



**Marcin Sosnowski, Adam Skupiński**

*Akademia im. Jana Długosza*

*al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: m.sosnowski@ajd.czest.pl*

## PROJEKT I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA MODELU MOSTU

**Streszczenie.** W ramach pracy zaprojektowano i wykonano model konstrukcji mostowej oraz przeprowadzono badania eksperymentalne dotyczące wytrzymałości przygotowanej koncepcji. Ponadto równolegle zrealizowano numeryczną analizę wytrzymałościową wirtualnego modelu opracowanego mostu, dokonano także porównania wyników badań numerycznych i eksperymentalnych.

**Słowa kluczowe:** most, analiza wytrzymałościowa, analiza numeryczna.

## DESIGN AND MECHANICAL ANALYSIS OF BRIDGE MODEL

**Abstract.** The bridge model was designed and manufactured within the confines of the work. The experimental research as well as numerical analysis concerning the mechanical strength of the developed design were performed. The comparison of experimental and numerical research results is presented in the paper.

**Keywords:** bridge, mechanical analysis, numerical analysis.

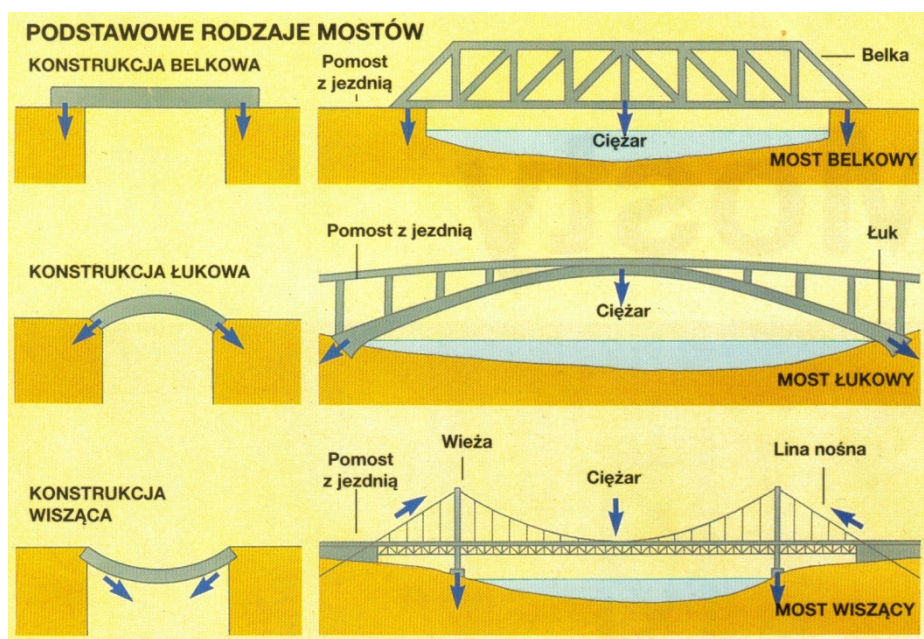
### Budowa mostów i ich rodzaje

Mosty stanowią integralny element naszego życia. Ich funkcjonalność jest najważniejszą cechą tych konstrukcji. Najprostsza definicja mówi, że most to budowla inżynierska wznoszona w celu przekroczenia przeszkody i przeprowadzenia ciągu komunikacji.

Wyróżniamy kilka rodzajów mostów. W zależności od przeznaczenia mogą to być mosty kolejowe, drogowe, wiadukty i kładki dla pieszych. Wykonuje

się je z drewna, kamienia, żelbetu lub stali. Spotyka się również nieliczne przypadki mostów wzniesionych z aluminium.

Istnieją trzy podstawowe typy konstrukcji mostowych: belkowy, rozporowy (łukowy) oraz wiszący (rys. 1).



Rys. 1. Podstawowe typy konstrukcji mostowych [1]

Wiele mostów ma formę płaskiej struktury, spinającej jednym przęsłem brzegi rzeki. Taką konstrukcję nazywamy mostem belkowym. Oba końce przęsła opierają się na przyczółkach, które przenoszą ciężar mostu oraz wszystkiego, co się na nim znajduje, na podłoże. Największy problem związany z konstrukcją mostu belkowego stanowi fakt wyginania się przęsła pod własnym ciężarem. W wyniku tego procesu górna część przęsła jest ściskana, a dolna rozciągana. Im dłuższe przęsło, tym większe siły naprężeń. Wytrzymałość takiej konstrukcji zależy od wysokości mostu, lecz wyższe przęsło musi być cięższe, co zwiększa siły odkształcające. Stosując dodatkowe filary podpierające most belkowy na całej długości, możemy zwiększyć jego nośność.

Często stosowanym rodzajem mostu belkowego jest konstrukcja dźwigarowa. W tym typie konstrukcji przęsło nie jest litą masywną belką, a stalową, usztywnioną rurą o przekroju prostokątnym lub trapezowym. W ten sposób można znacznie podwyższyć przęsło, nie zwiększając zbyt jego masy. Oznacza to, że odległość między filarami może zostać wydłużona. W podobnym celu stosuje się przęsła o sztywnej konstrukcji kratownicowej.

Inną metodą wydłużenia przęsła jest zastosowanie konstrukcji wspornikowej. Most wspornikowy zbudowany jest z dwóch oddzielnych części – wsporników, których środek ciężkości ze względu na ich kształt znajduje się blisko punktu mocowania. Wsporniki mocowane są do brzegów rzeki, a ich końce łączą się ze sobą. Przy większych szerokościach rzeki możliwe jest zastosowanie dodatkowego, krótkiego podwieszanego przęsła.

W celu zwiększenia rozpiętości przęsła stosuje się konstrukcje łukowe. Najczęściej są to budowle murowane. Dzięki łukowi siły ciężkości skierowane w dół, działające na przęsło, przenoszone są z jego środka na siły skierowane na zewnątrz, przyłożone na końcach przęsła. Jest ono oparte na przyczółkach, które utrzymują most na miejscu. W konstrukcjach wieloprzęsłowych pozioma składowa siła, działająca na filar, pochodząca od jednego przęsła, równoważona jest przez podobną siłę skierowaną przeciwnie, pochodzącą od drugiego przęsła.

Największą zaletą mostu łukowego jest to, że na jego konstrukcję nie działają siły rozciągające, a jedynie ściskające. Większość stosowanych materiałów jest dużo bardziej odporna na ściskanie niż na rozciąganie, dlatego łuki są wyjątkowo wytrzymałe i mogą przenosić duże obciążenia. Pomost, wraz ze znajdującą się na nim jezdnią lub torowiskiem, może zostać podwieszony pod konstrukcją lub być położony na niej.

Rozwój konstrukcji łukowych wpłynął na dzieje budownictwa mostów. W celu maksymalnego wydłużenia przęsła konstruktorzy dążyli do spłaszczenia profilu łuku. Starali się również odchudzić części ponad łukiem, zwane pachwinami łuku, które stanowią większość masy mostu, lecz nie są elementami nośnymi.

W latach 30. XX wieku do wznoszenia mostów zaczęto używać betonu. Przy budowie mostu betonowego konieczne jest używanie szalowania, będącego kratownicą podpierającą strukturę w fazie budowy. Francuski inżynier Freyssinet, projektant mostu Plougastel, wykorzystał to samo szalowanie podczas budowy wszystkich łuków mostu. Początkowo na każde z przęseł wylewano tyle betonu i w taki sposób, aby nie uległo zniszczeniu pod własnym ciężarem. Następnie szalowanie przenoszono na kolejne przęsło i powtarzano operację. Po wzniesieniu wszystkich przęseł siły kompensowały się do tego stopnia, że możliwe było dolanie reszty materiału. Metoda ta znacznie ograniczyła koszty budowy.

W dzisiejszych czasach najdłuższymi mostami są konstrukcje wiszące. Most zawieszony jest na linach, które zakotwiczone są w brzegu i wyniesione na odpowiednią wysokość na specjalnie zbudowanych wieżach. Pomost utrzymywany jest na pomniejszych linach zwisających z lin głównych [1].

Most wiszący musi znosić ogromne siły skręcające spowodowane nierównomiernym obciążeniem pomostu oraz drganiami powstającymi wskutek wiatru. Aby temu przeciwdziałać, pod pomostem umieszcza się kratownice usztywniające.

Jeżeli konstrukcja mostu kolidowałaby z ruchem statków, istnieje możliwość wzniesienia mostu ruchomego, czyli zwodzonego. Funkcjonuje kilka typów takich mostów.

Mosty obrotowe składają się z kilku sekcji, które mogą obracać się na filarach, ustawiając się równolegle do nurtu. Most kłapowy składa się z jednej bądź dwóch części, które w razie potrzeby odchylają się do pionu na zawiasach. Bardzo rzadkim mostem ruchomym jest most przenośnikowy. Zwykle jest to lina lub szyna rozpięta pomiędzy dwoma wieżami, do której podwieszono są platformy, przeciągane na drugą stronę rzeki.

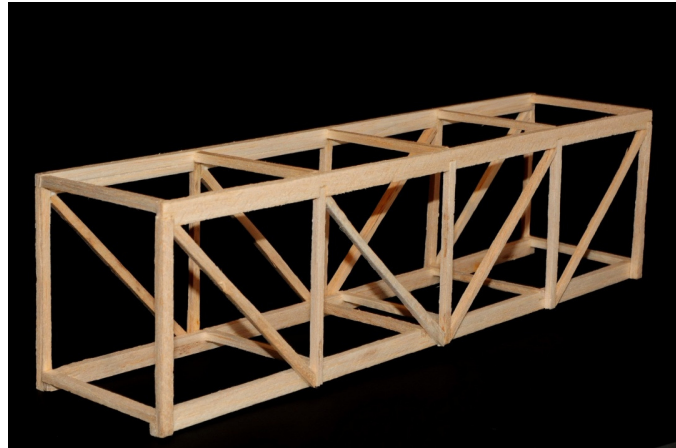
Wyróżniamy również mosty do użytku tymczasowego, np. mosty pontonowe na pływających podporach, w postaci łodzi lub pontonów zakotwiczonych do dna rzeki. Odholowując część łodzi na bok, można otworzyć drogę przepływającym statkom.

## **Narzędzia inżynierskie wspomagające projektowanie**

Narzędzia typu CAE – Computer Aided Engineering – znajdują zastosowanie między innymi w inżynierii mechanicznej, elektrycznej i budowlanej [2–5]. Znamienne dla CAE jest cyfrowe modelowanie mające na celu opracowanie zapisu konstrukcji wyrobu oraz jego analizy mechaniczne, przepływowe lub inne. Programy tego typu mogą być wykorzystywane do opracowania i zarządzania bazami danych (elementów znormalizowanych, własności materiałowych itp.) oraz symulacji zachowania elementu w warunkach eksploatacyjnych. Jednym z bardziej popularnych programów typu CAE jest SolidWorks, dający projektantom możliwość wszechstronnej edycji danych projektowych, zapewnia aktualność relacji między częściami, złoženiami i rysunkami oraz przeprowadzenia analiz numerycznych adekwatnych do badanego elementu. Program ten ma możliwość przeprowadzenia m.in. analiz mechanicznych, dzięki zastosowaniu SolidWorks Simulation, który jest wykorzystywany w optymalizacji projektu dla uzyskania maksymalnej efektywności konstrukcji. Umożliwia poddanie projektu symulowanym warunkom eksploatacyjnym, takim samym, jakie występują w rzeczywistości.

## **Obiekt badań**

Obiektem badań jest przedstawiony na rys. 2 model konstrukcji mostowej zbudowany z listewek z balsy, zgodnie z wymiarami zawartymi w rysunkach wykonawczych opracowanych w programie SolidWorks. Jego masa przekracza prawie dwukrotnie masę modelu wirtualnego i wynosi 17 g. Jest to spowodowane wilgotnością drewna, zastosowanym typem kleju oraz pokryciem powierzchni lakierem. Ponadto przekroje listewek użyte do budowy zawierały się w górnych odchyłkach wymiarowych.



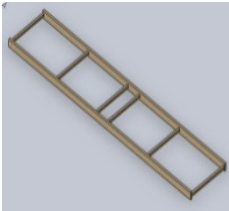
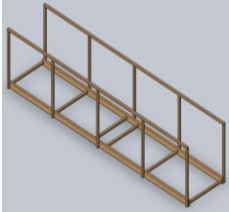
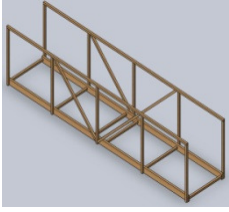
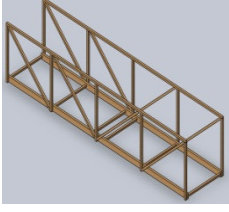
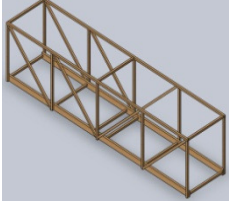
Rys. 2. Obiekt badań

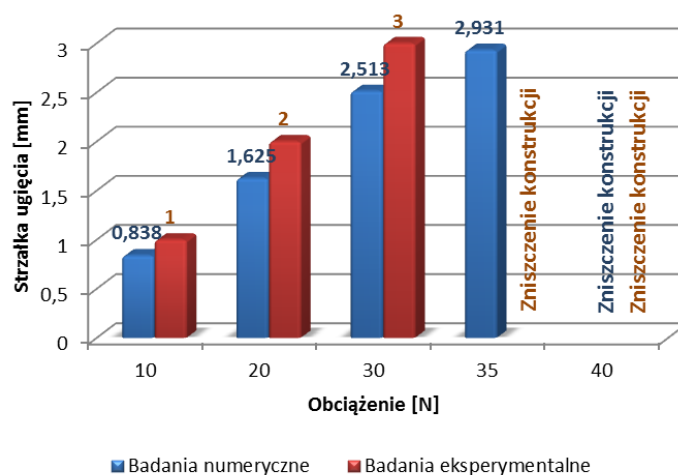
### Przebieg badań

Przygotowanie modelu rozpoczęto od docięcia elementów zgodnie z dokumentacją. W pierwszej kolejności została wykonana podstawa mostu – poprzez sklejenie belek wzdłużnych z poprzecznymi. Kolejnym etapem było doklejenie słupków i pasa górnego kratownicy. Następnie wklejono pręty skośne. Ostatnim etapem było sklejenie stężeń poprzecznych z górnymi belkami kratownic. Model polakierowano. Kolejne etapy budowy modelu, wraz z wynikami obliczeń numerycznych w zakresie maksymalnego obciążenia oraz stosunku obciążenia do ciężaru konstrukcji, przedstawiono w tabeli 1.

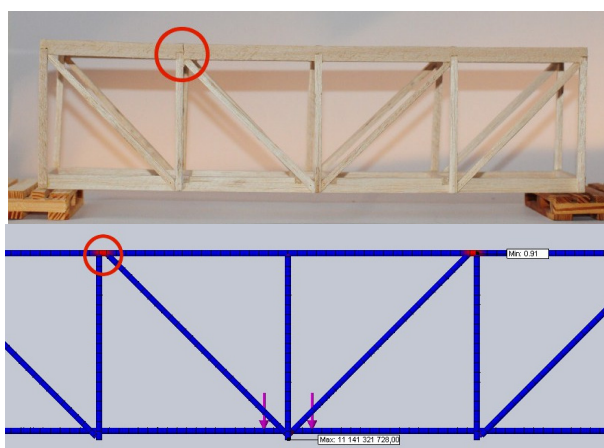
Do przeprowadzenia prób przygotowano podpory drewniane o grubości 20 mm, na których wsparto konstrukcję modelu. Następnie sukcesywnie zwiększono obciążenie modelu mostu do wartości 10 N, 20 N, 30 N i 35 N. Jednocześnie dokonywano pomiaru strzałki ugięcia konstrukcji. Przy obciążeniu wynoszącym 35 N, zniszczeniu uległa górna belka kratownicy bocznej. Najprawdopodobniej przyczyną pęknięcia była metoda budowy modelu. W belce górnej zastosowane zostało wycięcie, w którym został umieszczony słupek kratownicy. W tym miejscu wystąpiło tzw. zjawisko karbu, powodujące spiętrzenie naprężeń, prowadzące do zniszczenia konstrukcji. Równoległe prowadzono analizy numeryczne modelu wirtualnego dla zadanych obciążeń o wartościach 10 N, 20 N, 30 N, 35 N i 40 N. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i numerycznych przedstawiono na rys. 3, natomiast na rys. 4 zaprezentowano zniszczenia konstrukcji.

Tabela 1. Zależność obciążenia do ciężaru analizowanej konstrukcji

| Model   | Maksymalne obciążenie | Ciężar konstrukcji | Stosunek obciążenia do ciężaru konstrukcji |
|---|-----------------------|--------------------|--|
|    | 20 N                  | 0,04566 N          | 438,02                                     |
|   | 13,8 N                | 0,07418 N          | 186,03                                     |
|  | 22,2 N                | 0,08266 N          | 268,57                                     |
|  | 40 N                  | 0,09130 N          | 438,12                                     |
|  | 40 N                  | 0,09508 N          | 420,70                                     |



Rys. 3. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i numerycznych



Rys. 4. Zniszczenie konstrukcji: badania eksperymentalne u góry, badania numeryczne u dołu

## Wnioski

Tabela 1 obrazuje, w jaki sposób zmiany konstrukcyjne modelu wpływają na jego ciężar i wytrzymałość. Największy współczynnik stosunku obciążenia do ciężaru (438) uzyskujemy w fazie pierwszej konstrukcji, kiedy ciężar modelu jest najmniejszy i wynosi 0,04566 N. Równocześnie jego sztywność i zdolność przenoszenia obciążeń są najmniejsze – 20 N. Podobne parametry uzyskano w fazie czwartej, kiedy przy maksymalnym obciążeniu, 40 N, sztyw-

ność konstrukcji jest największa, a jej ciężar wynosi 0,0931 N. Zmiany wprowadzone w fazie piątej, polegające na dodaniu poprzecznych usztywnień, powodują zwiększenie sztywności mostu, nie wpływając w sposób znaczący na możliwość przenoszenia obciążeń.

Model podczas weryfikacji eksperymentalnej zachowywał się w sposób zbliżony do wyników symulacji. Uzyskane przemieszczenia tylko w nieznaczny sposób różnią się od zakładanych. Jest to spowodowane m.in. niedokładnością pomiarów, niedokładnościami wykonawczymi modelu, jak również nierównomiernie rozłożonym obciążeniem. Analizowany model mostu załamał się przy nieznacznie mniejszym niż modelowane obciążeniu, czego przyczyną była inna metoda łączenia elementów. W obu przypadkach zniszczeniu uległ jednak ten sam węzeł, co daje pełną zgodność jakościową wyników modelowania i wyników badań eksperymentalnych.

## Literatura

- [1] Brown D.J., *Mosty. Trzy tysiące lat zmagania z naturą*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2007.
- [2] Sosnowski M., Nowacka U., *Numerical modelling in safety engineering*, Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa, Wydawnictwo AJD, Częstochowa 2013.
- [3] Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A., Sosnowski M., *Numerical simulation of two-stage combustion in SI engine with prechamber*, Applied Mathematical Modelling, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.040>.
- [4] Sosnowski M., Gnatowska R., *Możliwości zastosowania badań modelowych w analizie dyspersji zanieczyszczeń ze źródeł niskiej emisji w strefie zabudowanej*, Edukacja Techniczna i Informatyczna, Wydawnictwo AJD, Częstochowa 2011.
- [5] Sosnowski M., Gnatowska R., *Zastosowanie symulacji numerycznych w zagadnieniach przepływu wiatru w obszarach zabudowanych*, Edukacja Techniczna i Informatyczna, Wydawnictwo AJD, Częstochowa 2010.