

dr inż. Mieszko Kużawa<sup>1\*)</sup>  
prof. dr hab. inż. Jan Bieni<sup>1)</sup>

# Ocena nośności granicznej przy ścinaniu mostowych dźwigarów blachownicowych z uwzględnieniem deformacji

*The ultimate shear load capacity assessment of bridge plate girders with deformations*

DOI: 10.15199/33.2015.10.14

(Oryginalny artykuł naukowy)

**Streszczenie.** W artykule zaproponowano kompleksową metodykę nieliniowej analizy i oceny nośności granicznej blachownicowych dźwigarów mostowych z uwzględnieniem deformacji ich elementów składowych. Poprawność metodyki analiz numerycznych zweryfikowano doświadczalnie przy wykorzystaniu wyników laboratoryjnych badań nośności granicznej dźwigarów blachownicowych.

**Słowa kluczowe:** most, dźwigary blachownicowe, MES, badania doświadczalne, uszkodzenia, stateczność.

**Abstract.** The paper presents the methodology for nonlinear analysis and the ultimate shear capacity assessment of bridge plate girders with deformations. For the validation of proposed numerical procedures of applied methodology the theoretically determined values are compared to results of the experimental load tests.

**Keywords:** bridge, plate girders, FEM analysis, experimental, defects, stability.

W Polsce przeszła o konstrukcji stalowej stanowią ok. 50% ogólnej liczby przęseł mostów kolejowych oraz 20% ogólnej liczby przęseł mostów drogowych. Najczęściej występujące rozwiązania konstrukcyjne stosowane w mostach stalowych to przeszła złożone z dźwigarów blachownicowych. W związku z zaawansowanym wiekiem pogarsza się kondycja determinowana narastającymi uszkodzeniami elementów konstrukcyjnych. Wymusza to konieczność ograniczeń w eksploatacji [1, 2, 5].

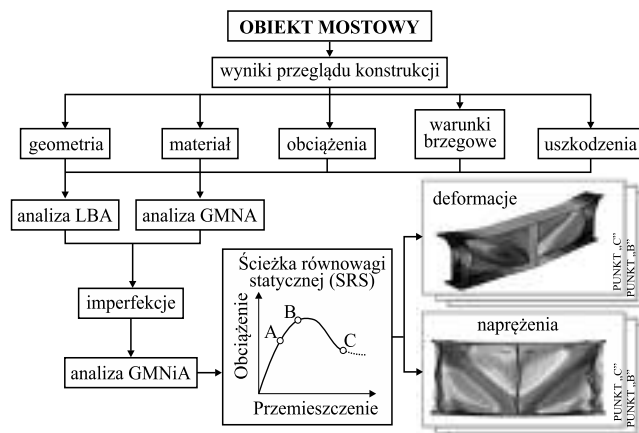
W artykule zaproponowano kompleksową metodykę modelowania i nieliniowej analizy blachownicowych przęseł mostów kolejowych i drogowych z uwzględnieniem deformacji elementów, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES). Ten typ uszkodzeń mostowych dźwigarów blachownicowych bardzo często występuje i jest to efekt wstępnych deformacji technologicznych oraz uderzeń pojazdów w trakcie eksploatacji obiektów. Poprawność zaproponowanej metodyki analiz numerycznych zweryfikowano doświadczalnie, wykorzystując wyniki badań nośności granicznej dźwigarów blachownicowych przeprowadzonych w laboratorium Uniwersytetu w Lublinie, opisanych szczegółowo w pracy [8].

## Kompleksowa analiza efektów uszkodzeń

**Procedury analiz.** Kompleksowa analiza zachowania się mostowych dźwigarów blachownicowych z uszkodzeniami w kolejnych fazach obciążenia, aż do zniszczenia, a w szczególności wyznaczenie ich nośności granicznej, nie jest łatwym zadaniem. Pojawia się problem utraty statecz-

ności, redystrybucji sił wewnętrznych w przekrojach dźwigara, co wymaga rozwiązania zagadnienia nieliniowego zarówno w sensie fizycznym, jak i geometrycznym. Proponowaną ogólną procedurę nieliniowych analiz MES dźwigarów blachownicowych w kolejnych fazach pracy aż do zniszczenia pokazano na rysunku 1. Uwzględnia ona możliwość analizy efektów uszkodzeń konstrukcji w postaci deformacji elementów składowych dźwigarów. Opracowana metodyka wymaga zastosowania:

- liniowo-sprężystej analizy bifurkacyjnej (LBA – *Linear Buckling Analysis*), która służy do wyznaczania wartości własnych (obciążeń krytycznych i postaci wyboczenia). Jej podstawą jest teoria zginania elementów cienkościennych



Rys 1. Schemat nieliniowych analiz MES dźwigarów blachownicowych z uszkodzeniami w kolejnych fazach pracy [6]

Fig. 1. Flow chart of nonlinear FEM analyses of bridge plate girders with initial defects, in consecutive phases of girder behaviour until failure [6]

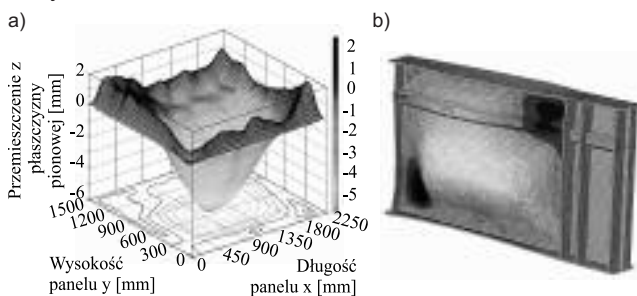
<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji: e-mail: mieszko.kuzawa@pwr.edu.pl



obciążenie dźwigara przekazywane z siłownika hydraulicznego na dźwigar zostało zrealizowane w ok. 10 fazach. Podczas badań prowadzono ciągły pomiar odkształceń i deformacji w obrębie paneli SC i S0 oraz siły obciążenia.

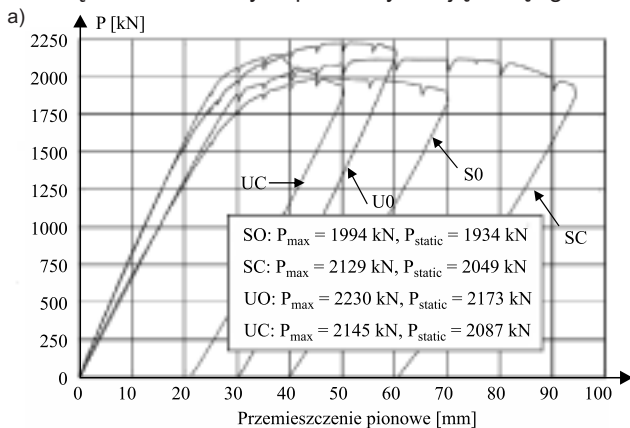
Badaną konstrukcję odwzorowano przy użyciu modelu geometrii klasy  $e^2$ ,  $p^3$ , czyli złożonego z elementów dwuwymiarowych ( $e^2$ ) usytuowanych w przestrzeni trójwymiarowej ( $p^3$ ), a analizy numeryczne, z zastosowaniem teorii dużych przemieszczeń i małych odkształceń przeprowadzono przy wykorzystaniu systemu Abaqus [7]. Wartości imperfekcji geometrycznych z pomiarów w przypadku testu SC pokazano na rysunku 4a, a dyskretny model obliczeniowy na rysunku 4b.



**Rys. 4. Imperfekcje geometryczne (deformacje) panelu SC: a) wartości pomierzone [7]; b) dyskretyzacja w modelu obliczeniowym autorów**

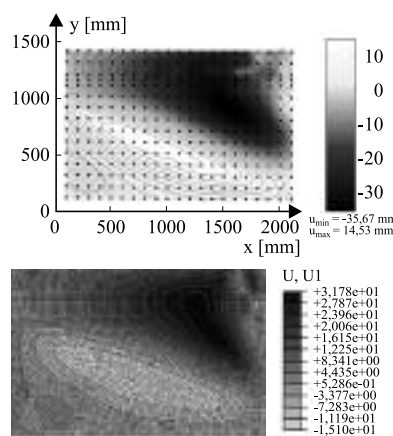
Fig. 4. Geometric imperfections (deformations) of panel SC: a) measured values [7]; b) discretization in computational model created by authors

Na rysunku 5 porównano Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS) uzyskane w wyniku badań doświadczalnych (a) oraz na drodze analiz numerycznych (b). Otrzymano bardzo dużą zgodność wyników. Na rysunku 6 pokazano mapy przemieszczeń prostopadłych do płaszczyzny środkowej środnika w panelu SC w fazie zniszczenia. Obliczone deformacje w obrębie analizowanych paneli wykazują dużą zgodność



**Rys. 5. Ścieżki Równowagi Statycznej (ŚRS): a) wyniki badań doświadczalnych [7]; b) wyniki analiz numerycznych autorów**

Fig. 5. Static stability paths (SSP): a) experimental results [7]; b) results of numerical analyses carried out by authors



**Rys. 6. Przesunięcia prostopadłe do płaszczyzny środkowej środnika w panelu SC (test SC), przy maksymalnym przemieszczeniu pionowym  $U = 70$  mm: a) wartości pomierzone [7]; b) wartości obliczone przez autorów**

Fig. 6. Displacements perpendicular to central plane of web in panel SC (test SC), at maximum vertical displacement  $U = 70$  mm: a) measured values [7]; b) values calculated by authors

z deformacjami pomierzonymi zarówno w stanie sprężysto-plastycznym, plastycznym, jak i w fazie zniszczenia. Mechanizm zniszczenia jest spowodowany zarówno dużym zginaniem w obrębie analizowanego panelu, na co wskazują lokalne wybożenia w obrębie subpanelu górnego, jak również dużym ścinaniem, na co wskazuje dobrze wykształcone pole ciągnięć ukośnych w dolnym subpanelu.

## Podsumowanie

Porównanie wyników badań eksperymentalnych i teoretycznych upoważnia do stwierdzenia, że zastosowana metodyka umożliwi efektywną nieliniową analizę zachowania się dźwigarów blachownicowych przy ścinaniu oraz przy interakcji zginania i ścinania, z uwzględnieniem uszkodzeń w postaci deformacji konstrukcji. Uważamy, że zaproponowana metodyka analiz będzie mogła być wykorzystywana w procedurach oceny nośności eksploatowanych konstrukcji, z uszkodzeniami w postaci nadmiernych deformacji.

## Literatura

- [1] Bień J. Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych, WKŁ, Warszawa 2010.
- [2] Bień J., Modelling of structure geometry in Bridge Management Systems, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. XI, No. 3, 2011, s. 519 – 532.
- [3] Braes D. Finite Elemente. Theorie, schnelle Löser and Anwendungen in der Elastizitätstheorie, Springer, Berlin 1992.
- [4] Chrościelewski J., Makowski J., Pietraszkiewicz W. Statyka i dynamika powłok wielopłatowych; Nieliniowa teoria i metoda elementów skończonych, Wydawnictwo Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN 2004.
- [5] Helmerich R., Bień J., 100 Jahre Kaiser/Grunwaldzki-Brücke in Wrocław (Polen), Stahlbau, Vol. 81, No. 2, 2012, s. 156 – 159.
- [6] Kużawa M. Nośność graniczna przy ścinaniu blachownicowych dźwigarów mostowych z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń (rozprawa doktorska), Raporty Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Nr PRE-1/2013.
- [7] SIMULIA, Abaqus Online Documentation: Version 6.10-EF2, IDS Dassault Systèmes 2010.
- [8] Sinur F. Behaviour of longitudinally stiffened plate girders subjected to bending-shear interaction, Doctoral Thesis, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana 2011.
- [9] Witkowski W. Synteza sformułowania nieliniowej mechaniki powłok podlegających skończonemu obrotowi w ujęciu MES, Monografia 111, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.

Przyjęto do druku: 19.08.2015 r.