

Zagrożenie katastrofą budowlaną Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. Analizy i badania

KRZYSZTOF ŻÓLTOWSKI*, MIKOŁAJ BINCZYK, PRZEMYSŁAW KALITOWSKI
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

Streszczenie: Most Uniwersytecki został zamknięty po 7 latach od oddania do użytku. Powodem były błędy projektowe ujawnione w przeglądzie w roku 2020, potwierdzone teoretycznymi analizami nośności. Bezpośrednim powodem zamknięcia przeprawy było stwierdzenie zagrożenia katastrofą budowlaną. W roku 2021, zgodnie z zaleceniem i koncepcją ekspercką, krytyczne elementy konstrukcji mostu zostały wzmocnione. W styczniu 2022 most został przywrócony do ruchu. Pomimo szczęśliwego zakończenia procesu naprawy nie została zakończona dyskusja dotycząca podjętych działań. Pojawiły się opinie oraz opracowania kontestujące zamknięcie mostu dla ruchu i proponujące odmienny scenariusz działań. W referacie przedstawiono problematykę oceny nośności konstrukcji Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. Zamieszczono wnioski z wykonanych dotychczas prac. Dodatkowo przedstawiono nowe analizy dotyczące zagadnienia nośności przeciążonych węzłów stalowych konstrukcji zamocowań want w pomoście, dające szerszy obraz problematyki nośności i bezpieczeństwa konstrukcji.

Słowa kluczowe: most wantowy, konstrukcja stalowa, nośność, bezpieczeństwo, analizy MES, badania

1. Wstęp

Trasa Uniwersytecka to kluczowy element układu komunikacyjnego Bydgoszczy (rys. 1, 2). Przeprawa mostowa składa się z dwóch zasadniczych typów konstrukcji [1]. Estakady dojazdowe z dwóch stron rzeki zaprojektowano i wykonano jako żelbetowe, sprężone. Część nurtową stanowi most podwieszony o konstrukcji stalowej ze współpracującą płytą żelbetową. Konstrukcja podwieszona nad rzeką Brdą to spektakularna próba opracowania efektywnej formy estetycznej przy zachowaniu cech funkcjonalnych. Projektantem trasy jest Transprojekt Gdański, wykonawcą konsorcjum firm Mosty Łódź SA i Gotowski Sp. z o.o. Autorem projektu mostu jest mgr inż. Tadeusz Stefanowski. Budowę rozpoczęto w 2010 roku. Proces budowy był wspomagany przez zespół doradczy [2]. Most poddano procesowi próbnego obciążenia [3,4]. Trasę oddano do użytkowania 30.11.2013 roku. Projekt był realizowany w oparciu o normę PN-85/S10030 i inne normy odpowiadające. Schemat statyczny mostu to belka ciągła, podwieszona do pylonu, o rozpiętościach przęsł 110 + 90 m (rys. 2). Przekrój poprzeczny stanowi układ zespolony: żelbetowa płyta z betonu B60 oparta na ruszcie z belek stalowych. Przęsła i pylony zaprojektowano i wykonano ze stali S420M. Liny podwieszenia

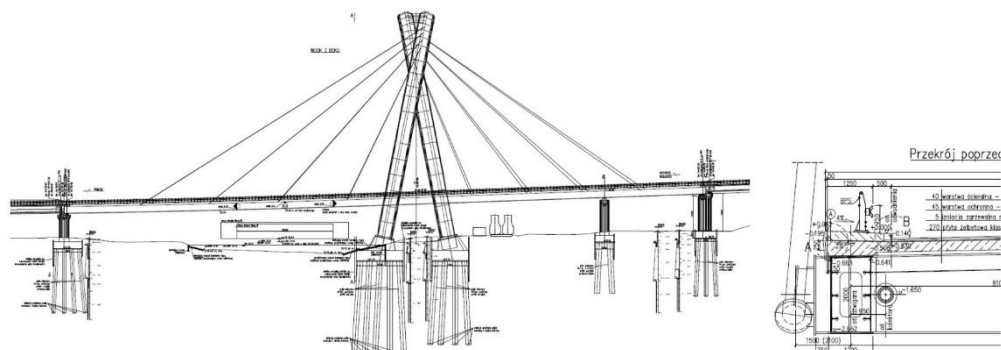
*Autor do korespondencji: k.zoltowski@pg.edu.pl

zaprojektowano o zróżnicowanym przekroju od 72 do 109 splotów 7-drutowych ze stali Y1860. Sploty umieszczono w osłonie z HDPE. Wanty zakotwiono z jednej strony w stalowych wspornikach wychodzących na zewnątrz z obrysu przęsła, a z drugiej strony w pylonie. Dostawcą i wykonawcą podwieszenia była firma BBR Polska.

Istotnym dla zrozumienia idei statycznej konstrukcji jest fakt braku podparcia konstrukcji przęseł w rejonie posadowienia pylonu. Konstrukcja pomostu jest podwieszona i pozbawiona podpór stałych niemal na całej długości. Montaż konstrukcji wykonano tradycyjnie, z wykorzystaniem podpór tymczasowych w nurcie [2]. Po wykonaniu podpór, przęsła i pylonu zamontowano oraz napięto układ want.



Rys. 1. Most Uniwersytecki w Bydgoszczy (źródło: Gotowski.pl).



Rys. 2. Most Uniwersytecki – część podwieszona, widok z boku i przekrój przez pomost [1].

2. Przegląd obiektu

W lipcu 2020 roku przeprowadzono na zlecenie ZDMiKP w Bydgoszczy pomiary sił w linach podwieszenia Mostu Uniwersyteckiego [4]. Badania przeprowadzono metodą wibracyjną. Dodatkową czynnością zleconą przez administratora mostu była ocena stanu technicznego lin i zakotwień podwieszenia. W czasie przeglądu zauważono duże deformacje blach konstrukcji zakotwień (rys. 3). Biorąc pod uwagę grubości wygiętych blach oraz

nietypową, niezgodną z zasadami kształtowania detali stalowych, konstrukcję zakotwień, sprawę potraktowano bardzo poważnie. Wykluczono możliwość powstania zauważonych deformacji na etapie wytwarzania konstrukcji węzłów i przyjęto, że deformacje powstały w wyniku działania obciążenia pochodzącego od wiatru. Wstępnie oszacowane wielkości deformacji wskazywały na znaczne uplastycznienie stali w zakotwieniach. Zauważono oznaki płynięcia plastycznego na powierzchniach w sąsiedztwie połączeń spawanych. Objawiały się one prążkową strukturą na powłokach malarskich (rys. 3).



Rys. 3. Przykłady zdeformowanych blach zakotwień wiatru i oznaki przeciążenia.

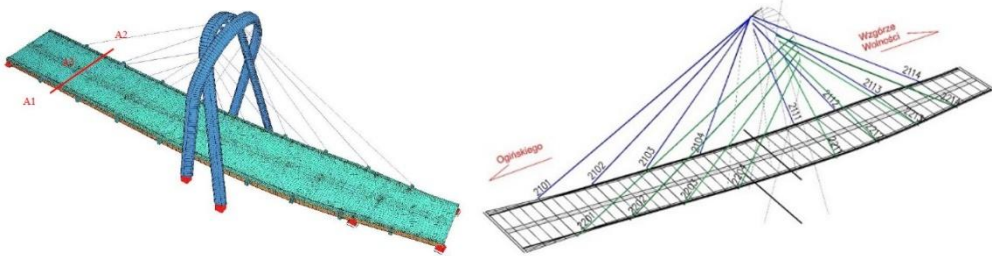
Na podstawie oględzin wstępnych sformułowano następujące wnioski:

- Konstrukcja zakotwień wiatru została zaprojektowana niezgodnie ze sztuką kształtowania konstrukcji stalowych.
- Zauważone deformacje blach mają charakter plastyczny i są naturalną konsekwencją przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego.
- Szczegółowe rozwiązania konstrukcyjne mają charakter karbów geometrycznych i wskazują na miejsca koncentracji naprężeń w obszarach połączeń spawanych.
- Całość wskazuje na przeciążenie i pracę w zakresie plastycznym.
- Najgorzej wyglądające zakotwienia znajdują się na sześciu najdłuższych wiatrach.

Zalecono ograniczenie ruchu na moście i przystąpiono do dalszych prac eksperckich mających na celu wyjaśnienie przyczyn zauważonych deformacji i określenie nośności konstrukcji. W ramach dalszych prac wykonano inwentaryzację geometrii blach zakotwień, wykonano obliczenia określające nośność zakotwień oraz dokonano szczegółowego przeglądu i badania spoin w konstrukcjach zakotwień.

3. Teoretyczna analiza nośności

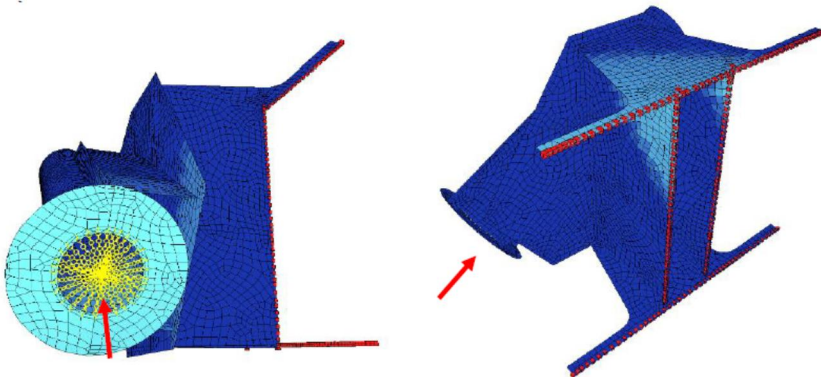
W ramach analiz teoretycznych [5, 6] wykonano globalny model MES konstrukcji mostu (rys. 4). Pylony, wanty oraz ruszt stalowy przęsła zamodelowano za pomocą elementów ścięgowych i belkowych. Płytę jezdni modelowano jako powłokę. Efekt zespolenia uzyskano przez opisanie elementów belkowych rusztu jezdni na wspólnych węzłach z powłoką jezdni. Celem było określenie normowych sił w linach podwieszenia potrzebnych do analizy nośności detali zakotwień. Model został zwalidowany dzięki wynikom próbnego obciążenia oraz wynikiem przeprowadzonych wcześniej pomiarów sił w linach.



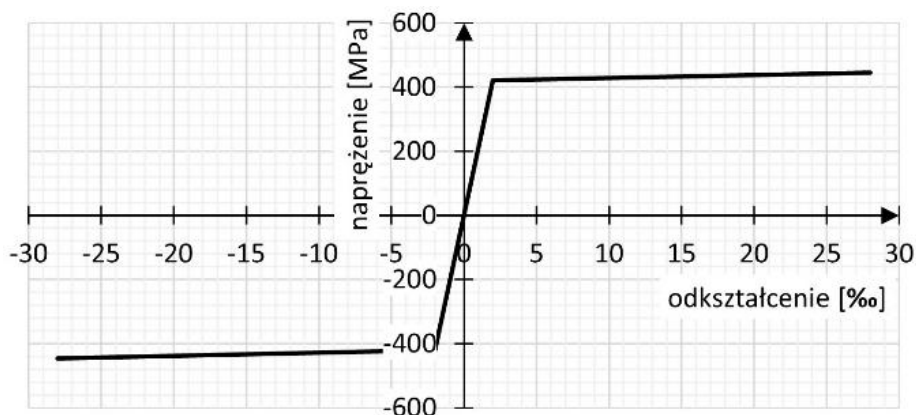
Rys. 4. Model MES konstrukcji podwieszanej w środowisku SOFiSTiK oraz schemat mostu z numeracją węzłów zakotwień.

Dodatkowo sprawdzono model pod próbnym obciążeniem uzyskując wysoką zgodność obliczonych i pomierzonych wyników [3]. Miarodajne dla weryfikacji było ustawienie obciążenia na największe przemieszczenia pionowe przęsła (schemat S1 wg [3]). Dla punktów pomiarowych A1, A2, A3 (rys. 4) uzyskano średnio 103.07% wyników pomierzonych.

Kolejnym krokiem było stworzenie modeli szczegółowych węzłów zakotwień. Modele te zostały wykonane w całości jako powłokowe, z wykorzystaniem elementu QUAD 4 w środowisku MES SOFiSTiK. Dzięki wspornikowej pracy analizowanego detalu zrezygnowano z modelowania stalowego dźwigara. Obciążenie przykładano do pierścienia oporowego za pomocą siły skupionej poprzez więzy kinematyczne. Przykładowy model szczegółowy pokazano na rys. 5. Podobne modele MES wykonano dla wszystkich szesnastu węzłów. W referacie przytoczono wyniki szczegółowe dla najbardziej wyjątkowego węzła nr 2201 (rys. 4). Przeprowadzone analizy były nieliniowe. Wykonano je z wykorzystaniem nieliniowego prawa materiałowego dla stali S420M zaimplementowanego w oprogramowaniu SOFiSTiK (rys. 6). Uwzględniono również wpływ przemieszczeń na siły wewnętrzne.



Rys. 5. Model MES zakotwienia z typowym układem warunków brzegowych i sposobem obciążania.



Rys. 6. Charakterystyka materiału wykorzystana w analizach określających nośność elementów.

- Obliczenia prowadzono dla trzech istotnych dla konstrukcji poziomów obciążenia:
- char. Cw – siła charakterystyczna w linii pod ciężarem własnym,
 - char. Max – maksymalna charakterystyczna siła w linii wg PN dla ciężaru własnego i klasy A obciążenia,
 - obl. Max – maksymalna obliczeniowa siła w linii wg PN dla ciężaru własnego i klasy A obciążenia.

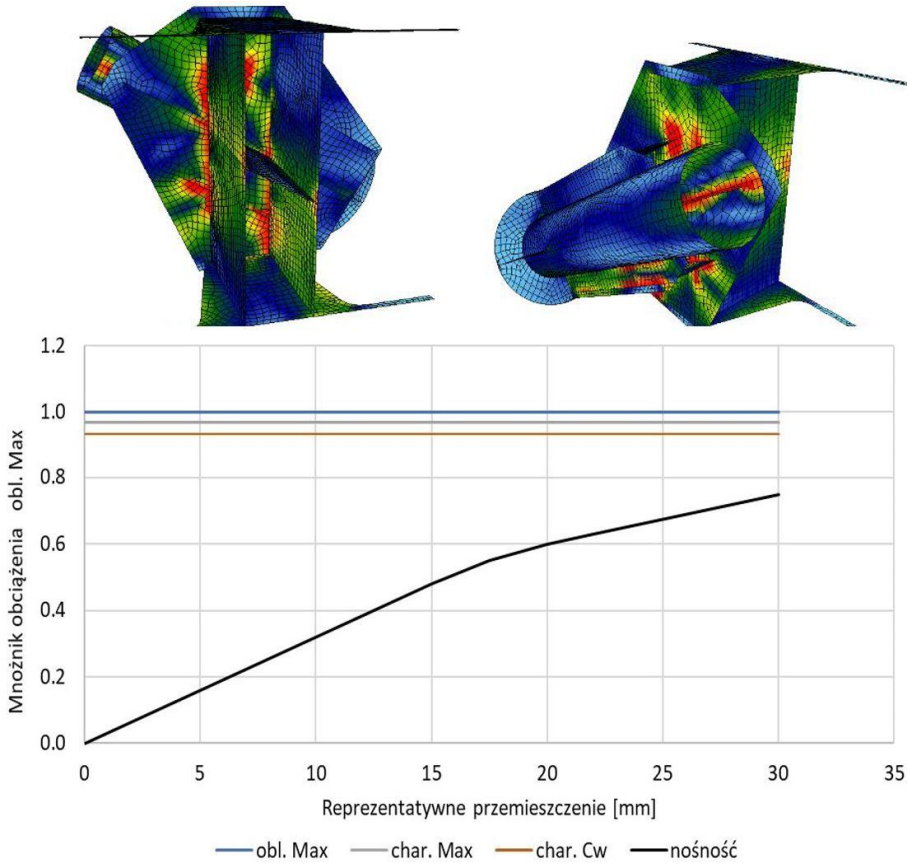
Poniżej przedstawiono wyniki analizy dla węzła nr 2201 (rys. 4). Węzeł ten okazał się być najbardziej obciążonym elementem w moście.

Tablica 1. Charakterystyczne wartości siły w wancie nr 2201

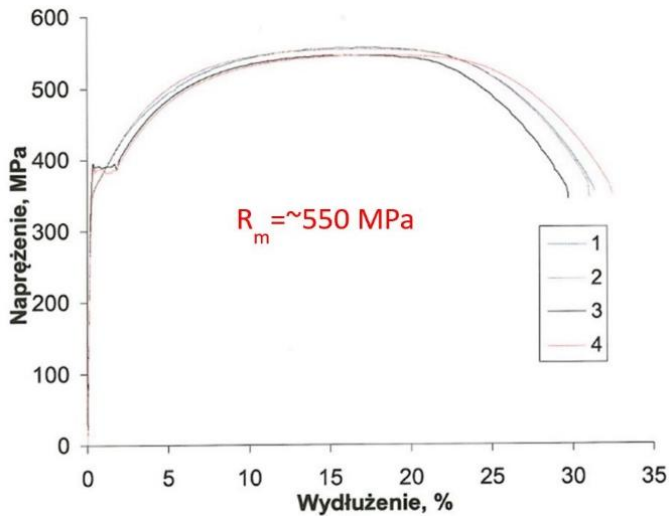
Nr wandy	char. Cw [kN]	char. Max [kN]	obl. Max [kN]
2201	10440	10874	11208

Na rysunku nr 7 pokazano wynik określony w [5]. Przedstawiono poglądowo strefy pełnego uplastycznienia (kolor czerwony) i wyniki analizy nośności przy ograniczeniu odkształceń do ~5% i wykorzystaniu uproszczonego prawa materiałowego (rys. 6). Na wszystkich wykresach przedstawiających wyniki analiz nieliniowych, mnożnik obciążenia na osi rzędnych o wartości 1 odpowiada wartości obl. Max.

Wyniki analiz potwierdziły przewidywany wstępnie stan zagrożenia [5]. Węzły nr 2101, 2201, 2113 i 2213 wykazały brak nośności pod ciężarem własnym – char. Cw. Pozostałe węzły osiągnęły zróżnicowany stopień nośności. Część osiągnęła lub przekroczyła wymaganą normą nośność obliczeniową – obl. Max (węzły 2102, 2103, 2104, 2111, 2112, 2202, 2203, 2204, 2211, 2212). Natomiast węzły 2114 i 2214 wykazały nośność w zakresie char. Cw, ale nie osiągnęły nośności w zakresie obl. Max. Brak nośności w zakresie char. Cw określony dla kluczowych węzłów wskazywał na wysokie ryzyko katastrofy budowlanej, do której jeszcze nie doszło. Gdzie zatem znajdują się rezerwy, których nie uwzględniono w analizie? Odpowiedź jest jak zwykle złożona, ale można wprost wskazać dwa istotne dla oceny czynniki. Obliczenia były prowadzone z ograniczeniem wartości odkształceń zgodnie z zaleceniami Eurokodu. Procedura zaimplementowana w środowisku MES SOFiSTiK automatycznie przerywa analizę przy przekroczeniu wartości maksymalnych odkształceń ponad 5%. Pewne rezerwy nośności można też znaleźć w zastosowanym prawie materiałowym. Późniejsze badania [7] wskazały na większą niż zakładano nośność stali S420M w strefie wzmocnienia (rys. 8).



Rys. 7. Wizualizacja węzła nr 2201 z pokazaniem w kolorze czerwonym stref plastycznych. Wykres siła–przemieszczenie (mnożnik dla obliczeniowej siły max w linii dla Cw+kl A).



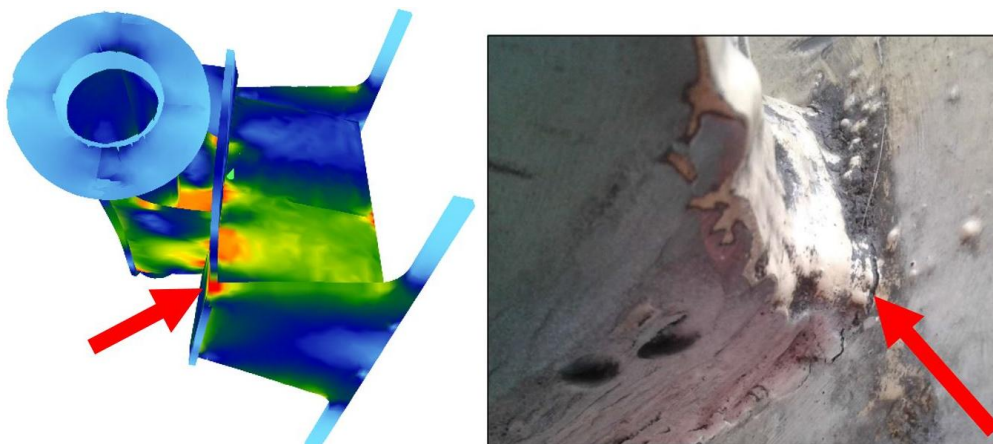
Rys. 8. Wynik próby rozciągania 4 próbek stali S420M pobranych z mostu [7]

4. Badania diagnostyczne konstrukcji zakotwień

Równoległe do prowadzonych analiz teoretycznych wykonano szereg oględzin i badań konstrukcji mostu:

- Wykonano skaning laserowy konstrukcji ze szczególną uwagą zwróconą na zakotwienia want.
- Wykonano pomiary geodezyjne niwelety mostu.
- Przeprowadzono przegląd wizualny konstrukcji stalowej przęsła i pylonów.
- Wykonano badania diagnostyczne spoin kluczowych połączeń w węzłach zakotwień lin.

Oględziny konstrukcji nie wykazały oznak degradacji lub przeciążeń. Oznacza to, że poza zakotwieniami lin konstrukcja pracuje prawidłowo. Badania diagnostyczne spoin [8] uwiarydliły pęknięcia (naderwania) w węzłach nr 2213 i 2214, w strefach największych odkształceń (rys. 9). Inne wady w węzłach 2201 i 2113 uznano za mniej istotne. W węzłach 2213 i 2214 są ewidentne przekroczenia dopuszczalnych naprężeń i dodatkowo występuje znacząco większy wpływ obciążeń ruchomych niż w węzle nr 2201. Poza tym widać gołym okiem karb strukturalny będący skutkiem działań projektowych. Tak więc, poza ewidentnym spiętrzeniem naprężeń mogły się tam również ujawnić destrukcyjne efekty zmęczeniowe. Na rysunku nr 9 pokazano przykładowe pęknięcie i jego usytuowanie na modelu MES. Czerwonym kolorem oznaczono miejsca występowania największych odkształceń plastycznych.

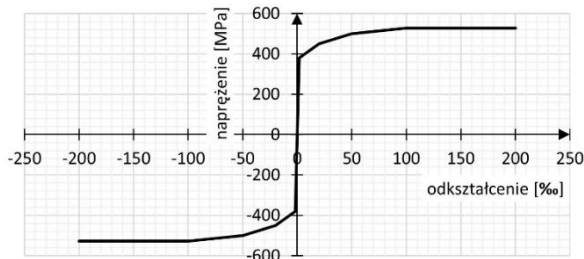


Rys. 9. Węzeł 2113. Zidentyfikowane pęknięcie i lokalizacja w węźle [8].

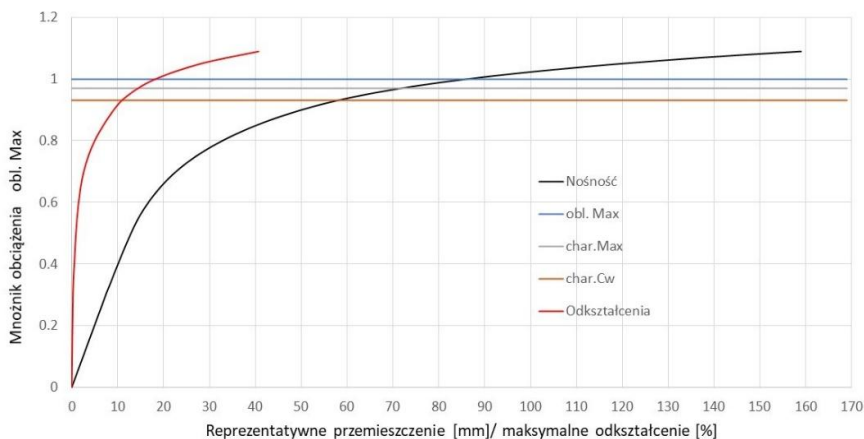
Posiłkując się pracą [5], wynikami badań [8] oraz przemyśleniami własnymi, Zarząd Dróg Miejskich i Komunikacji Publicznej w Bydgoszczy podjął decyzję o zamknięciu Mostu Uniwersyteckiego i przystąpieniu do procedury naprawczej. Decyzja ta spowodowała spodziewane wrzenie w mieście, ale również odbiła się silnym echem poza Bydgoszczą. Kluczowe w dyskusji nad decyzją było krytyczne stanowisko zespołu pracującego na zlecenie projektanta mostu [9,10]. Zespół przeprowadził złożone analizy MES w oparciu o rzeczywisty model materiału (rys. 8) i uzyskał zwiększenie nośności krytycznych węzłów w zakresie odkształceń powyżej 10%. Na podstawie uzyskanych rezerw nośności (wykazano ~10% odkształceń pod rzeczywistym ciężarem własnym) zespół zarekomendował przywrócenie ograniczonego ruchu na moście.

5. Węzeł 2201. Rozszerzona analiza nośności

Inspirując się opracowaniem [9] w celu poszukiwania rezerw nośności powtórzono analizę węzła 2201 przy alternatywnych założeniach [6]. Wyłączono ograniczenie dla wartości odkształceń i zastosowano prawo materiałowe odpowiadające w przybliżeniu próbie rozciągania dla stali S420M pobranej z konstrukcji mostu (rys. 10). Wynik analizy przedstawiono za pomocą wykresu „ścieżki równowagi” analogicznie do wcześniejszych podsumowań (rys. 11). Przedstawia ona zależność pomiędzy przemieszczeniami wybranego węzła pierścienia oporowego w kierunku poziomym, prostopadłym do osi wandy (kolor czarny).



Rys. 10. Prawo materiałowe wykorzystane w analizie dodatkowej węzła nr 2201



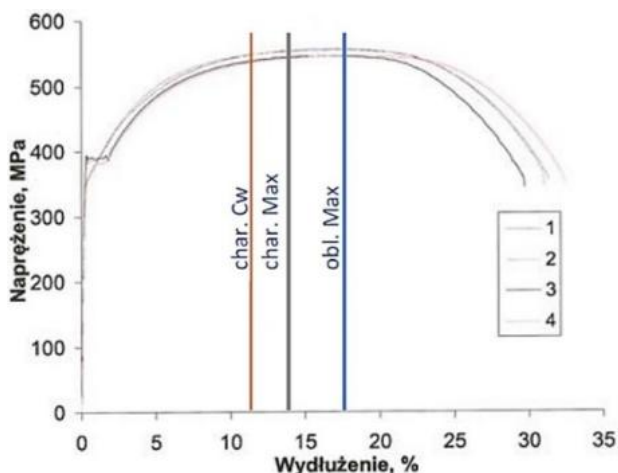
Rys. 11. Wynik analizy przy alternatywnych założeniach wstępnych dla węzła nr 2201 [6].

Na rysunku 11 dodano do klasycznego przebiegu ścieżki równowagi wykres zmienności maksymalnych odkształceń w analizowanym węźle (kolor czerwony) w funkcji obciążenia. Podano również (zaznaczone poziomo) trzy wcześniej ustalone wielkości charakterystyczne dla konstrukcji (tab. 1). Mnożnikowi „1” odpowiada maksymalne obciążenie obliczeniowe w wancie. Wykresy na rysunku 11 pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Stan pod obciążeniem charakterystycznym ciężarem własnym (char. Cw) skutkuje pełnym uplastycznieniem elementów węzła i odkształceniami o wartościach maksymalnych ~10–11%.
- Stan pod obciążeniem charakterystycznym ciężarem własnym i ruchomym (char. Max.) skutkuje pełnym uplastycznieniem elementów węzła i odkształceniami o wartościach maksymalnych ~13–14%.
- Stan pod obciążeniem obliczeniowym ciężarem własnym i ruchomym (obl. Max) skutkuje pełnym uplastycznieniem elementów węzła i odkształceniami o wartościach maksymalnych ~17–18%.

– Przy maksymalnym odkształceniu o wartości zalecanej przez PN-EN, wynoszącym 5%, osiągnięto mnożnik obciążenia wynoszący $\sim 0,8$.

Otrzymane wyniki są niemal identyczne z rezultatami przedstawionymi w analizie wykonanej przez zespół projektanta [9]. Należy przy tym podkreślić, że poziom wiarygodności modelu MES w tym przypadku powinien zostać znacznie ograniczony z uwagi na duże wartości ekstremalnych odkształceń. Z technicznego punktu widzenia przedstawiona analiza nie powinna być brana pod uwagę przy ocenie bezpieczeństwa konstrukcji. Niemniej jednak wynik obrazuje sytuację, w której znalazła się konstrukcja zakotwień. Na wykresie próby jednoosiowego rozciągania (rys. 12) oznaczono otrzymane progowe wartości odkształceń stali węzła 2201 w celu zobrazowania stanu wyężenia węzła.



Rys. 12. Stan maksymalnych odkształceń materiału węzła 2201 naniesiony na wynik testu jednoosiowego rozciągania [6].

Wszystkie przedstawione wyniki analiz wskazują na nieakceptowalny stan odkształceń materiału kluczowych elementów konstrukcji nawet pod ciężarem własnym. Jednak autorzy opracowania [9],[10] argumentują swoje wnioski o niezamykaniu mostu faktem przeprowadzenia pozytywnej próby obciążeniowej [3] twierdząc, że występujące podczas prób obciążenia nie mają szansy się powtórzyć w praktyce.

Aby krytycznie odnieść się do tej tezy zestawiono wyniki obliczenia sił wewnętrznych w linach pod próbnym obciążeniem i porównano je do sił pod ciężarem własnym. Wyniki pokazano w tab. 2.

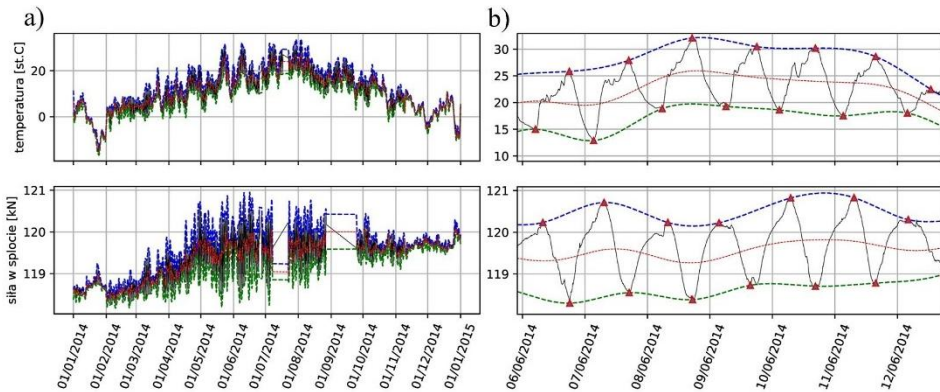
Tablica 2. Wpływ obciążenia próbnego na charakterystyczne wartości siły w wybranych wantach

nr liny	char. Cw [kN]	próbne [kN]	przyrost [%]
2101	9883	271	2,74
2201	10440	273	2,61
2113	9895	585	5,91
2213	9924	578	5,82
2114	7570	651	8,60
2214	8158	719	8,81

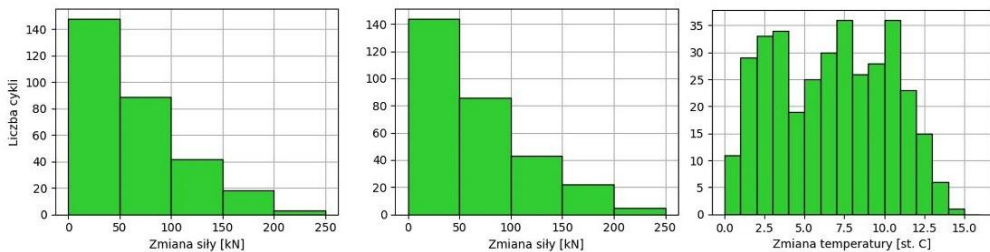
Niewielki przyrost siły pod próbnym obciążeniem w najbardziej odkształconych węzłach nr 2101 i 2201 można tłumaczyć małym kątem wpięcia want w pomost. Wynika on z małego wpływu ugięcia pomostu na wydłużenie tych want.

6. Węzeł 2201. Analiza danych pozyskanych z monitoringu mostu

Most Uniwersytecki był wyposażony w system monitoringu. W ramach ciągłych pomiarów rejestrowano między innymi siły w linach nr 2101, 2201, 2114 i 2214 i temperaturę otoczenia w interwale co 10 minut. Niestety monitoring uległ awarii i wyniki są niekompletne. Niemniej jednak na podstawie zarejestrowanych danych można po ich przetworzeniu wyciągnąć istotne dla problematyki wnioski. Poniżej przedstawiono surowe i przetworzone wyniki pomiaru temperatury i zmiany siły w jednym splocie wanty nr 2101. Z uwagi na położenie wanty nr 2101 można zarejestrowane wyniki uznać za reprezentatywne również dla wanty nr 2201. Na rysunku 13 (a) przedstawiono wynik pomiarów temperatury powietrza i siły w splocie wanty w roku 2014 otrzymane wprost z monitoringu Mostu Uniwersyteckiego. Czujnik temperatury znajdował się w zacienionym miejscu na obiekcie. Czujnik siły zamontowany był na wancie 2101. Widoczne na wykresach braki w zarejestrowanych danych wynikały z awarii systemu rejestracji danych. W części (b) rysunku 13s przedstawiono wynik dla kilku dni czerwca 2014 roku. Czerwonymi trójkątami zaznaczono na nim wyznaczone ekstrema lokalne temperatury i siły. Wyraźnie można dostrzec zmienność obu mierzonych wartości w cyklu dobowym. W celu łatwiejszej interpretacji zmian dziennego usunięto nieliniowy trend o zmienności dłuższej niż 1 dzień i powtórzono poszukiwanie wartości ekstremalnych w przedziałach dobowych. Na rysunku 14 pokazano histogramy cykli dobowych zmian sił w wancach 2101 i 2201 oraz temperatury powietrza.



Rys. 13. Wykresy zmienności temperatury otoczenia i siły w linii 2201 – dane z monitoringu mostu.

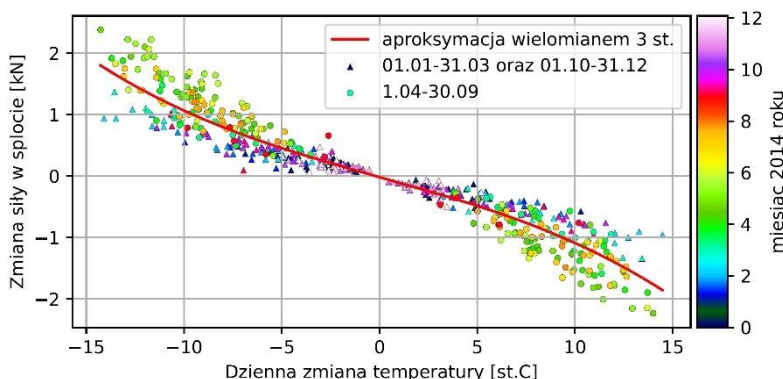


Rys. 14. Histogramy cyklicznych zmian (od lewej) sił w wancie 2101, 2201 i temperatury w 2014 r.

Na wykresie (rys. 15) przedstawiono zależność zmiany siły w splocie od zmiany zarejestrowanej temperatury z uwzględnieniem pór roku. W odróżnieniu od wyników pokazanych na rys. 14 wyszczególniono osobno dobowe przyrosty i spadki siły w splocie. Odróżniono te, które wystąpiły w okresie jesienno-zimowym (październik-marzec, oznaczono

trójkątami) oraz wiosenno-letnim (kwiecień-wrzesień, oznaczono kołami). Dodatkowo wynikiom przyporządkowano kolor związany z miesiącem roku, w którym został zidentyfikowany. Punkty poddano aproksymacji wielomianem trzeciego stopnia co zaznaczono czerwoną linią. Wynik przedstawiony na rys. 15 pokazuje dwie, istotne prawidłowości:

- wielkości amplitud zmian siły zależą od pory roku, są jednoznacznie większe i bardziej zróżnicowane w okresie wiosenno-letnim,
- wyniki amplitud przyrostów i spadków siły rozkładają się w układ symetryczny. Świadczy to o występowaniu niemal regularnych cykli dobowych obciążenia i odciążenia wanty.



Rys. 15. Histogramy cyklicznych zmian siły w jednym splocie w funkcji temperatury i pory roku.

Elementem uzupełniającym w interpretacji przedstawionych wyników może być uproszczona analiza statyczna wpływu temperatury na siły w linach. W Tablicy 3 zestawiono wyniki dla krytycznych want przy oziębieniu całej struktury mostu o 10°C oraz przy oziębieniu tylko układu want o 10°C.

Tablica 3. Wpływ zmian temperatur na siły w linach

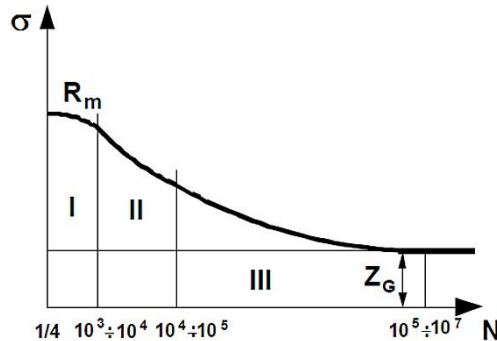
Opis wanty		Cała struktura, dT= -10°C		Tylko liny, dT= -10°C	
nr liny	char. Cw [kN]	zmiana siły [kN]	przyrost [%]	zmiana siły [kN]	przyrost [%]
2101	9883	3,74	0,04	241,8	2,45
2201	10440	4,46	0,04	255,0	2,44
2113	9895	71,3	0,72	165,8	1,68
2213	9924	76,0	0,77	166,4	1,68
2114	7570	64,2	0,85	185,8	2,45
2214	8158	61,0	0,75	211,0	2,59

Przedstawione powyżej wyniki dotyczą roku 2014, w którym system monitoringu zanotował dane dotyczące sił w splocie wanty 2101 i temperatury. Kolejna lata to tylko niepełne wyniki pomiaru temperatury. Analiza tych wyników pozwala zidentyfikować maksymalną zmianę dobową temperatury w latach 2019 i 2020. Zakładając, że istnieje korelacja pomiędzy dobową zmianą temperatur i zmianą sił w linach można przewidzieć maksymalny przyrost dobowy sił w wantach nr 2101 i 2201 (Tablica 4).

Tablica 4. Przewidywane maksymalne amplitudy sił w linie 2201

Rok	max dT [°C]	max dF [kN]	zmiana względem char. Cw [%]	źródło
2014	15,50	255,00	2,44	odczytany
2019	18,50	304,35	2,92	korelacja
2020	17,80	292,84	2,80	korelacja

Przedstawione wyniki pomiarów i analizy rzucają nowe światło na problem bezpieczeństwa konstrukcji Mostu Uniwersyteckiego. Pojawia się bowiem oprócz problematyki nośności doraźnej zagadnienia niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej węzłów. Elementem utrudniającym teoretyczną ocenę nośności zmęczeniowej jest fakt wstępowania regularnych amplitud sił w wantach oddziaływujących na materiał uplastyczniony z odkształceniem na poziomie 10%. Kompendium zagadnienia zwięźle przedstawiono w [11, 12]. Wstępna ocena problemu może być wykonana w oparciu o wykres Wöhlera (rys. 16).



Rys. 16. Pełny wykres Wöhlera w układzie współrzędnych naprężenie nominalne – liczba cykli [11].

Na rysunku 16 zaznaczono obszary o następującej charakterystyce:

- Obszar I (wytrzymałość quasistatyczna) – od 0 do około $10^3 - 10^4$ cykli, w którym pęknięcie zmęczeniowe materiału ma charakter pęknięcia plastycznego,
- Obszar II (wytrzymałość niskocyklowa lub niskocyklowe zmęczenie) 10^4 do około 10^5 cykli, w którym zmęczenie zachodzi przy dużych nieprężeniach i relatywnie dużych odkształceniach plastycznych,
- Obszar III (wytrzymałość wysokocyklowa lub wysokocyklowe zmęczenie) – od 10^5 do 10^7 cykli, w którym pęknięcie materiału zachodzi przy odkształceniach sprężystych porównywalnych z wielkością odkształcenia plastycznego, a nawet je przewyższającymi.
- Nie prowadząc złożonych analiz można na podstawie rys. 16 oszacować wytrzymałość zmęczeniową materiału węzłów mostu jako efekt quasistatyczny osiągający zniszczenie w zakresie od 0 do 10000 cykli.

7. Podsumowanie badań i analiz

Przedstawione wyniki pomiarów i analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Stan uplastycznienia materiału krytycznych węzłów zamocowań want przy osiągnięciu odkształceń na poziomie 10% był niedopuszczalny z punktu widzenia powszechnej wiedzy inżynierskiej, dobrej praktyki, norm i ogólnych wymagań dotyczących poziomu niezawodności konstrukcji.
- Rezerwy nośności wykazane w opracowaniu [9] i obliczeniach własnych, potwierdzone częściowo przez próbne obciążenie, nie mogą być potraktowane jako dowód wystarczający do podjęcia decyzji o dalszym użytkowaniu mostu.
- Próbné obciążenie skutkowało wzrostem siły w krytycznym węźle o 2.61%, było testem wytrzymałości doraźnej i w żadnym stopniu nie gwarantowało bezpieczeństwa konstrukcji w okresie późniejszym. Wykazane w pracy cykliczne obciążenia dobowe, niekiedy zbliżone

do efektu obciążenia próbnego, teoretycznie nieuchronnie prowadziły do zawalenia się konstrukcji w czasie eksploatacji. Dzisiaj na podstawie wiedzy ogólnej, zliczając cykle dobowe, można ten czas oszacować na okres od 0 do 30 lat. Bardziej precyzyjne określenie czasu do katastrofy jest wyzwaniem teoretycznym, na które autorzy spróbują odpowiedzieć w najbliższej przyszłości.

Podsumowując dyskusję dotyczącą bezpieczeństwa konstrukcji należy przypomnieć, że most to nie artykuł naukowy. To obiekt budowlany, który musi podlegać procesowi certyfikacji. Podstawą tego procesu jest analiza niezawodności, która w ukrytej formie znajduje się w normowych procedurach inżynierskich. Nie jest sztuką stwierdzenie katastrofy post factum. Prawdziwym wyzwaniem jest prawidłowa ocena zagrożeń i potencjalnych następstw w celu uniknięcia najgorszego. W takim przypadku ekspert podejmujący trudne decyzje powinien się kierować przede wszystkim poczuciem odpowiedzialności za życie i mienie wielkiej wartości.

Celem prac eksperckich nie może być odpowiedź na pytanie czy most się zawali. To nie jest loteria. Należy odpowiedzieć na pytanie czy poziom ryzyka związany z dalszą eksploatacją jest akceptowalny.

W przypadku Mostu Uniwersyteckiego decyzja o zamknięciu obiektu została podjęta na podstawie teoretycznie zaawansowanych, ale inżynierskich analiz problemu. Dalsze prace o charakterze naukowym przedstawione w [6,9,10] i w niniejszym referacie, pomimo rażących różnic interpretacyjnych, zdaniem autorów potwierdzają słuszność podjętych decyzji.

Decyzja o wyłączeniu tak ważnego dla społeczeństwa obiektu nigdy nie jest wydarzeniem popularnym. W tym przypadku zamknięcie mostu wywołało niespodziewaną reakcję mającą na celu podważenie podjętej decyzji i kompetencji eksperta. Ostatecznie wszystko potoczyło się zgodnie z przyjętym scenariuszem. Most został wyłączony z ruchu, zabezpieczony i poddany naprawie zgodnie z koncepcją ekspercką [13,14].

Przypadek Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy to kolejna lekcja, z której powinno się wyciągnąć wnioski dotyczące wielowątkowej problematyki:

- niezależnej kontroli prac projektowych,
- podstaw teoretycznych i formalnych oceny bezpieczeństwa konstrukcji,
- pozycji i kompetencji eksperta, szczególnie w procesie podejmowania spektakularnych decyzji.

Most Uniwersytecki w Bydgoszczy po rocznej przerwie, w czasie której dokonano wzmocnienia węzłów zamocowania want [14], po pozytywnie przeprowadzonych badaniach odbiorowych, w dniu 26.01.2022 został przywrócony do eksploatacji. Materiały źródłowe dotyczące całego procesu naprawy są dostępne na portalu ZDMiKP Bydgoszcz [15].

Literatura

1. Projekt Wykonawczy – Budowa ul. Ogińskiego w Bydgoszczy na odcinku od ul. Powstańców Wielkopolskich do ul. Wojska Polskiego wraz z obiektami inżynierskimi i dojazdami – Most Nurtowy Podwieszony M-2 – Transprojekt Gdański Sp. z o. o.
2. Sokołowski W., Sochacki J., Gotowski M., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., & Wilde, K.: Montaż Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy. *Mosty*, 5, 43–47, 2015
3. Most Uniwersytecki przez Brdę w Bydgoszczy. Sprawozdanie końcowe z próbnego obciążenia statycznego oraz dynamicznego obiektu. *Aspekt Sp. z o.o.* Grudzień 2013.
4. Żółtowski K., Binczyk M., Kalitowski P.: Pomiary naciągu want Mostu Uniwersyteckiego (most podwieszony M2) wraz z oceną techniczną. *Ekspertyza. Kormost*. 2020.
5. Żółtowski K., Pełka D., Nowak A.: Raport techniczny z analizy nośności węzłów zakotwień w pomoście mostu przez rzekę Brdę w ciągu Trasy Uniwersyteckiej w Bydgoszczy. *KBP Żółtowski*.

6. Żółtowski K., Binczyk M., Kalitowski P.: Most Uniwersytecki w Bydgoszczy. Teoretyczne podstawy decyzji o wyłączeniu obiektu z ruchu. Wrocławskie Dni Mostowe. Wrocław, 2021
7. Sprawozdanie z badań nr 01/2021. Badanie wytrzymałościowe próbek pobranych z konstrukcji stalowej. Laboratorium Badań Materiałowych i Konstrukcji. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy. Bydgoszcz, 2021.
8. Raport ze stwierdzonych niezgodności podczas przeprowadzonych badaniach zakotwień want. KORMOST. 2020.
9. Wilde K., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Sobczyk B.: Ekspertyza Techniczna: Wykonanie koreferatu do raportów dotyczących Mostu Uniwersyteckiego w Bydgoszczy wykonanych przez Konsultacyjne Biuro Projektowe Krzysztof Żółtowski.
10. Wilde K., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Sobczyk B.: Most Uniwersytecki w Bydgoszczy – zaawansowane studium stref zakotwienia systemu podwieszenia w pomoście. Wrocławskie Dni Mostowe. Wrocław, 2021.
11. Kowalewski Z., L.: Zmęczenie materiałów – Podstawy, Kierunki badań, Ocena stanu uszkodzenia. Siedemnaste Seminarium, Nieniszczące Badania Materiałów. Zakopane, 8–11 marca 2011
12. Dietrich M.: Podstawy konstrukcji Maszyn, Tom 2, WNT, Warszawa, 1995
13. Żółtowski K.: Projekt koncepcyjny wzmocnienia węzłów zakotwień w pomoście mostu przez rzekę Brdę w ciągu Trasy Uniwersyteckiej w Bydgoszczy. KBP Żółtowski. 2021.
14. Biliszczyk J., Kożuch M., Lorenc W., Onysyk J., Skrętkowicz Ł., Sułkowski M., Teichgraeber M.: Projekt wzmocnienia węzłów zakotwienia want w moście Uniwersyteckim w Bydgoszczy. Wrocławskie Dni Mostowe. Wrocław 2021.
15. Materiały źródłowe dotyczące problematyki wyłączenia mostu z eksploatacji. <http://www.zdmikp.bydgoszcz.pl/pl/component/search/?searchword=raport%20most&ordering=newest&searchphrase=all&limit=50>.

The threat of a construction disaster of the University Bridge in Bydgoszcz. Analyses and research

Key words: cable-stayed bridge, steel structure, load-bearing capacity, safety, FEM analysis, tests