 wiodącej z Paryża do Barcelony, o długości 2,46 km, złożony z ośmiu podwieszonych przęseł. Obiekt jest pod wieloma względami unikatowy.

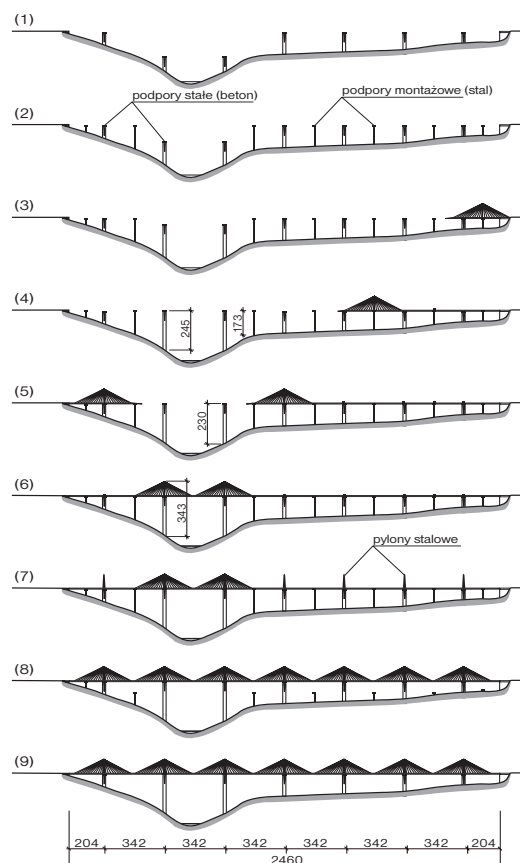
Budowę obiektu poprzedziły długie studia koncepcyjne i projektowe, które wraz z procedurami przetargowymi trwały kilkanaście lat. Wielokrotnie zmieniano koncepcję konstrukcji, a także szczegółową lokalizację. Kontrowersyjne było wytyczenie trasy „po szczytach” zboczy wąwozu, co wymagało podpór o bezprecedensowej wysokości. W dodatku trzeba się było liczyć z silnymi wiatrami występującymi w dolinach Masywu Centralnego, a także z wpływami sejsmicznymi. Równie dyskusyjne były podstawowe schematy konstrukcyjne, z uwagi na wyjątkowo silne wiatry, potencjalne wpływy sejsmiczne i duże oddziaływania termiczne. Wreszcie w roku 1996 konkurs wygrał projekt grupy francusko-angielskiej, którą firmowali m.in. wybitni projektanci mostów sir Norman Foster – architektura, dr Michael Virlogeux

– konstrukcja. Jako generalnego realizatora i zrazem właściciela obiektu wybrano grupę Eiffage. Obiekt przez 75 lat będzie własnością tej grupy. Jesienią 2001 roku ruszyła budowa. Niektóre szczegóły organizacyjne i techniczne z okresu przygotowań i stanu budowy w połowie roku 2003 przedstawił w kraju prof. Biliszczuk ze współautorami [1]. Obszerną relację z ramienia zespołu autorskiego przedstawiono na fib-Symposium 2004 w Avignon [2]. Obiekt jest pod wieloma względami unikatowy, zastosowano szereg nowoczesnych rozwiązań i wiele złożonych analiz (numerycznych i eksperymentalnych) poprzedzało projekt i realizację.

Fot. 2. Najwyższy filar (245 m) w końcowej fazie betonowania



fol. Eiffage



Rys. 1. Fazy realizacji i główne wymiary



Fot. 3. Betonowanie na drugiej zmianie



Fot. 4. Świątowanie zakończenia betonowania filarów (grudzień 2003)

Wśród wielu innowacji i szczególnych osiągnięć ograniczymy się tutaj do dwóch wielkich wyzwań technologiczno-konstrukcyjnych. Pierwsze dotyczy wznoszenia betonowych filarów wiaduktu, a drugie – nasuwania pomostu. Postuży temu schemat faz realizacji i główne wymiary pokazane na rys. 1.

#### Realizacja podpór wiaduktu

Siedem podpór stałych – głównych filarów wiaduktu – stanowiło jakby odrębne place budowy w fazie (1), bowiem wykonywano je niezależnie, nawet bez możliwości bezpośredniego przejazdu od podpory do podpory. Sprawiły to warunki terenowe. Były to słupy o zmiennym, złożonym przekroju skrzyżkowym (fot. 1), pojedynczym w dolnej części i rozdzielonym na dwie części w górnej części. Górne części słupów (o wysokości 98 m) były sprężone. Każdy słup miał inną wysokość, ale ze względów architektonicznych ujednolicono górne części słupów. Najwyższe słupy, sąsiadujące z najgłębszą częścią doliny i korytem rzeki Tarn, miały wysokości 245 m i 230 m

– są to najwyższe filary mostów na świecie (fot. 2). Bardzo duża smukłość słupowych filarów była poddyktowana nie tylko względami architektonicznymi i oszczędnością materiałów, ale przede wszystkim koniecznością zredukowania sztywności zginania słupów, zwłaszcza w płaszczyźnie równoległej do osi podłużnej wiaduktu. Wynikało to z przyjętego – po wielu analizach – schematu konstrukcyjnego: słupy w fazie użytkowania są sztywno połączone z pomostem i pylonami. Takie rozwiązanie pozwoliło łatwiej przenieść duże siły od wiatru, ale – przy braku dylatowania pomostu – spowodowało duże wpływy termiczne. Na końcach wiaduktu przemieszczenia poziome wywołane temperaturą wynoszą do 600 mm. Wymagało to ograniczenia sztywności, przez przyjęcie smukłych dwugałęziowych górnych części słupów oraz ich sprężenia eliminującego zarysowania. Z drugiej strony słupy musiały bezpiecznie przenosić naciski pionowe około 90 MN i poziome siły wymuszane przez pomost, z zachowaniem stateczności. Stąd wynikały zróżnicowane przekroje, silnie zbrojone.

Fot. 6. Nasuwanie podatnego pomostu

Fot. 5. Początek nasuwania południowego odcinka (wrzesień 2003)





Fot. 7. „Parkowanie” na podporach stałych i montażowych



foto: Eiffage



foto: Eiffage

Pomimo skomplikowanego przekroju i zmian na wysokości, betonowanie prowadzono w szybkim tempie, na dwie zmiany, także po zmroku (fot. 3). Betonowanie w samowznoszących deskowaniach przestawnych (PERI) realizowano krokami po 4 m wysokości w ciągu trzech dni, przy czym największe problemy wynikały z układania silnego zbrojenia. Kontrola geometrii potwierdziła mistrzostwo betonowania.

Podpory główne wykonano z betonu B60, sprężono w systemie Dywidag – każda gałąź stupa w górnej części była sprężona ośmioma kablami złożonymi z 19 splotów (15 mm, o długości ponad 100 m). Dodatkowo, w samych głowicach pod łożyskami pomostu zastosowano silne, krótkie kable „zszywające” – po cztery kable pod każdą z czterech płyt łożyskowych, złożone z 37 splotów Ø15 mm. Łącznie w siedmiu podporach głównych zużyto 53.000 m<sup>3</sup> betonu, 10.000 ton stali zbrojeniowej i konstrukcyjnej oraz 200 ton stali sprężającej. Płyty fundamentowe tych podpór, posadowione na czterech studniach Ø4,5 m lub Ø5,0 m (o zmiennej

głębokości od 9 m do 16 m, zależnie od podłoża) pochłonęły 19.000 m<sup>3</sup> betonu B35.

Wysokie tempo wznoszenia podpór nie wpłynęło negatywnie na dotrzymanie bardzo wysokiego reżimu dokładności wymiarowej, w tym zwłaszcza pionowości osi tych ogromnych słupów. Nic zatem dziwnego, że zakończenie betonowania i sprężania podpór głównych w grudniu 2003 roku było świętem na budowie (fot. 4). W tym czasie już był zaawansowany proces nasuwania pomostu.

Podpory montażowe, z których najwyższa miała 173 m, skonstruowano jako teleskopowo wysuwane przestrzenne słupy kratownicowe, o obrysie 12x12m, w których główne pręty nośne stanowiły cztery rury Ø1016 mm. Daje to też obraz skali problemów konstrukcyjnych wynikających z przyjętej technologii.

#### Nasuwanie pomostu

Zastosowanie technologii nasuwania znane jest i szeroko stosowane zarówno w mostach stalowych, jak i betonowych. W przypadku wiaduktu

Fot. 8. Nasuwanie pomostu ponad chmurami

Fot. 9. Zakończenie nasuwania odcinka północnego (z lewej)







fot. Eiffage

*Fot. 10. Parę metrów przed połączeniem pomostu (czerwiec 2004)*

Millau skala nasuwania, przy wielkiej wysokości podpór i dużych rozpiętościach przęseł wpłynęła na wyjątkowy charakter tej realizacji. W dodatku oś pomostu była zakrzywiona w pionie i w poziomie.

Stalowy pomost o przekroju skrzynkowym, montowany na jezdniach dojazdowych z segmentów dowożonych z wytwórni, pozwalał na znaczną elastyczność wstęgi pomostu, wykorzystywaną przy nasuwaniu. Początek tej wstęgi był wyposażony w pylon i podwieszony na kablach (fot. 5). W połowie rozpiętości przęseł umiesz-

czono podpory montażowe, ale i tak rozpiętości przy nasuwaniu zredukowane do około 171 m były imponujące. Ugięcia wstęgi przy nasuwaniu dochodziły w częściach niepodwieszonych do 1 m (fot. 6). Widoczne są charakterystyczne grzebienie wsporników krawędziowych – nie są to elementy poręczy, lecz żeberka do montażu przezroczystych osłon, o wysokości ponad 3 m, stanowiących zabezpieczenie aerodynamiczne pojazdów, a także całej konstrukcji przed silnymi wiatrami. Problem wiatru występował też w czasie budowy – wysuwanej części wspornikowej zagrażały wpływy dy-

*Fot. 11. Widok doliny z minimalnym naruszeniem środowiska przez budowę*



fot. Eiffage



namiczne, a zatem harmonogram nasuwania dostosowywano do prognoz meteorologicznych i spodziewając się silnych wiatrów „parkowano” koniec pomostu na podporze montażowej (fot. 7), dołączając kolejny zmontowany odcinek o długości 171 m. Nasuwanie prowadzono przy wietrze do 85 km/h, a stateczność w pozycji parkowania obliczono dla wiatru 185 m/h. Przy pierwszym parkowaniu dokonywano doprężenia cięgien podwieszających, w celu wy poziomowania czoła nasuwanego pasma. Prace przebiegały w różnych warunkach, czasem powyżej chmur (fot. 8) – te widoki obiegają cały świat. Na tle chmur widać zabezpieczenia kabli podwieszających za pomocą tymczasowych cięgien, przed wplywami drgań od wiatru – kable były bowiem napięte słabiej w czasie nasuwania.

Pomost był podzielony na dwa odcinki w sposób niesymetryczny, o czym decydowało położenie przęsła najwyższego (270 m nad dnem doliny), bez podpory montażowej. Od strony południowej nasuwany był pomost o olbrzymiej długości 1743 m i ten odcinek rozpoczęto nasuwać wcześniej – fazy (3) i (4). W tym czasie jeszcze nie wszystkie podpory stały się ukończone. Od strony północnej długość odcinka wynosiła 717 m. Ten krótszy odcinek dotarł pierwszy do celu, w kwietniu 2004 r. i nasunięty został na najwyższą podporę (fot. 9). W tym czasie dłuższy odcinek miał jeszcze do celu dwie odległości po 171 m i dotarł do drugiej co do wysokości podpory w maju 2004. Wreszcie w czerwcu 2004 doszło do połączenia (fot. 10).

Zdjęcia lotnicze z okresu budowy obrazują, w jak niewielkim stopniu – dzięki zastosowanej technologii – ingerowano w środowisko (fot. 11). To było zresztą istotnym kryterium przy wyborze rozwiązania konstrukcyjno-technologicznego, jako że projekt był analizowany z punktu widzenia strategii zrównoważonego rozwoju.

Istotą powodzenia nasuwania pomostu przy tak smukłych podporach, rozstawionych w dużych odstępach, była wy rafinowana technika „napędu” przy nasuwaniu. Gdyby zastosowano najczęściej stosowane tradycyjne sposoby, czyli wyciskanie wstęgi od przyczółków, to nawet przy najlepszych podkładkach ślizgowych występowałyby tak duże siły tarcia, że na te jednorazowe obciążenia trzeba by projektować znacznie masywniejsze podpory. Rozwiązanie (stosowane poprzednio na mniejszą skalę) stanowił zintegrowany system urządzeń popychających, umieszczonych na każdej podporze – stałej lub tymczasowej. W czasie nasuwania pomost spoczywał więc nie na ostatecznych łożyskach, ale na zespole podnośników i zestawie tłokowo-klinowym. Komputerowe sterowanie pracą popychających tłoków pozwalało na precyzyjne uwzględnianie odkształceń podłużnych pomostu. Skok przesuwu wynosił 600 mm i wraz z ruchem powrotnym trwał około 4 minut. Maksymalne tempo nasuwania wynosiło 10 m/h, co było istotne w regionie o zmiennej i wietrznej aurze. Co najważniejsze, poziome reakcje na głowicach podpór były praktycznie zerowe.

Po nasunięciu pomostu, jeszcze przy podparciu na podporach montażowych – faza (7), dokonywano montażu stalowych pylonów o wysokości 90 m,



fot. Eiffage

przewożonych w całości już po pomoście (fot. 12). Do pylonów podwieszano pomost i dopiero wtedy osadzano go na łożyskach. Stan tych operacji w lipcu 2004 (fot. 13) pozwala oczekiwać, że planowany termin ukończenia wiaduktu Millau – styczeń 2005 r. – zostanie dotrzymany.

W niedalekiej przyszłości, jadąc autostradą A75, będzie można przez przezroczyste osłony podziwiać krajobraz, lecz aby w pełni docenić kunszt inżynierski projektantów i wykonawców wiaduktu Millau, trzeba zjechać zboczami doliny pod obiekt. Z pewnością będzie zdumiewał unikalnym pięknem i wielkością, podobnie jak w czasie jego budowy. Z wizytowaniem obiektu nie trzeba się zbytnio spieszyć, bowiem w projektowaniu trwałościowym uwzględniono okres użytkowania obiektu 120 lat.

**prof. Andrzej Ajdukiewicz**  
**Politechnika Śląska**

#### Literatura

- 1 J. Biliszczuk, J. Onasyk, K. Berger, *Wiadukt Millau we Francji – fascynująca konstrukcja*. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1-2, 2004
- 2 J.-P. Martin et al., *The design of the Millau Viaduct*. fib-Symposium Concrete Structures: the Challenge of Creativity, Avignon, 26-28 kwiecień 2004

Fot. 12. Montaż stalowych pylonów – faza (7)

Fot. 13. Podwieszanie pomostów (lipiec 2004) – wylania się ostateczny kształt wiaduktu



fot. Eiffage