



## **Eksperymentalno-numeryczne badania modernizowanego mostu towarzyszącego BLG-67M**

MARIAN DACKO, WIESŁAW KRASOŃ, ŁUKASZ FILIKS

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,  
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Przedmiotem badań przedstawionych w pracy jest modernizowany most towarzyszący. Most taki charakteryzuje się wysoką mobilnością i modułową budową. Pojedynczy moduł-przęsło składa się z dwóch dźwigarów — kolein z jezdniami i konstrukcjami wsporczymi połączonych złączami sworzniowymi. Przęsło mostu jest rozkładane automatycznie za pomocą mechanicznego układacza transportowanego razem z mostem na podwoziu gąsienicowym. Omówiono wybrane problemy badań eksperymentalnych pojedynczego przęsła mostu nożycowego BLG (oznaczenie producenta). Podczas testu na stanowisku zarejestrowano przemieszczenia i odkształcenia w wybranych przekrojach konstrukcji odpowiadające różnym wariantom obciążeń. Próby obciążeniowe zrealizowano na zmodernizowanym moście BLG. Ich wyniki umożliwiły zweryfikowanie poprawności modeli numerycznych MES, które będą zastosowane do oceny rozkładów naprężeń w analizowanej konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** modernizowany most towarzyszący, badania eksperymentalne, analizy numeryczne MES

### **1. Wstęp**

Mosty BLG-67M o nożycowym systemie rozkładania to wysoko mobilne konstrukcje modułowe. Transportowane są na podwoziu samobieźnym i rozkładane automatycznie ponad przeszkodą w bardzo krótkim czasie. Do budowy takich konstrukcji można zastosować przęsła mostu BLG produkowanego w kraju. Jeden moduł-przęsło takiego mostu składa się z dwóch członów (gotowych jezdni wraz z konstrukcją nośną) połączonych złączami sworzniowymi. Przęsło rozkładane jest automatycznie za pomocą mechanicznego układacza, transportowanego wraz

z członami mostu na podwoziu samobieżnym. Na rysunku 1 przedstawiono widok mostu BLG-67M na podwoziu czołgu T-55 [1].



Rys. 1. Widok ogólny przęsła mostu BLG-67M na podwoziu gąsienicowym

Długość mostu nożycowego BLG-67M wynosi 20 m, a jego nośność 50 ton. Pojedyncze moduły–przęsła mogą być łączone w mosty dwu- lub trójprzęsłowe, w tym także w zestawy z zastosowaniem dodatkowych podpór pośrednich. Podpory te mogą być stałe, regulowane, a także pływające.

W związku z modernizacją mostu BLG-67M (poszerzenie pasa jezdni) powstała potrzeba przeprowadzenia podstawowych analiz inżynierskich w celu zweryfikowania poprawności konstrukcji. Ze względu na fakt, że konstrukcja mostu BLG to typowa konstrukcja cienkościenna o złożonej budowie struktury wewnętrznej, do analiz wykorzystano nowoczesne systemy inżynierskie CAD/CAE.

W pierwszym etapie prac na bazie szczątkowej dokumentacji oraz pomiarów wykonanych na rzeczywistym obiekcie zbudowano model geometryczny [4], na podstawie którego sporządzono pełną dokumentację płaską badanej konstrukcji.

Na bazie dokumentacji konstrukcyjnej mostu BLG, odtworzonej elektronicznie, i opracowanego następnie modelu geometrycznego, wykonano sztywny model numeryczny, który posłużył do oceny poprawności działania konstrukcji podczas procesu rozkładania oraz wyznaczenia sił i reakcji w podporach oraz złączach konstrukcji [5].

W kolejnych etapach prac wykonano odkształcalny model numeryczny MES, który będzie wykorzystany do oceny przemieszczeń oraz rozkładu naprężeń w konstrukcji [6]. Aby model numeryczny był wiarygodnym źródłem informacji, należy zbadać jego poprawność poprzez weryfikację wyników otrzymanych z analiz numerycznych z rezultatami uzyskanymi z eksperymentu na rzeczywistym obiekcie. W tym celu wykonano próby poligonowe na rzeczywistym obiekcie. W pracy omówiono metodykę wykonania badań stanowiskowych z zastosowaniem rzeczywistego obiektu z rozszerzonymi pasami jezdny, zaprezentowano wybrane wyniki tych

badania oraz zweryfikowano poprawność modelu numerycznego poprzez porównanie strzałek ugięcia dla dwóch wariantów obciążenia badanego przęsła.

## 2. Opis prac przygotowawczych do badań poligonowych mostu BLG

Badania poligonowe z zastosowaniem rzeczywistej konstrukcji mostu nożycowego BLG z poszerzonymi koleinami przęsła przeprowadzono w Wojskowych Zakładach Inżynieryjnych w Dęblinie. Wykorzystano w tym celu w pełni sprawny egzemplarz mostu BLG po zakończeniu remontu kapitalnego w zakładach WZInż. Dęblin (rys. 2).



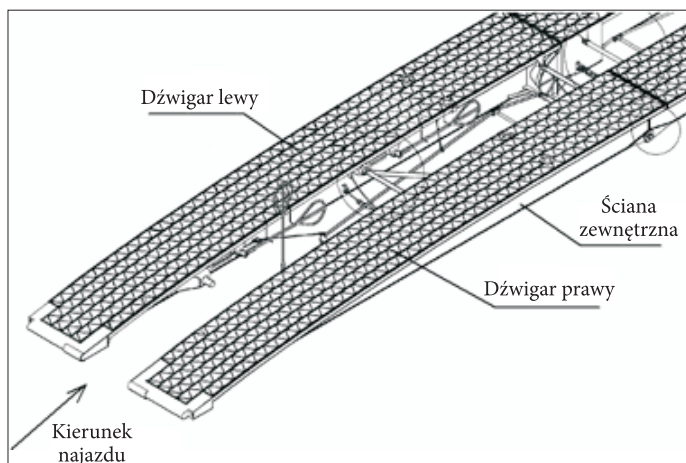
Rys. 2. Widok badanego mostu BLG podczas rozkładania na stanowisku badawczym

Most taki rozłożono do pozycji przeprowowej na stanowisku badawczym przeznaczonym do prób i badań konstrukcji mostowych remontowanych, modernizowanych i produkowanych w zakładach WZInż. Stanowisko to w postaci suchego basenu o wybetonowanych przyczółkach, zlokalizowane na terenie zakładu WZInż., oraz przęsła mostu nożycowego podczas rozkładania i w położeniu przygotowanym do prób obciążeniowych przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2 i 3.

W celu ujednoznacznienia opisu badanej konstrukcji, zastosowanego nazewnictwa oraz oznaczenia położenia czujników użytych do pomiarów strzałek ugięcia i skręcenia dźwigarów zastosowano schemat przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 3. Widok stanowiska do badań i prób konstrukcji mostowych WZInż. z rozłożonym do położenia przeprowowego mostem BLG



Rys. 4. Schemat wyjaśniający interpretację nazewnictwa i oznaczeń przyjętych w opisie lokalizacji punktów pomiarowych zastosowanych w badaniach poligonowych mostu

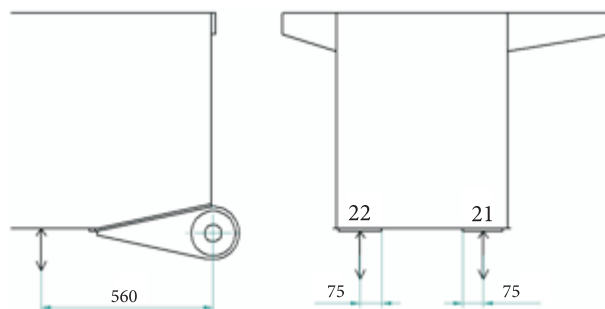
Do pomiaru strzałek ugięcia mostu zastosowano dwa czujniki mechaniczne, które zostały umieszczone w połowie długości przęsła pod uchem złącza głównego. Na rysunku 5 przedstawiono widok takiego czujnika przygotowanego do pomiaru przemieszczenia w osi złącza głównego oraz jego położenie.

Czujnik ten posiada pierścień ślizgowy, który po odciążeniu konstrukcji pozostaje zablokowany w osiągniętym końcowym położeniu, wskazującym bezpośrednio, na wyskalowanej odpowiednio tulei, wartość strzałki ugięcia. Zarówno w normalnej eksploatacji mostu nożycowego, jak też podczas realizowanej na stanowisku próby obciążeniowej, oprócz zginania przęsła, wystąpiło równoczesne skręcanie dźwigarów. Pojawienie się dodatkowego obciążenia w płaszczyźnie poprzecznej badanej konstrukcji jest konsekwencją mimośrodowości obciążenia zewnętrznego, występującego wskutek przemieszczenia środka ciężkości przeprowianego pojazdu względem osi podłużnej

mostu. Opisany powyżej pomiar samej strzałki ugięcia za pomocą czujników mechanicznych umożliwia ocenę pracy mostu w płaszczyźnie podłużnego zginania, ale jest niewystarczający do oceny wielkości skręcenia elementów konstrukcji wskutek niedokładności najazdu przeprowadzanego pojazdu i pojawienia się mimośrodowości obciążenia zewnętrznego. Do zgromadzenia niezbędnych danych i pełniejszego opisu deformacji zastosowano zatem dodatkowo cztery czujniki potencjometryczne, po dwa na każdy dźwigar-koleinę badanego mostu. Schemat położenia czujników potencjometrycznych dla prawego dźwigara oraz ich widok na rzeczywistym obiekcie przedstawiony jest na schemacie (rys. 6) oraz na fotografii zamieszczonej na rysunku 7.



Rys. 5. Widok wyjaśniający położenie czujników mechanicznych do pomiaru przemieszczeń na dźwigarze lewym i prawym mostu



Rys. 6. Schemat interpretujący położenie czujników potencjometrycznych do pomiaru przemieszczeń na dźwigarze prawym mostu



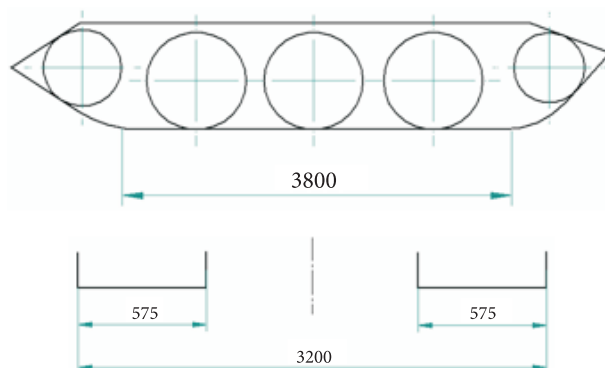
Rys. 7. Widok obrazujący położenie czujników potencjometrycznych do pomiaru przemieszczeń na dźwigarze prawym mostu

Ponieważ czujniki umieszczono po obu stronach dźwigara, to różnica przemieszczeń pionowych, zarejestrowanych za ich pomocą, umożliwi precyzyjne określenie wielkości deformacji skrętnej dźwigara w badanym przekroju. Pozwoli to dokładniej zinterpretować i ocenić poprawność wyników symulacji otrzymanych za pomocą modelu numerycznego odwzorowującego rzeczywistą konstrukcję mostu BLG.

### 3. Przebieg i rejestracja wyników pomiarów przemieszczeń w próbach obciążeniowych mostu BLG

#### 3.1. Przebieg badań obciążeniowych

Przed przystąpieniem do właściwych prób obciążeniowych przęsła mostu BLG zrealizowano najazd testowy gąsienicowego podwozia nośnego BLG na przęsło mostu ułożone na betonowych przyczółkach basenu (rys. 2). Operacja ta miała na celu wstępne ułożenie na brzegach basenu metalowych zakotwiczeń zabudowanych na spodzie przyczółków dźwigarów mostu, pod wpływem obciążenia zewnętrznego. Po zjeździe podwozia–nośnika z przęsła mostu wykonano kalibrowanie aparatury pomiarowej, odpowiadające stanowi obciążenia jedynie ciężarem własnym konstrukcji przęsła. Następnie zrealizowano dwie próby obciążeniowe przęsła BLG. Podczas każdej z wykonanych prób na przęsło mostu działały różne obciążenia zewnętrzne. Obciążenie w każdej próbie stanowiło gąsienicowe podwozie–nośnik przęsła mostu towarzyszącego BLG o różnej masie. Wymiary opisujące strefę kontaktu gąsienicy takiego pojazdu z torem jezdnym przęsła podczas próby obciążeniowej podano na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat strefy kontaktu gąsienicy pojazdu z torem jezdny przęsła podczas próby obciążeniowej

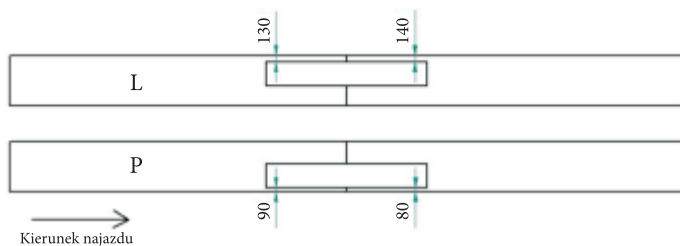
### 3.2. Próba obciążenia mostu ciężarem pojazdu gąsienicowego — podwozia nośnego BLG, wariant I (masa 33,3 tony)

W pierwszym wariantcie obciążenie stanowiło gąsienicowe podwozie nośne BLG bez transportowanego przęsła. Pojazd w takiej konfiguracji przedstawionej na rysunku 9 posiada masę równą 33,3 tony.



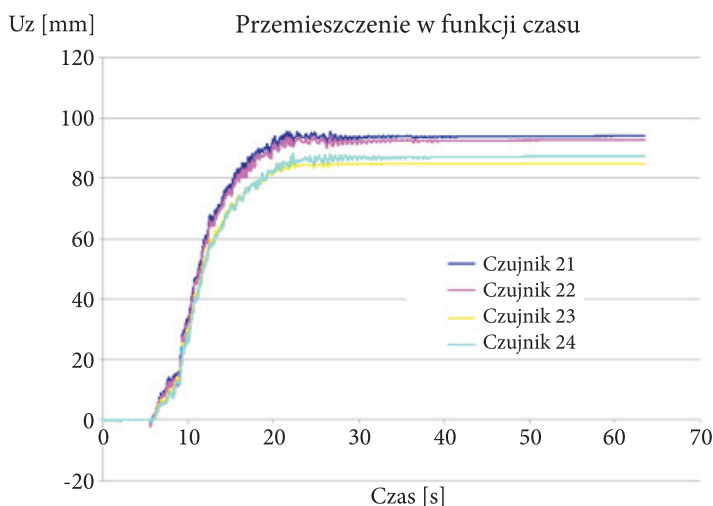
Rys. 9. Gąsienicowe podwozie nośne BLG bez transportowanego przęsła podczas próby obciążeniowej w wariantcie I

Pojazd po wprowadzeniu na most przemieścił się do połowy jego długości. Ślady styku gąsienic pojazdu po zatrzymaniu pojazdu na przęsle mostu zaznaczono na rysunku 10. Podano na nim wymiary opisujące położenie obrysu obszaru styku gąsienic odniesione do zewnętrznych krawędzi kolein badanego mostu.



Rys. 10. Schemat położenia śladów styku gąsienic po zatrzymaniu pojazdu na przęśle mostu — wariant I

Podczas najazdu podwozia gąsienicowego zarejestrowano wartości przemieszczeń mierzonych przez poszczególne czujniki potencjometryczne. Przebieg tych przemieszczeń w funkcji czasu oddziaływania obciążenia na most przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Przebiegi przemieszczeń pionowych w funkcji czasu zarejestrowane podczas oddziaływania obciążenia w wariantcie I

Maksymalną wartość ugięcia zarejestrowano dla przęsła prawego i wynosi ona w badanym przekroju 94 mm. Wartość odczytana z podziałki czujnika mechanicznego dla prawego dźwigara wynosi 95 mm. Dla dźwigara lewego maksymalna wartość strzałki ugięcia zmierzona za pomocą czujnika mechanicznego wynosi 87 mm i odpowiada wartości zarejestrowanej z zastosowaniem czujników potencjometrycznych.



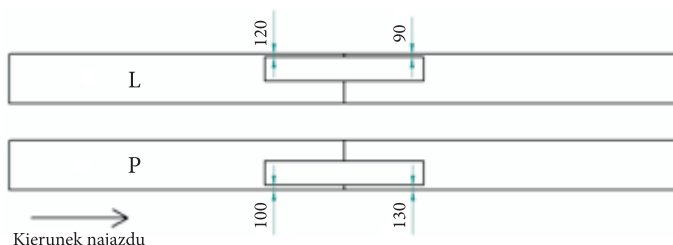
### 3.3. Próba obciążenia mostu ciężarem zestawu pojazdu gaśnicowego — podwozia nośnego BLG wraz z transportowanym przęsłem mostu, wariant II (masa 40,3 tony)

W drugim wariantcie obciążenie stanowiło gaśnicowe podwozie nośne BLG wraz z transportowanym przęsłem złożonego mostu towarzyszącego. Pojazd w takiej konfiguracji przedstawionej na rysunku 12 posiada masę równą 40,3 tony.



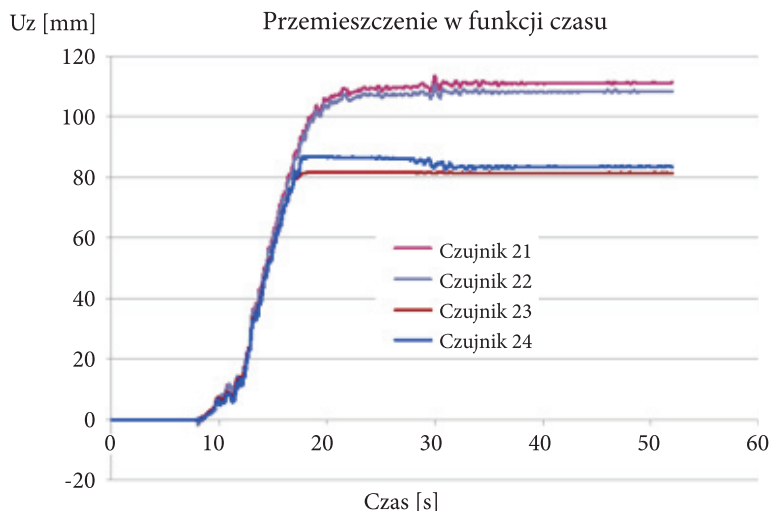
Rys. 12. Zestaw gaśnicowego podwozia nośnego BLG z transportowanym przęsłem mostu podczas próby obciążeniowej w wariantcie II

Pojazd po wprowadzeniu na most przemieścił się do połowy jego długości. Ślady styku gaśnic pojazdu po zatrzymaniu pojazdu na przęsle mostu zaznaczono schematycznie na rysunku 13. Podano na nim wymiary opisujące odległość obrysu obszaru styku gaśnic odniesione do zewnętrznych krawędzi kolein badanego mostu.



Rys. 13. Schemat śladów styku gaśnic po zatrzymaniu pojazdu na przęsle mostu — wariant II

Podczas najazdu podwozia gaśnicowego zarejestrowano wartości przemieszczeń zmierzonych przez poszczególne czujniki potencjometryczne zainstalowane pod dźwigarami przęsła. Przebieg tych przemieszczeń pokazano w postaci wykresów na rysunku 14.



Rys. 14. Przebiegi przemieszczeń pionowych w funkcji czasu zarejestrowane podczas oddziaływania obciążenia w wariancie II

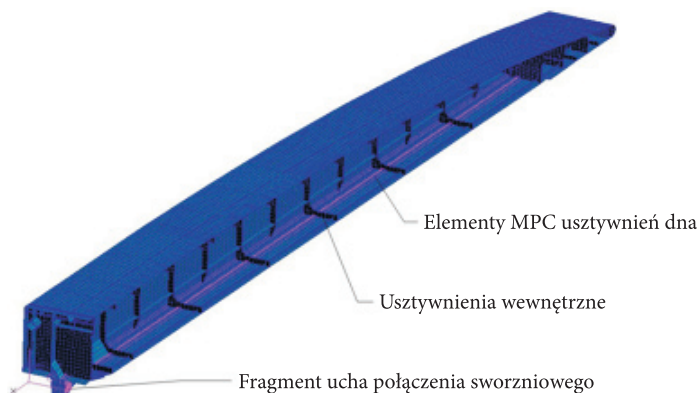
Maksymalna wartość ugięcia została zarejestrowana dla przęsła prawego i wynosi w badanym przekroju 111 mm. Wartość zmierzona za pomocą czujnika mechanicznego dla prawego dźwigara wyniosła 105 mm. Wyniki zarejestrowane dla dźwigara lewego nie zostały zamieszczone na wykresie.

## 4. Analiza numeryczna MES

W celu wykonania symulacji numerycznych odwzorowujących warunki pracy i wyężenie przęsła podczas opisanych powyżej stanowiskowych prób obciążeniowych zbudowano numeryczny model 3D MES kompletnego mostu BLG.

### 4.1. Model numeryczny

Model dyskretny mostu zbudowano, wykorzystując powierzchniowy model komputerowy konstrukcji BLG. Taki model geometryczny, w którym uwzględniono wszystkie podzespoły wewnętrznej struktury siłowej dźwigara, jego poszycie zewnętrzne i ruchome połączenie sworzniowe, importowano w formacie Parasolid do środowiska MSC.Patran. Przestrzenny model dyskretny MES (rys. 15) koleiny mostu BLG złożonego z dwóch segmentów dźwigara wraz z uchem zaczepu zbudowano z elementów powłokowych, bryłowych i z elementów belkowych, wykorzystując preprocesor graficzny MSC/Patran.



Rys. 15. Model numeryczny 3D pojedynczego toru jezdni mostu BLG — przekrój podłużny segmentu dźwigara

Do odwzorowania struktury usztywnień wewnętrznych oraz poszycia zewnętrznego wraz z powierzchnią jezdni użyto około 75 000 elementów dwuwymiarowych typu QUAD 4. Własności sprężyste poszczególnych elementów opisane zostały przez: moduł sprężystości wzdłużnej  $E$ , współczynnik Poissona  $\nu$  oraz grubość powłoki  $h$ . Przyjęto cztery zestawy parametrów materiałowych, przy czym założono, że we wszystkich zestawach dwa parametry mają stałą wartość: moduł sprężystości  $E = 210\,000$  MPa, współczynnik Poissona  $\nu = 0,25$ . Grubość elementów powłokowych zależna była od tego, jaki fragment konstrukcji był nimi opisywany. Przyjęte grubości zmieniały się w przedziale od 4 mm do 11 mm. W modelu wiernie odwzorowano: poszycie boczne i denne segmentów dźwigara, podzespoły struktury nośnej tworzące grodzie, a w tym usztywnienia poprzeczne w postaci wręg i żeber oraz usztywnienia wzdłużne w postaci podłużnic widoczne na rysunku 15. Zdefiniowano ruchome połączenie sworzniowe pomiędzy dwoma segmentami dźwigara. Ściany złącza sworzniowego w omawianym modelu opisano za pomocą elementów typu QUAD4, zaś sworzni modelowano elementami belkowymi o zastępczej sztywności, określonej na podstawie charakterystyk geometrycznych rzeczywistego połączenia.

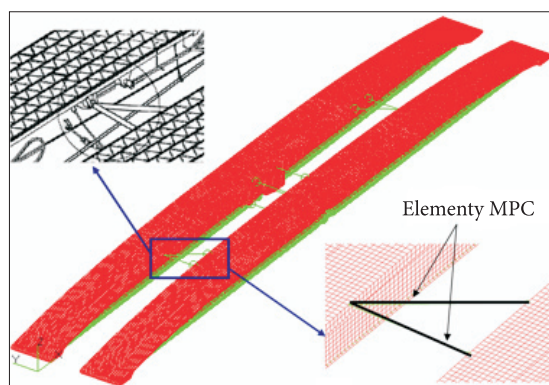
Elementy modelujące sworznię połączone z węzłami centralnymi siatki elementów typu MPC, rozpiętych na krawędziach otworów złącza. Związki kinematyczne pomiędzy odpowiednimi węzłami elementów odwzorowujących poszczególne podzespoły połączenia zdefiniowano tak, aby możliwy był obrót obu segmentów dźwigara w koleinie mostu względem siebie, w zakresie ograniczonym przez połączenie kontaktowe. Obszar kontaktu zdefiniowano w płaszczyźnie jezdni (górną powierzchnią koleiny) pomiędzy segmentami dźwigara za pomocą elementów typu GAP. Dodatkową warstwą elementów typu QUAD zamodelowano usztywnienia zastosowane w rzeczywistej konstrukcji na dnie dźwigara. Zintegrowano je

z warstwą elementów odwzorowujących właściwe poszycie zewnętrzne dźwigara za pomocą elementów MPC (rys. 15). Elementy belkowe o odpowiednio dobranej sztywności zastosowano jako model dodatkowych usztywnień poszycia skrajni koleiny. W sposób przybliżony odwzorowano poszycie zewnętrzne jezdni, na które składa się płyta jezdni. Przy modelowaniu tych części toru jezdni pominięto wytłoczenia usztywniające wzmocnienia płyt jezdni.

Do badań numerycznych użyto modelu złożonego z dwóch kolein mostu. Połączenia pomiędzy koleinami zrealizowano przy pomocy sztywnych elementów MPC. Związki kinematyczne pomiędzy połączonymi węzłami zdefiniowano w taki sposób, aby odwzorować połączenia występujące pomiędzy równoległe ustawionymi koleinami mostu.

Na rysunku 16 przedstawiono widok kompletnego modelu dyskretnego użytego do analiz numerycznych oraz szczegóły połączenia pomiędzy koleinami.

Tak zbudowany model dyskretny kompletnego mostu BLG zawiera 1 442 713 węzłów oraz 148 295 elementów, w tym 3911 elementów MPC.

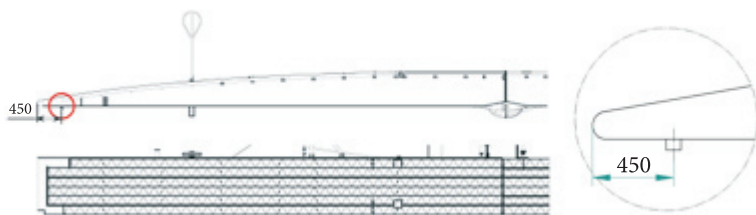


Rys. 16. Model numeryczny 3D mostu BLG oraz szczegóły połączenia pomiędzy dwiema koleinami przęsła

#### 4.2. Warunki brzegowe

Analizując warunki pomiarów strzałki ugięcia stwierdzono, że przęsło mostu rozkładane na betonowych przyczółkach stanowiska opiera się bezpośrednio na specjalnych trzpieniach kotwicznych przedstawionych na rysunku 17. Rolą tych trzpieni jest dokładne zakotwiczenie przęsła w gruncie tak, aby most podczas przejazdu czołgu był bardziej stabilny. Podczas przeprowadzania pomiaru strzałki ugięcia na stanowisku pomiarowym trzpienie te wbite są w drewniane elementy ułożone na betonowym podłożu. W analizach zastosowano niezbędne uproszczenie i założono, że przekroje zamocowania tych trzpieni są ostatnim punktem podparcia konstrukcji odpowiednio na obu jej końcach. Aby odwzorować tę sytuację, w modelu numerycz-

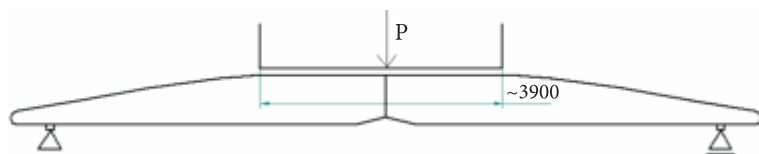
nym wprowadzono więzy w rzędach węzłów odległych od końców przęsła o 450 mm (odpowiadających położeniu przekrojów zamocowania trzpieni kotwicznych).



Rys. 17. Schemat kolejiny przęsła BLG z trzpieniem kotwicznym

Obciążenie zastępcze zdefiniowano w modelu za pomocą ciśnienia zredukowanego na powierzchniach, na których gaśienice czołgu przylegają do górnych powierzchni kolejin — jezdni mostu.

Schemat statyczny zastosowany w analizach numerycznych do wyznaczenia strzałki ugięcia przęsła mostu przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Schemat statyczny do wyznaczenia porównawczej strzałki ugięcia przęsła mostu

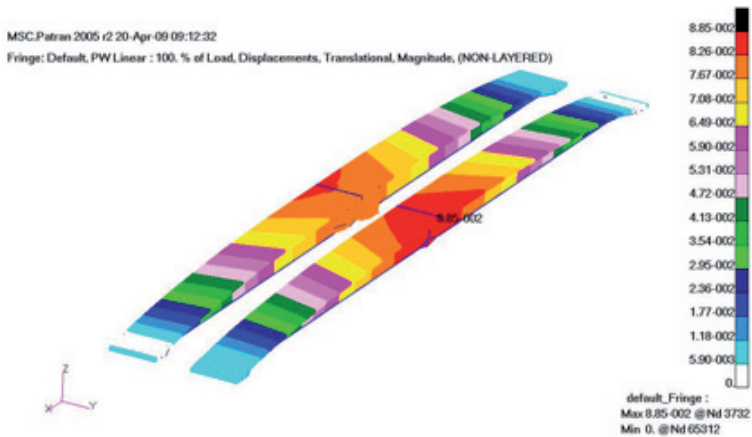
## 5. Wyniki analizy numerycznej

### 5.1. Wariant I próby obciążenia

Analizę numeryczną pojedynczego przęsła mostu z odwzorowaniem warunków odpowiadających I wariantowi badań stanowiskowych wykonano za pomocą programu MSC.Nastran. Obliczenia zrealizowano w zakresie nieliniowej statyki z uwzględnieniem zjawisk kontaktowych w strefie współpracy poszczególnych segmentów obu dźwigarów mostu. W pierwszym wariantcie analizy w modelu odwzorowano obciążenie odpowiadające ciężarowi najeżdżającego podwozia, który wynosił 33,3 t. Obciążenie to przyłożono w postaci ciśnienia na powierzchni przylegania gaśienicy do kolejiny. Po zatrzymaniu pojazdu w połowie długości przęsła, stwierdzono, że gaśienice nie są równomiernie położone względem osi mostu. W związku z tym w modelu numerycznym uwzględniono asymetrię położenia gaśienic względem kolejin mostu przedstawioną na rysunku 10, poprzez rozłożenie

obciążenia zastępczego przyłożonego do odpowiednich elementów modelujących powierzchnię jezdni przęsła.

Na podstawie wyników analizy numerycznej określono strzałki ugięcia dla prawej i lewej bieżni mostu. Maksymalne ugięcie dla prawego dźwigara wyniosło 87 mm, natomiast dla lewego 80 mm. Różnice w maksymalnych przemieszczeniach obu dźwigarów wynikają bezpośrednio z rzeczywistego rozłożenia obciążenia na koleinach przęsła mostu. Ponieważ obciążenie nie było rozłożone symetrycznie na obu koleinach, w torze prawym nastąpiło większe ugięcie i skręcenie dźwigara. Rozkład przemieszczeń w obu dźwigarach przedstawiono na rysunku 19.



Rys. 19. Mapy przemieszczeń wypadkowych przęsła mostu wyznaczone numerycznie z zastosowaniem I wariantu obciążenia

W tabeli 1 zamieszczono zestawienie wyników przemieszczeń maksymalnych zarejestrowanych podczas badań eksperymentalnych na czujnikach mechanicznych oraz wyników otrzymanych z analiz numerycznych.

TABELA 1

	Przemieszczenia pionowe [mm]		Różnica względna [%]
	Czujnik mechaniczny	MES	
Dźwigar prawy	95	87	8,4
Dźwigar lewy	87	80	8,0

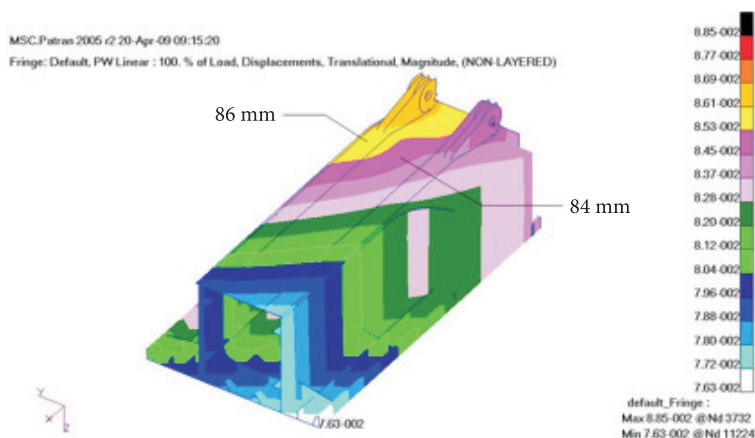
Wartości przemieszczeń otrzymane z analiz numerycznych są mniejsze od wartości przemieszczeń zmierzonych za pomocą czujników mechanicznych. Maksymalna różnica względna tych przemieszczeń wynosi 8,4%. Dla dźwigara lewego, w którym deformacje wynikające z jednoczesnego ugięcia i skręcenia były mniejsze, różnica taka wynosi 8% (tab. 1).

Oprócz porównania strzałek ugięcia dźwigarów, dokonano także porównania wartości przemieszczeń w przekroju oddalonym o 560 mm od osi głównego złącza (rys. 6). W tabeli 2 zestawiono wyniki zarejestrowane za pomocą czujników potencjometrycznych zlokalizowanych w przekrojach pomiarowych oraz przemieszczenia wyznaczone numerycznie w odpowiednich przekrojach modelu pręśła.

TABELA 2

	Przemieszczenia pionowe [mm]		Różnica względna [%]
	Czujnik potencjometryczny	MES	
Dźwigar prawy	94	86	8,5
	92	84	8,7
Dźwigar lewy	84	80	4,8
	87	80	8,0

Wartości przemieszczeń w badanych przekrojach otrzymane z analiz numerycznych są mniejsze o około 8% od wartości przemieszczeń zarejestrowanych podczas badań stanowiskowych. Na podstawie porównania wyników przemieszczeń w przekrojach poszczególnych dźwigarów można ocenić wielkość ich skręcenia. Porównując mapy deformacji otrzymanych z analiz numerycznych stwierdzono, że bardziej skrzywiony jest dźwigar prawy (rys. 19). Wyniki otrzymane z czujników potencjometrycznych wskazują większą wartość skręcenia dla dźwigara lewego. Rozbieżność ta jednak jest niewielka i nie przekracza wartości 1 mm. Na rysunku 20 przedstawiono deformacje w badanym przekroju dla prawego dźwigara. Zaznaczono położenie czujników pomiarowych oraz maksymalne wartości przemieszczeń w rozważanym przekroju.



Rys. 20. Deformacje w badanym przekroju dla prawego dźwigara

## 5.2. Wariant II próby obciążenia

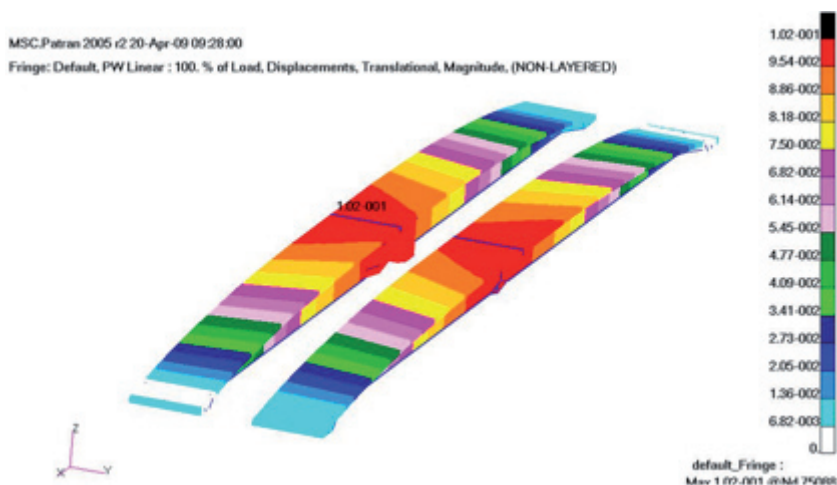
W drugim wariantcie analizy numerycznej odwzorowano warunki obciążenia mostu ciężarem pojazdu o masie 40,3 t. Zastosowano identyczne więzy jak w modelu z wariantu I, a rozkład obciążenia odwzorowany na koleinach przęsła przedstawiono na rysunku 12.

Maksymalne wartości strzałek ugięcia wynoszą 100 mm dla lewego i prawego dźwigara. Dla tego wariantu obciążenia nie występuje tak duże skręcenie dźwigarów jak w wariantcie pierwszym. Na rysunku 20 przedstawiono mapy przemieszczeń wypadkowych wyznaczone numerycznie w obu koleinach przęsła BLG.

W tabeli 3 zamieszczono zestawienie wyników przemieszczeń maksymalnych otrzymanych podczas pomiarów eksperymentalnych wykonanych za pomocą czujników mechanicznych oraz wyników otrzymanych z analiz numerycznych dla drugiego wariantu obciążenia.

TABELA 3

	Przemieszczenia pionowe [mm]		Różnica względna [%]
	Czujnik mechaniczny	MES	
Dźwigar prawy	105	100	4,8
Dźwigar lewy	105	100	4,8



Rys. 21. Mapy przemieszczeń wypadkowych przęsła mostu wyznaczone numerycznie z zastosowaniem II wariantu obciążenia

Wartości strzałek ugięcia wyznaczone numerycznie są mniejsze o około 5% od wartości uzyskanych w eksperymencie z pomiaru czujnikami mechanicznymi. Różnica ta jest mniejsza niż dla wariantu pierwszego i może wynikać z bardziej rów-



nomiernego rozłożenia obciążenia na torach jezdnych, a tym samym z mniejszego wpływu skręcania dźwigarów na deformacje przęsła. Poniżej w tabeli 4 zestawiono wyniki zarejestrowane za pomocą czujników potencjometrycznych w przekrojach odległych o około 650 mm od osi złącza głównego.

TABELA 4

	Przemieszczenia pionowe [mm]		Różnica względna [%]
	Czujnik potencjometryczny	MES	
Dźwigar prawy	111	99	10,8
	108	98	9,3
Dźwigar lewy	-	97	-
	-	99	-

Maksymalna różnica pomiędzy wynikami przemieszczeń pionowych otrzymanych podczas eksperymentu oraz wynikami z analiz numerycznych dla badanego przekroju wynosi około 11%.

## 6. Wnioski

Badania poligonowe przeprowadzone w WZInż Dęblin na zmodernizowanej konstrukcji mostu BLG-67M pozwoliły na zweryfikowanie poprawności modeli numerycznych, które będą zastosowane do oceny wyężenia badanej konstrukcji oraz analiz wytrzymałości mostu w różnych konfiguracjach w zastosowaniach specjalnych, ze szczególnym uwzględnieniem sytuacji kryzysowych.

Analizując wyniki zmierzone podczas badań na stanowisku za pomocą czujników mechanicznych i potencjometrycznych stwierdzono, że wartości przemieszczeń pionowych, zarejestrowane przez czujniki potencjometryczne, różnią się nieznacznie od strzałek ugięcia przęsła zmierzonych za pomocą czujników mechanicznych. Wyniki te mogą być zastosowane do oceny poprawności modelu numerycznego przęsła BLG.

Weryfikację poprawności modeli przeprowadzono na podstawie porównania strzałek ugięcia otrzymanych w dwóch wariantach obciążeń odpowiadających zrealizowanym próbom obciążeniowym na stanowisku badawczym. Strzałki te zostały zmierzone za pomocą czujników mechanicznych umieszczonych w przekroju odpowiadającym połowie długości mostu, bezpośrednio pod osią głównych złączy konstrukcji. W pierwszym wariantcie obciążenia maksymalna różnica względna pomiędzy wynikami z eksperymentu a wynikami uzyskanymi z analiz wynosi około 9%. W drugim wariantcie obciążenia różnica ta jest mniejsza i wynosi około 5%.

Oprócz porównania strzałek ugięcia, w pracy zestawiono także wartości przemieszczeń dla obu dźwigarów w przekroju odległym od osi złączy głównych o około 560 mm. Maksymalna różnica przemieszczeń wyznaczonych numerycznie i zarejestrowanych podczas prób obciążeniowych wystąpiła w drugim wariancie obciążenia i wynosi około 11% dla dźwigara prawego. Większe deformacje występują w przypadkach, w których zaistniały warunki wymuszające skręcanie dźwigarów przęsła. Na podstawie otrzymanych wyników badań można uznać, że model numeryczny dobrze odzwierciedla warunki pracy rzeczywistego obiektu.

W analizie numerycznej i w badaniach prezentowanych w pracy nie uwzględniono luzów występujących w połączeniach sworzniowych rzeczywistej konstrukcji. Luzy te mogą być różne w obu połączeniach dźwigarów. Mają one wpływ na nierównomierne ugięcia, a także na skręcanie kolein mostu. Wypełnienie luzów w połączeniach sworzniowych pod wpływem obciążeń zewnętrznych powoduje dodatkowe niesprężyste ugięcia przęsła. Mogą one decydować o tym, że ugięcia wyznaczone w analizach numerycznych są mniejsze od ugięć przęsła zarejestrowanych podczas badań poligonowych.

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że duży wpływ na poprawność wyników obliczeń ma sposób odwzorowania rzeczywistych warunków brzegowych oraz więzów wewnętrznych w modelach numerycznych. W kolejnych etapach prac przewiduje się wykonanie analizy porównawczej naprężeń w poszczególnych przekrojach konstrukcji oraz dobór optymalnego sposobu odwzorowania podparć oraz obciążeń w modelach do analiz numerycznych mostu BLG w różnych konfiguracjach konstrukcyjnych.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.12.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] *Military bridges*, manual published by Ministry of National Defence in Poland, 1994.
- [2] Instruction of Military Engineering Works, WZInz. Deblin: *Acceptance procedure for the BLG-60M2 bridge*, Deblin.
- [3] W. KRASOŃ, M. WIECZOREK, *Strength of the floating bridges — computer aspect*, Published by Military University of Technology, Warsaw, 2004, 269.
- [4] W. KRASOŃ, Ł. FILIKS, *Modele geometryczne mostu nożycowego*, *Mechanik*, 10, 2007, 852-856.
- [5] W. KRASOŃ, Ł. FILIKS, *Wybrane aspekty zastosowania sztywnych i odkształcalnych modeli w analizie numerycznej mostu nożycowego*, *Biul. WAT*, 57, 2, 2008, 103-116.
- [6] W. KRASOŃ, Ł. FILIKS, *Nueryczna analiza wpływu parametrów eksploatacyjnych na wyłączenie mostu nożycowego*, *Górnictwo Odkrywkowe, rocznik XLX/II*, nr 4-5, Wrocław, 2008, 62-68.
- [7] J. E. FOWLER, D. T. RESIO, J. N. PRATT, S. J. BOC, *Innovation for future gap-crossing operations*, Engineer and Development Research Center Vicksburg, MS39180.

- 
- [8] A. ZIELINSKA, *Strength verification of the vehicle frame for horizontal launched bridge girder*, Przegląd Mechaniczny, 9, 65, 2006.
- [9] *BLG-67 Tank bridge*, published by Ministry of National Defence in Poland, Operational Manual, 1989.
- [10] *Trilateral design and test code for military bridging and gap-crossing equipment*, Operational Manual, publisher in the United States, 1996.
- [11] *MSC PATRAN*, MSC Reference Manual, Version r2, MSC.Software, 2005.
- [12] *MSC NASTRAN*, MSC Reference Manual, Version r2, MSC.Software, 2005.
- [13] *LEGUAN Bridge on SISU Truck for the Finnish Army*, Leading Military Bridge technology, Military Technology, 30, 10, ProQuest Science Journals, oct. 2006, 107.
- [14] S. CHEN, S. PETRO, S. VENKATAPPA, H. GANGARAO, J. MOODY, *Modal testing of an AVLB bridge*, Experimental Techniques, 26, 6, ProQuest Science Journals, Nov./Dec. 2002, 43-46.

M. DACKO, W. KRASOŃ, Ł. FILIKS

### Experimental and numerical testing of the modernized BLG-67M bridge

**Abstract.** Modernized AVLB scissor-type bridge is a subject of studies presented in a paper. This bridge is characterized by high mobility and modular structure. Single module-span consists of two spanning parts of the bridge — two main trucks and support structure joined with a coupling pin. The bridge span is extended automatically by means of a mechanical bridge-laying gear carried together with bridge sections on a self-propelled chassis. Some aspects of an experimental test of the single-span scissors-type BLG (a manufacturer's designation) bridge were discussed. Displacements and strains in particular sections of the structure were measured during field tests with different load modes. Load tests performed on a modernized BLG bridge structure made it possible to verify the correctness of numerical FE models, which will be used for assessing stress distribution in the analyzed structure.

**Keywords:** modernized AVLB scissors-type bridge, experimental test, numerical FE analysis

