

# MOST PODWIESZONY

BUILDER  
FOR THE  
YOUNG  
ENGINEERS

20  
17

KONKURS  
DLA MŁODYCH  
INŻYNIERÓW

20  
17  
EDYCJA I



wskazówka

## kreowanie przestrzeni i konsekwencje konstrukcyjne



dr hab. inż. Krzysztof  
Żółtowski, prof. PG  
Politechnika Gdańska

Kładki mogą stanowić element wyrazu artystycznego i jednocześnie spełniać skutecznie swoją funkcję. Przenoszenie form strukturalnych z kładek do dużych mostów jest niebezpieczne i może prowadzić do niepowodzeń.

Idea traktowania kładek dla pieszych jako prototypów dużych mostów wymaga krytycznej oceny. W referacie z 2005 roku napisałem: „Każdy projektant materii użytkowej, pragnąc zaznaczyć swoją obecność, myśli o tym, jak zachwycić otoczenie produktem swojej działalności. Jednym z najpowszechniej stosowanych zabiegów prowadzących do celu jest forma estetyczna urządzenia, wyróżniająca je spośród wielu innych produktów spełniających tę samą funkcję. W tej materii przoduje rynek samochodowy, na którym zmiany stylistyki następują wielokrotnie częściej niż zmiany techniczne. Otaczają nas odkurzacze w obudowie gwiezd-

nego krążownika czy kosiarki przypominające bolidy wyścigowe. Rekordy inwencji biją wszelkiego rodzaju opakowania (rys. 1.).

### Poszukiwanie kompromisu

Mosty jako obiekty architektoniczne również podlegają opisanym przeobrażeniom, chociaż trudno w nich wprowadzać bez negatywnych konsekwencji formy konstrukcyjne nieuzasadnione. Kompromis między kształtowaniem konstrukcji mostowych w zgodzie z prawami mechaniki i trendami w architekturze jest obecnie celem poszukiwań wielu mostowców. Niewątpliwie najlepszym poligonem praktycznym tych działań są kładki dla pieszych. Śmiało i atrakcyjne z architektonicznego punktu widzenia kładki, pomimo iż w przeważającej większości mogłyby być zastąpione układami znacznie mniej finezyjnymi, zyskują społeczną akceptację i stają się wizytówką ich twórców”.

Cytat ten pokazuje ogólną tendencję do eksperymentowania w obszarze małych mostów. Widać wyraźnie, że jesteśmy dzisiaj obserwatorem, a często autorami procesu tworzenia konstrukcji, w których podstawowe cele funkcjonalne związane z przydatnością i bezpieczeństwem schodzą na plan dalszy, oddając pole formie estetycznej. Konstrukcja użytkowa staje się przez to formą wypowiedzi artystycznej, zaś mistrzem jest ten, kto potrafi za-

chować równowagę między aspektami funkcjonalnymi, ekonomicznymi i estetycznymi.

Wdzięcznym polem wszelkich eksperymentów są kładki dla pieszych. Pozwalają one z uwagi na efekt skali realizować nietypowe, kontrowersyjne lub wręcz błędne z konstrukcyjnego punktu widzenia rozwiązania. Wyróżniają się tu przede wszystkim konstrukcje podwieszane i łukowe. Wspomniany efekt skali, ogólnie mówiąc, polega na braku proporcji między własnościami materiałowymi (wartości stałe), przekrojami (proporcje kwadratowe) i ciężarem (proporcje sześciennie).

W dużym uproszczeniu zagadnienie skali objawia się w inżynierii lądowej brakiem proporcjonalności między parametrami konstrukcji i obciążeniem.

### Efekt skali

Efekt skali to szerokie zagadnienie teoretyczne, związane między innymi z problemem przeniesienia wyników badań modelowych do naturalnych konstrukcji. Podstawy teoretyczne odwzorowania i interpretacji badań modelowych są szeroko opisane w literaturze. W du-



Rys. 1. Kosiarka, odkurzacze i butelka alkoholu

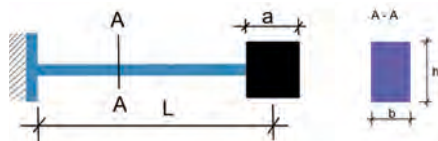
Konstrukcja użytkowa staje się formą wypowiedzi artystycznej, zaś mistrzem jest ten, kto potrafi zachować równowagę między aspektami funkcjonalnymi, ekonomicznymi i estetycznymi.

Duże, współcześnie realizowane obiekty mostowe są projektowane z efektywnym wykorzystaniem wiedzy teoretycznej dotyczącej optymalnego i bezpiecznego konstruowania. Pomimo tych ograniczeń można jednak strukturze nadać piękną formę.



Wiadukt Millau, fot. N.A.Parish. Źródło: Wikimedia

żym uproszczeniu zagadnienie skali objawia się w inżynierii lądowej brakiem proporcjonalności między parametrami konstrukcji i obciążeniem. Problem można zobrazować, wykorzystując prosty przykład (rys. 2.). Wyobraźmy sobie wspornik o długości 10 m, na którego końcu swobodnym znajduje się masa o kształcie sześcianu o wymiarze 1 m i gęstości 1000 kg/m<sup>3</sup>. Wspornik jest belką o przekroju prostokątnym (szerokość  $b=0,05$  m) wykonaną z materiału o wytrzymałości  $R=200$  MPa.



Rys. 2. Wspornik pod ciężarem własnym

- $R=200$  MPa
- $L=10$  m
- $a=1$  m
- $b=0,05$  m
- Obciążenie  $Q \sim 10$  kN
- $M_{\max}=100$  kNm

Dla powyższych warunków  $h=0,24$  m przy spełnieniu warunku:  $R=200$  MPa

W przypadku gdy przeskalujemy obiekt 10-krotnie, otrzymamy:

- $R=200$  MPa
- $L=100$  m

- $a=10$  m
- $b=0,5$  m
- Obciążenie  $Q \sim 10000$  kN
- $M_{\max}=1000000$  kNm

Dla powyższych warunków  $h=7,67$  m (z przeskalowania  $h=2,4$  m), co stanowi  $\sim 3,2$ -krotne zwiększenie mnożnika skali.

Z tych prostych rozważań wynika, że nie można bezkarnie przenosić rozwiązań strukturalnych z modelu na rzeczywisty obiekt, ponieważ można natrafić na poważne problemy przy spełnianiu warunków wytrzymałościowych lub użytkowych. Zatem stosowanie w dużych mostach tego, co ktoś wcześniej zrealizował z powodzeniem przy okazji kładki dla pieszych lub małego wiaduktu, jest ryzykowne lub bardzo kosztowne.

### Mosty podwieszane. Od logiki do abstrakcji

Klasykna koncepcja mostu podwieszanego jest elementem ewolucji konstrukcji kratownicowych, w których przenoszenie obciążeń realizowano przez struktury złożone z prostych prętów ściskanych lub rozciąganych. Odległość między elementem ściskanim i rozciągającym jest jednym z decydujących czynników określających nośność. Układ lin (prętów rozciąganych) położony na dużym mimośrodku w stosunku do przęsła (pręta ściskane-

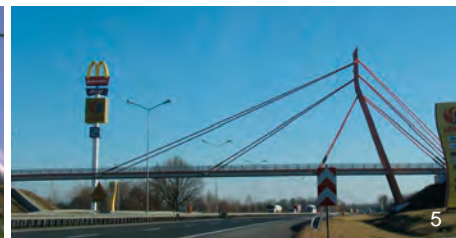
go) jest prostą realizacją powyższych założeń. Kluczowym elementem utrzymującym wspomniany mimośród i tym samym przenoszącym większość obciążeń pionowych jest pylon, który z natury rzeczy powinien być prostopadły. W nowoczesnych mostach pylon przenosi na podłoże niemal całkowity ciężar własny konstrukcji. Zakrzywienie pylonu powoduje drastyczny spadek nośności i związane z tym kłopoty w spełnieniu warunków wytrzymałościowych.

Niestety słowo „prosty” może kojarzyć się z prostotą i prymitywizmem. Prostoty to synonim typowości, braku cech indywidualnych, prostactwa. Aby zadziwić świat i wprowadzić nową jakość, trzeba budować krzywe! W naturze nie ma linii prostych. To błędne pojmowanie istoty konstrukcji jest przyczyną nowego trendu w kształtowaniu form mostów.

Na zdjęciach 3–22 przedstawiono kilkanaście wybranych przykładów małych i dużych mostów podwieszonych lub wiszących. Całość opatrzone komentarzem autorskim.

Obiekty na rys. 3. i 4. oraz 6., 7. i 11. przedstawiają ewolucję formy konstrukcyjnej zgodnej z podstawami inżynierii. We wszystkich przykładach mamy bowiem proste, ściskane pylony i podwieszony pomost.

Na rys. 5. przedstawiono klasyczny przykład mostu powieszanego. W całość wkład



się jednak element dekonstruktywizmu związany z całkowicie nieuzasadnionym statycznie i wytrzymałościowo zagięciem górnej części pylonu.

Obiekty na rys. 8., 9., 12., 13., 14. i 15. to zdecydowane kształtowanie konstrukcji w celu wzbudzenia odczuć estetycznych. Pylon w przypadkach na rys. 8. i 12. pracuje zdecydowanie niekorzystnie. Trochę lepiej wypadają struktury pokazane na rys. 9. i 14. Pomimo krzywoliniowej formy pylony tam zostały ukształtowane tak, aby do minimum zredukować zginanie (przynajmniej od ciężaru własnego). Ekstremalnym przykładem takiego kształtowania jest koncepcja przedstawiona na rys. 15. Nowoczesne narzędzia numeryczne pozwalają na kształtowanie formy konstrukcyjnej tak, aby zrealizować łuk czysto ściskany pod ciężarem własnym. Niestety taka forma teoretycznie ma rację bytu, gdy ciężar własny jest dominującym obciążeniem. Analiza obciążenia użytkowego może zatem podważyć przedstawioną koncepcję. Rys. 13. i 16. przedstawia wyjątkowe rozwiązania z uwagi na całkowity brak respektu do podstawowych kanonów konstrukcyjnych. Przejawia się on w silnym zakrzywieniu elementów nośnych, przejmujących większość obciążeń statycznych i użytkowych (rys. 13.) i w obciążaniu struktury quasi-lukowej w jej odcinkach niemal prostoliniowych (rys. 16.).

We wszystkich opisanych przypadkach Projektant mógł jednak sobie pozwolić na odejście od kanonów, ponieważ problem dotyczy małych mostów (efekt skali). W przypadku dużych konstrukcji sprawa się znacznie komplikuje i dlatego trudno dzisiaj znaleźć zrealizowany przykład z zakrzywionymi pylonami. Wyjątek stanowią obiekty przedstawione na rys. 17. i 18. Należy jednak zaznaczyć, że most Erasmus posiada pylon i układ cięgien ukształtowany tak, aby pod ciężarem własnym nie było

w nim zginania. Natomiast rozmiary podstawy pylonu mostu Hamanako obnażają niedoskonałość zastosowanej tam formy.

Zakrzywienia i mimośrod w pylonach dużych mostów nie uchodzą bezkarnie. Dobrym przykładem jest niedawno zrealizowany Most Rędziański. Projektant prawdopodobnie ze względów estetycznych obniżył położenie rygla przejmującego składową poziomą w miejscu załamania konstrukcji nogi pylonu (rys. 19.) i tym samym wprowadził w strukturę prętową nieduży mimośród skutkujący istotną koncentracją naprężeń.

Na podstawie doświadczeń związanych z budową Mostu Rędziańskiego i w obliczu historycznego dorobku w zakresie kształtowania dużych mostów podwieszonych i wiszących trzeba spojrzeć krytycznie na najnowsze dokonania projektowe. Rozwiązanie przedstawione na rys. 20. ma wiele wspólnego z kładką dla pieszych (rys. 8.). Zakrzywione pylony to rozwiązanie wcześniej nie stosowane na świecie! (można zapytać, dlaczego?) Projekt przedstawiony na rys. 20. nie został skierowany do realizacji. Most przedstawiony na rys. 21. wciąż czeka na realizację. Z uwagi na swoją unikatową, nieuzasadnioną konstrukcyjnie formę został zaprojektowany ze stali i okazał się zbyt kosztowny.

Przykładem polskim jest most przez Brdę w Bydgoszczy (rys. 22.). Pylon w formie estetycznej wyraźnie nawiązuje do małego mostu w Hawrze (rys. 10.). Strukturalnie jednak występuje tam poważna różnica, gdyż konstrukcja w Hawrze nie jest pylonem. Przyjęte rozwiązanie strukturalne w moście bydgoskim może być przesłaniem lub formą artystycznego wyrazu. Jest także z pewnością wyrazem braku respektu do podstawowych zasad kształtowania struktur inżynierskich. Wykonawcy konstrukcji zostali postawieni przed unikatowym wyzwaniem.

Bez komentarza pozostawić należy pytanie: Czy to powód do dumy, czy rozpaczy?

## Podsumowanie

Projektowanie i budowa małych form konstrukcyjnych często pozwala na dekonstruktywiczne podejście. Kładki mogą stanowić element wyrazu artystycznego i jednocześnie skutecznie spełniać swoją funkcję. Przenoszenie form strukturalnych z kładek do dużych mostów jest niebezpieczne i może prowadzić do niepowodzeń. Nie bez powodu duże, współcześnie realizowane obiekty mostowe są projektowane z efektywnym wykorzystaniem wiedzy teoretycznej dotyczącej optymalnego i bezpiecznego konstruowania. Pomimo tych ograniczeń można jednak strukturze nadać piękną formę.

Pylon to magiczna bryła. Być może nawiązuje do egipskich obelisków będących symbolami chwały i potęgi (rys. 23.). Prosta forma jest w tym wypadku nietykalna ze względów symbolicznych i konstrukcyjnych. Obelisk stanowi zatem ideal jednoczący strukturę, estetykę i przesłanie. Nie był nigdy konstrukcją użytkową.

**Abstract. Design and construction – challenges for bridge designers and builders. Cable stayed and suspended bridges, Aesthetics and structural consequences.** The paper deals with aesthetic and structural aspects of designed pylons for cable stayed or suspension bridges. Author pays attention to fact, that extraordinary structural solution implemented to footbridge or small viaduct can work properly thanks to phenomena of scale effect. Extraordinary structure solution implemented as aesthetic elements to the large bridge can create serious problems with general carrying capacity of structure or at least makes it extremely expensive. Several examples are presented and discussed.

- Rys. 3. Kładki na górnej Wiśle; od lewej: kładka wisząca w Wiśle i podwieszona w Ustroniu (1969) (fot. K. Janikowska)  
Rys. 4. Kładka przez kanał Rhine-Main-Danube, źródło: SBP Stuttgart, 1987  
Rys. 5. Kładka nas autostradą A4, ZBP Mosty Wrocław, 2000, <http://bywajtu.pl/media/dynamic/pictures/AZgDEaulcOfZ.1200x1200.JPG>  
Rys. 6. Kładka nad Gahlensche Strasse, źródło: SBP Stuttgart, 2003  
Rys. 7. Kładka w Berlinie, 2002, źródło: LAP  
Rys. 8. Kładka nas autostradą A4, 2004, źródło: ZBP Mosty Wrocław  
Rys. 9. Kładka w Turynie, 2005, fot. Uccio "Uccio2" D'Ago. Źródło: Wikimedia  
Rys. 10. Most w dokach Hawru, Ouvrages d'art, 2005, źródło: trekearth.com  
Rys. 11. Sean O'Casey Bridge Dublin, 2007, źródło: wikimedia.org, fot. Peter Misik  
Rys. 12. Wiadukt na drodze S3, 2008, źródło: Transprojekt Gdański  
Rys. 13. Wiadukt na drodze S3, 2008, źródło: Transprojekt Gdański  
Rys. 14. Kładka przy Galerii Malta, Sipińscy-Poznań, 2009  
Rys. 15. Koncepcja, SBP Stuttgart, 2008, źródło: SBP Stuttgart  
Rys. 16. Koncepcja, Transprojekt Gdański, 2009, źródło: Transprojekt Gdański  
Rys. 17. Erasmus Bridge, Ben van Berkel, 1996  
Rys. 18. Hamanako Sun Marine Bridge 1996  
Rys. 19. Most Rędziański. ZBP Mosty Wrocław, w budowie. Analiza MES części dolnej pylonu, źródło: Politechnika Gdańska  
Rys. 20. Most przez Wisłę pod Grudziądzem – projekt, Transprojekt Gdański, 2006, źródło: Transprojekt Gdański  
Rys. 21. Yamuna Bridge w Wazirabad – projekt SPB, źródło: SPB Stuttgart, 2006  
Rys. 22. Most przez Brdę w Bydgoszczy – projekt, Transprojekt Gdański, 2009, źródło: Bydgoszcz NaszeMiasto.pl  
Rys. 23. Waszyngton, fot. Skyfox11 Źródło: Wikimedia

