

Postęp w inżynierii rodzi się w mostownictwie



Zawsze podkreślam, że most ma mieć nie tylko odniesienie fizyczne, czyli łączyć brzegi, ale też duchowe czy estetyczne, związane z patrzeniem na niego, przechodzeniem nad czy pod nim.

Z **prof. dr. hab. inż. KAZIMIERZEM FLAGĄ**, dr h.c.m. z Katedry Budowy Mostów i Tuneli Politechniki Krakowskiej, rektorem tej uczelni w latach 1996–2002, rozmawiają **MARIA SZRUBA** oraz **MARIUSZ KARPIŃSKI-RZEPA**, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne

Zacznijmy od budowy mostów w Polsce.

Jeżeli chodzi o kwestie związane z projektowaniem mostów, to mamy w Polsce dość dobre biura projektowe, m.in. w Gdańsku, Poznaniu, Warszawie, Katowicach, Rzeszowie, Wrocławiu i Krakowie, które są przygotowane do projektowania nowoczesnych mostów. Biuro z Gdańska zaprojektowało ostatnio dwa piękne, nowej generacji mosty typu extradosed. Ich konstrukcje są pośrednie pomiędzy belkowymi a podwieszonymi. Przykładem takiej konstrukcji jest most w Kwidzynie, który w momencie powstawania, w 2013 r., był jednym z najdłuższych mostów typu extradosed na świecie – ponad 800 m, gdzie dłu-

gość przeszła ma 204 m. Natomiast most z najdłuższym przęsłem w Europie wśród obiektów extradosed powstał na obwodnicy Ostródy – to przeprawa o rozpiętości przęseł wynoszącej 132,5 + 206 + 206 + 132,5 m. Oznacza to, że jesteśmy dobrze przygotowani do projektowania, natomiast problemem jest, że w Polsce koszty projektów są bardzo zaniżane, co godzi w dobro projektantów. Ponadto brakuje środków na dodatkowe badania. Mam przyjaciela w Szwajcarii, dr. Josefa Groba, który był projektantem konstrukcji Ganterbrücke. W przypadku tego mostu nakłady na prace projektowe i badawcze wynosiły 35% wartości projektu. Oczywiście, teren jest tam bardzo

trudny, ale jeśli porównamy te 35% z naszymi 4–5%, to widać wyraźną przepaść.

Mówiąc o budowie mostów, należy zauważyć, że po transformacji ustrojowej, ale też po przystąpieniu do Unii Europejskiej pojawiły się u nas zagraniczne firmy budowlane ze swoim zapleczem technologicznym. Myśmy te techniki i technologie błyskawicznie opanowali tak, że mosty, które w tej chwili wznosimy w Polsce, pod względem wykonawstwa nie ustępują żadnym wzorcom zagranicznym.

Przechodząc do kwestii utrzymania mostów, to z upływem lat nastawienie w tym zakresie znacznie się zmieniło. Pamiętam pierwszą konferencję, w której uczestniczyłem jako mostowiec, *Bezpieczeństwo*



Most w Normandii przez Sekwanę, fot. Leonid Andronov, fotolia.com

budowli mostowych we Wrocławiu, kiedy zauważyłem, że mówiło się tylko o obliczaniu mostów. O wykonawstwie już mniej, błędnie zakładając, że nie jest to temat dla naukowców, tylko techników, natomiast o utrzymaniu prawie w ogóle się nie mówiło. Wychodzono z założenia, że mosty betowe są projektowane na sto lat, podczas gdy w rzeczywistości, z uwagi na stosowane wtedy klasy betonu, wymagały one remontów, a nawet rozbiórki już czasem niekiedy po pięciu latach.

Most należy do obiektów szczególnie podlegających zużyciu, narażonych na działanie warunków atmosferycznych, Dlatego organy zarządzające drogami i kolejami wprowadziły systemy gospodarki mostowej, zgodnie z którym co roku każdy most powinien zostać poddany przeglądowi, podczas którego jest oceniany w skali od 1 do 5. Ponadto co pięć lat należy dokonywać przeglądu generalnego, wykazującego, czy potrzebna jest dodatkowa ekspertyza, czy most może być nadal użytkowany, czy wymaga remontu, a jeśli tak, to w jakim zakresie. Muszę przyznać, że faktycznie praktykuje się te przeglądy i system gospodarki mostowej funkcjonuje dość sprawnie.

Tematu monitoringu mostów nie można lekceważyć, dlatego dziś kwestia utrzymania mostów jest traktowana na równi z ich projektowaniem i wykonawstwem. Nośność projektowa z biegiem czasu powoli spada i przychodzi moment, w którym most potrzebuje remontu lub wzmocnienia, aby doprowadzić do osiągnięcia parametrów pierwotnej lub nawet większej nośności. Most betonowy, zgodnie z normami, może służyć przez 50 lat.

Maksymalny dopuszczalny nacisk na oś w Unii Europejskiej wynosi 115 kN. Tymczasem po drogach bardzo często poruszają się samochody znacznie przekraczające tę wartość. Szwajcarzy ważą samochody na granicach i nie wpuszczają przeciążonych, u nas nie jest to jeszcze praktykowane. O tym, że w Polsce nagminnie łamane są przepisy w tym zakresie, świadczy chociażby fakt, że bez zgody środowisk mostowych podniesiono maksymalny ciężar pojazdu, który może znaleźć się na moście, do 50 t, czyli 500 kN. Do tej pory było 400 kN. Oczywiście, dotyczy to pojazdów ponadnormatywnych i wiąże się ze spełnieniem określonych warunków, niemniej jednak nie pozostaje bez wpływu na przeprawę mostową.

Przejdźmy do materiałów, z których buduje się mosty. Dwoma głównymi są beton i stal?

Beton jest kamieniem kruchym, którego wytrzymałość na rozciąganie stanowi tylko ok. 1/10 wytrzymałości na ściskanie. Ale przy ściskaniu też, począwszy od pewnego poziomu obciążenia między 0,35 a 0,55, średnio 0,45 wytrzymałości na ściskanie, zaczyna się stabilny rozwój mikrorys, zazwyczaj w warstwach stykowych między kamieniem cementowym a ziarnami kruszywa. Kiedy znika obciążenie, rysa się zamyka, niemniej jednak powoduje to zmęczenie betonu. Ta granica 0,45 wytrzymałości średniej to jest właściwie granica trwałej wytrzymałości zmęczeniowej. Czyli beton po iluś tam cyklach obciążeniach zmierza do wytrzymałości zmęczeniowej, trwałej lub nietrwałej (zależnej procentowo od współczynnika asymetrii obciążenia $\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$), która jest niższa od wytrzymałości projektowej.

W przypadku osiągnięcia naprężenia krytycznego, tj. ok. 0,8 wytrzymałości na ściskanie, zniszczenie betonu nie jest już tylko kwestią obciążenia, ale kwestią czasu. Następuje niestabilny rozwój mikrorys, który doprowadza do katastrofy. Kiedy masa pojazdów rośnie, to częściej przekraczana jest granica, w której dochodzi do stabilnego rozwoju mikrorys. Niezależnie od tego stale bardzo dynamicznie wzrasta liczba pojazdów. Zakładaliśmy, że w ciągu życia mostu zdarzy się 2×10^6 cykli. Brytyjczycy, na podstawie własnych obserwacji, podnieśli tę wartość do 10^9 cykli dla autostrad i 10^8 cykli dla dróg szybkiego ruchu.

Podczas eksploatacji mostu betonowego, na skutek działania czynników atmosferycznych, dochodzi także do karbonatyzacji warstw przypowierzchniowych betonu. Karbonatyzacja to proces, w trakcie którego w wyniku kontaktu minerałów uwodnionych cementu z dwutlenkiem węgla wodorotlenek wapnia zamienia się w kamień wapienny. Prowadzi to do obniżania odczynu pH betonu, czego efektem jest słabsza ochrona stalowego zbrojenia. W wyniku korozji pręt zbrojeniowy pęcznieje, cisnąc na otulinę. Otulina odpada i mamy destrukcję. Oczywiście, mówimy teraz o klasycznych konstrukcjach z betonu zbrojonych stalą miękką.

Natomiast jeśli chodzi o stal, to budowano z niej początkowo głównie mosty kolejowe. Stal jest materiałem ciągliwym,



bardzo dobrym materiałem konstrukcyjnym. Ma taką samą wytrzymałość na ściskanie, jak na rozciąganie. Wadą jest to, że profile, z których wykonuje się elementy mostowe, są bardzo rozbudowane, tzn. mają duży styk powierzchni z atmosferą, więc szybciej ulegają korozji. Dlatego aby utrzymać w dobrym stanie most stalowy, musi być on regularnie poddawany malowaniu.

Swego czasu miałem okazję być na Alasce, gdzie Rudolf Modrzejewski, syn Heleny Modrzejewskiej, zaprojektował dla rządu Stanów Zjednoczonych jednotorowy most kolejowy przez rzekę Tanana. Modrzejewski zastosował trzy rodzaje stali – miękką na elementy drogorzędne, krzemową na elementy średnio wyciążone i chromoniklową na elementy pierwszej klasy. Wolno podparte przeszło tego mostu ma rozpiętość 214 m,



Most Golden Gate w San Francisco, fot. haveeseen, fotolia.com

a obiekt do dziś pozostaje najdłuższym mostem Alaski – sukces jego budowy porównywano z sukcesem budowy Kanału Panamskiego.

Jednak w moim przekonaniu stal jest droższa od betonu, który zafundował obecnie budownictwem na całym świecie. Uważa się, że mosty betonowe są po pierwsze tańsze, a po drugie trwalsze, tzn. nie wymagają tak częstych interwencji jak mosty stalowe. A ponieważ z betonu można odlać dowolny kształt, stanowi to jego dodatkową zaletę w przypadku wykorzystania jako materiału w budownictwie mostowym. Ponadto współczesny beton ogromnie się różni od tego sprzed wieku czy półwiecza. Obecnie operujemy betonami zwykłymi, ale także betonami o wysokiej wytrzymałości, do 90 MPa, które dominują w mostownictwie. Dzięki temu elementy betonowe mogą mieć

mniejsze przekroje i być zdecydowanie cieńsze. Beton staje się materiałem konkurencyjnym w stosunku do stali, cały czas się rozwija i może osiągać wytrzymałość nawet do 200 MPa.

Beton niesamowicie zyskał na popularności, odkąd wynaleziono sprężenie. Zanim to nastąpiło, wzmocniano go wiotkimi prętami stalowymi, co dawało możliwość rozpiętości mostu w granicach 40–60 m. Dzisiaj mosty belkowe mają po 200–300 m. Jest to możliwe dzięki wprowadzeniu do strefy rozciąganej aktywnej siły ściskającej.

Zarówno beton, jak i stal to materiały, które cały czas się rozwijają. Ostatnio triumfy święcą mosty zespolone, stalowo-betonowe. Beton wykorzystuje się w tych strefach, które są ściskane, a stal w tych, które są rozciągane. Trwają prace nad nowymi materiałami konstrukcyjnymi.

Takimi materiałami są np. kompozyty, z wykorzystaniem których możliwe jest budowanie bardzo lekkich mostów o małych przekrojach. Świat cały czas idzie do przodu, więc poszukiwanie nowych materiałów jest tego naturalnym następstwem.

Jakie zagrożenia i wyzwania stoją obecnie przed mostownictwem?

Postęp w inżynierii rodzi się w mostownictwie, a rozwiązania proponowane przez projektantów mostowych są wdrażane do pozostałych gałęzi budownictwa. Obecnie ograniczenia w mostownictwie, paradoksalnie, wynikają stąd, że z uwagi na stale rosnącą liczbę samochodów buduje się coraz więcej mostów. Kiedy rozpoczynałem wykłady w 1977 r., podawałem studentom takie zestawienie, że w Polsce przypada 40 samochodów na 1000 mieszkańców. W Czechach to było 80, w Niemczech 300, a w Stanach

Zjednoczonych 600. Dzisiaj ten stan jest następujący: Polska – 600 samochodów na 1000 mieszkańców, Francja i Niemcy trochę poniżej 600, Stany Zjednoczone – 900. Dlatego potrzeba coraz więcej mostów, a jednocześnie nie każdy z nich może być tzw. landmarkiem, czyli obiektem charakterystycznym i stanowiącym szczytowe osiągnięcie mostownictwa. Raczej zmierza się do tego, żeby – dla zmniejszenia kosztów – wprowadzać pewną unifikację. Pokazuje to przykład autostrad, gdzie widać dwa typy powtarzających się obiektów. To stanowi pewnego rodzaju ograniczenie dla rozwoju superkonstrukcji mostowych, ale przecież nie każdy most musi być taką konstrukcją, ważne, aby spełniał swoje funkcje.

Dzisiaj prestiż państw mierzy się osiągnięciami gospodarczymi, w tym rozpiętością mostów. Do wyzwań stojących przed mostownictwem trzeba zaliczyć aspekty polityczne. Rosjanie mają most podwieszany o najdłuższym centralnym przęśle 1104 m. Japończycy zbudowali najdłuższy most wiszący, o długości przęsła prawie 1990,8 m, a Chińczycy już budują cztery dłuższe. Ta rywalizacja między państwami oznacza również postęp w mostownictwie, często jednak jest to zbliżanie się do granicznych rozpiętości. Niemniej postęp nauki jest taki, że staramy się, aby to wszystko było bezpieczne.

Wracając do mostów stanowiących dumę państw, które obiekty w Polsce określiłby Pan jako sławiące polską myśl mostową?

Według mnie są dwa takie obiekty. Pierwszym z ich jest most extradosed na obwodnicy Ostródy, drugim most Rędziński we Wrocławiu o rozpiętości głównego przęsła 256 m. W porównaniu z rosyjskim ponadkilometrowym przęsłem może się to wydawać niewiele, ale jest to betonowy most jednopylonowy, co według kryterium długości przęsła betonowego mostów jednopylonowych plasuje go na czwartym miejscu w rankingu światowym. To obiekt, którym możemy się pochwalić.

Błędy na etapie projektowania, użycie wadliwych materiałów, brak monitorowania i wiele innych czynników mogą doprowadzić do katastrofy. Co się stało w przypadku mostu w Genui, który zawałił się w sierpniu 2018 r., pochłaniając ponad 40 ofiar?

Most w Genui miał ponad 50 lat, tak jak ok. 70% włoskich mostów na autostradach. Podobno dwa lata temu

Politechnika Mediolańska wykonywała ekspertyzę, w której wskazała słabe elementy mostu w Genui i zalecała ich wzmocnienie. Chyba nie zastosowano się do tych zaleceń, niemniej nie mogę tego stwierdzić na pewno. Z pewnością jednak mogę powiedzieć, że był to most po pierwsze betonowy, a po drugie sprężony. W czasie, kiedy go projektowano, w latach 70. XX w., betony nie były jeszcze tak dobre jak teraz, były słabsze. Podobnie stal sprężająca. Pamiętam konstrukcje sprężone z tamtego okresu, które miały kanały kablowe do wprowadzenia cięgna, które następnie należało zainiektować zaczynem cementowym. Prawie nigdy ten iniekt nie wypełniał w 100% kanału. Mieliliśmy taki most w Batowicach koło Krakowa. Był to most sprężony z 1953 r. Musieliśmy go wysadzić, ponieważ z czasem zaczął wykazywać zarysowania, a most sprężony nie powinien się rysować. Okazało się, że sprężenie w ogóle nie funkcjonuje – połowa kabli była zerwana przez korozję. Dlaczego? Ten most nie miał dobrej izolacji.

Wracając do mostu w Genui. Położony był 90 m nad rzeką Polcevera i częściowo nad budynkami peryferii Genui, jego pylony miały ok. 40–50 m. Dlaczego tak wysoko? Cała autostrada A10 jest prowadzona tak wysoko, ponieważ im niżej, tym droższe tereny. Z uwagi na wysokość trudno było poddawać ten obiekt inspekcji. To był most typu podwieszonego, trzeba by więc wspinać się aż na szczyt. Okazuje się, że sprężone cięgno o wymiarze 1 x 1 m z betonu nie wiemy jakiej klasy, przypuszczalnie uległo zarysowaniu i stal zaczęła korodować przy styku tego cięgna z pylonem. Wszystko to musiało już być tak nadwątlone, że podczas ulewy cięgno spadło na pomost, pomost się zawałił, a następnie zawałił się pylon. Nie wiadomo też, jakie były straty siły sprężającej spowodowane skurczem i pęczaniem betonu oraz relaksacją naprężeń w stali sprężającej. Czy siła sprężająca była wystarczająca dla zrównoważenia naprężeń rozciągających w cięgnię?

Cięgno sprężone o długości 40 m na skutek ruchu pojazdów podlega drganiom i zginaniu, co mogło powodować wstępne zarysowanie. Poza tym, o czym już mówiliśmy, wzrosła masa i liczba pojazdów, które powodowały zmęczenie materiału. W konstrukcjach sprężonych najbardziej narażona na zmęczenie jest stal sprężająca. Nie beton, tylko właśnie stal sprę-

żająca. Nie wiemy, czy sprawdzano jej stan podczas eksploatacji mostu. Trzeba ponadto powiedzieć, że w latach 70. nie było jeszcze rozwiniętych metod obliczeniowych, stosowano najprostsze schematy konstrukcyjne. Schemat statyczny tego mostu niby był prawidłowy z punktu widzenia statyki, ale niebezpieczny. Dzisiaj w mostach podwieszonych nie stosuje się układów jednocięgnowych, tylko wielocięgnowe. Jeśli jedno cięgno wykaże spadek siły, to sąsiednie mu pomogą, bo zawsze jest pewien zapas bezpieczeństwa. Takie cięgno można wówczas wymienić. W przypadku mostu w Genui nie było takiej możliwości. Uważam, że ustroje jednocięgnowe są bardzo niebezpieczne, co niestety w tym przypadku się potwierdziło.

Poza tym pomost mostu: była to belka z przegubami typu Geberta – miał dużo mniejsze rezerwy nośności niż pomost w postaci belki ciągłej.

Przejdźmy do kwestii estetyki. Jaka jest jej rola w mostownictwie?

Już Sokrates twierdził, że każda rzecz stworzona przez człowieka powinna być funkcjonalna, trwała i piękna. Witruwiusz, rzymski architekt, wyznawał dokładnie tę samą zasadę. O trwałości już mówiliśmy. Nie jest ona wieczna, niemniej wiele rzymskich mostów przetrwało do dziś, ponieważ są to mosty z kamienia, który jest dużo mocniejszy od betonu, oraz dlatego, że rzymskie mosty mają bardzo duże zapasy bezpieczeństwa. Obecnie chodzą po nich wyłącznie piesi, a wcześniej jeździły konie.

W Polsce mosty budowane po wojnie miały być przede wszystkim funkcjonalne. Co do trwałości, to najbardziej cierpią zawsze płyty pomostu i właśnie one były najczęściej wymieniane. Poza tym w latach 60.–80. XX w. nastąpił okres prefabrykacji w mostownictwie. Jednoprzęsłowe belki sprężone, a między nimi przerwa dyfuzyjna, przez którą dostawała się woda. Teraz wzmocniamy te mosty, uciągając je. Natomiast na estetykę nie zwracano uwagi. Zawsze podkreślam, że most ma mieć nie tylko odniesienie fizyczne, czyli łączyć brzegi, ale też duchowe czy estetyczne, związane z patrzeniem na niego, przechodzeniem nad czy pod nim, musi być świadomym elementem kształtowania krajobrazu. Lucjan Rydel, poeta i dramaturg okresu Młodej Polski, w jednym ze swoich wierszy w piękny sposób przyrównuje most do tęczy łączącej brzegi.



Kładka dla pieszych w Singapurze, fot. bennymarty, fotolia.com

Będąc przewodniczącym Związku Mostowców Rzeczypospolitej Polskiej, wraz z moim ówczesnym zastępcą, prof. Wojciechem Radomskim, wpadliśmy na pomysł zorganizowania konferencji *Estetyka mostów*.

Tuż przed rokiem 2000 związek architektów brytyjskich zorganizował wielką konferencję, na której zakwestionowano dotychczasowe kryteria przetargów na obiekty mostowe, które preferowały najniższą cenę. Na estetykę nie zwracano uwagi, most miał być jedynie funkcjonalny i trwały. Protestujący postulowali przeprowadzenie konkursu, podczas którego byłyby oceniane walory estetyczne przepraw, zwłaszcza tych o dużych rozpiętościach. Dzięki temu w Wielkiej Brytanii powstało tak wiele bardzo pięknych mostów, tzw. milenijnych.

Wielcy twórcy mostów są zdania, że od inżynierów powinno się wymagać nie tylko obliczenia mostu, wykonstruowania, ale również uwzględnienia kwestii estetyki i piękna. Zwracało na to uwagę także wielu filozofów. Martin Heidegger, filozof niemiecki, napisał w jednym ze swych dzieł, że most skupia na swój sposób ziemię i niebo, istoty boskie i śmiertelnych. Jak widać, już wcześniej mosty były tak postrzegane, stąd liczne figury świętych na mostach średniowiecznych. W Polsce staramy się upiększać mosty przez malowanie. Natomiast Niemcy, Francuzi czy

Szwajcarzy uważają, że materiał powinien się sam bronić. Może i my z czasem dojdziemy do podobnych wniosków.

A czy Pan ma ulubione mosty?

Różne są mosty na świecie, ten się podobna z jednego powodu, drugi z innego. Najczęściej mosty o największych rozpiętościach nie są rewelacyjne pod względem estetyki. Jest taki spiralny most, nawiązujący do budowy cząsteczek DNA, który wzbudza mój podziw – to kładka dla pieszych w Singapurze. Mostem, który zasługuje na dużą uwagę, jest bez wątpienia most wiszący Golden Gate w San Francisco, uważany też za jedno z największych dzieł w stylu art déco.

Jednym z wybitnych obiektów jest także podwieszany most przez Sekwanę w Normandii. Główne przęsło tego mostu ma długość 856 m, przy czym środkowa część przęsła nie jest betonowa, tylko stalowa, żeby był lżejszy. Z mostów belkowych największą rozpiętość ma most Shibano przez Jangcy w Chinach, który liczy 330 m, przy czym środek przęsła też jest ze stali. Drugie miejsce na świecie w tej kategorii zajmuje most Stolma w Norwegii (301 m), gdzie zastosowano beton konstrukcyjny, ale lekki.

Pośród mostów łukowych największą rozpiętość przęsła ma most Chaotianmen w Chinach. Jest to most stalowy przez Jangcy o długości przęsła 552 m. Podobne parametry ma most Lupu w Szang-

haju. Moim zdaniem ten wygląda już za ciężko. Piękna należy szukać w obiektach o mniejszych rozpiętościach.

Wybitnym obiektem inżynieryjnym jest dzieło Roberta Maillarta – Salginatobel Bridge w Szwajcarii, wzniesiony 80 m ponad wąwozem rzeki Salgina, o rozpiętości 90 m, pierwszy most łukowy ze współpracującym pomostem.

Kolejnym pięknym szwajcarskim mostem, typu extradosed, jest Sunniberg, zbudowany koło Klosters według projektu Christiana Menna.

Interesujące są mosty łukowe, z jazdą górą, dołem, czy pośrednią. Z polskich mostów godny uwagi jest most stalowy z jazdą pośrednią w Puławach (212 m).

Podziw budzą zwykle mosty wiszące oraz podwieszane, które zawładnęły budownictwem mostowym po II wojnie światowej. Mają one trzy zasadnicze elementy konstrukcyjne – pomost, pylony i liny, czyli ciągną. Staramy się, aby wystąpiły w nich tzw. proste stany wyężenia, tzn. aby ciągną były tylko rozciągane, pylony ściskane, co zapewnia najlepsze wykorzystanie materiału konstrukcyjnego. Dzięki temu możemy pokonywać bardzo duże rozpiętości zarówno w terenach płaskich, jak i górzystych. Zatem odpowiedź na pytanie o ulubione mosty nie może być jednoznaczna.

Dziękujemy za rozmowę.

