

Gabriel KUBIENIEC*
Politechnika Krakowska

NUMERYCZNA ANALIZA PRACY SKRZYNKOWEGO DŹWIGARA STALOWEGO ZE ŚRODNIKAMI WZMOCNIONYMI TECHNIKĄ KLEJENIA

Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest rozpoznanie rezerwy nośności blachownic o środnikach płaskich, wynikającej z zastosowania w tych ostatnich w stanie nadkrytycznym wzmacniających elementów doklejanych. Dotychczasowe badania przeprowadzone na BTU Cottbus wskazują, że wzmacnianie blachownic o smukłych środnikach przez doklejenie elementów płytowych do środników jest efektywne i podnosi nośność blachownic więcej niż tradycyjne metody polegające na wprowadzeniu dodatkowego uzębrowania. Ponadto, klejenie jest technologicznie konkurencyjne w użyciu i nie wprowadza miejscowych pól naprężeń termicznych, jak to ma miejsce w przypadku spawania. Opracowanie modelu numerycznego pozwala na dogodną symulację ustroju złożonego z faz metal-klej.

NUMERICAL ACTION ANALYSIS OF STEEL BOX GIRDER WITH WEBS STRNGHTENED BY ADHESIVE BONDED PLATES

Summary. The purpose of this work is to describe the reserve of strength of girders with plane webs resulting from the application of strengthening elements tied with an adhesive glue. The present experimental investigations conducted at BTU Cottbus clearly proved that strengthening plate girders with slender webs with use of plate elements glued to the webs is effective and increases carrying capacity more than traditional methods of strengthening based on application of additional welded stiffeners. Moreover the application of adhesives is technological competitive in use and does not introduce thermal stress fields that is characteristic for welding. The study of a numerical model allows to make a convenient simulation of a system consisted of phases steel – adhesive.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marek Piekarczyk.

1. Wstęp

Szybki rozwój przemysłu wymusza konieczność adaptowania istniejących konstrukcji do nowych warunków pracy. Te ostatnie często związane są dodatkowymi obciążeniami, na które istniejąca konstrukcja nie była projektowana. W związku z tym istnieje uzasadniona potrzeba wzmocnienia takiej konstrukcji w celu podniesienia jej nośności. Wzmocnienie wiąże się z łączeniem starych i nowych elementów konstrukcyjnych. W przypadku blachownic stalowych najbardziej rozpowszechnione jest spawanie dodatkowych elementów stalowych do pasów bądź dodatkowe uźebrowanie środników.

Zgodnie z [1], najważniejszymi przyczynami ograniczeń w stosowaniu wzmocnień spawanych jest to, że:

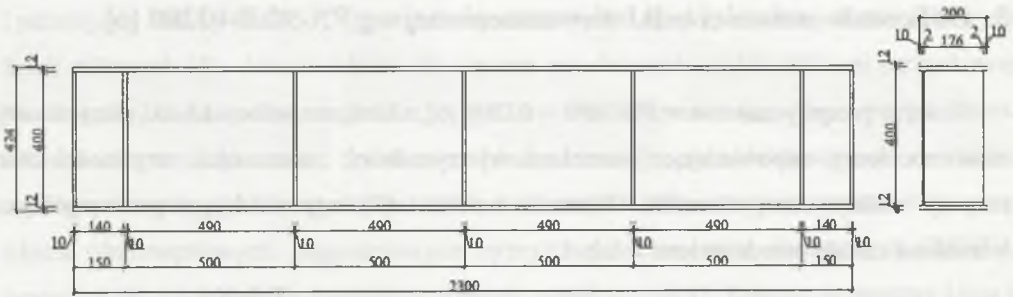
- elementy konstrukcji wykonane są ze stali trudno spawalnej, co jest często spotykane przy remontach mostów o długim okresie użytkowania (stal zgrzewana),
- elementy konstrukcji są dużych wymiarów i dopasowanie ich krawędzi przed wykonaniem spoin wymagałoby użycia znacznych sił,
- występują odpowiedzialne spoiny (nośne), których nie można wykonać prawidłowo (bez wad) na placu budowy, nawet jeśli mieliby to robić doświadczeni spawacze,
- liczba spoin do wykonania jest znaczna i wprowadzona do konstrukcji ilość ciepła może spowodować powstanie deformacji (i naprężeń) trudnych do usunięcia w warunkach polowych.

Powyższe przyczyny implikują zastosowanie innej technologii wzmocnienia konstrukcji, którą może być klejenie. Klejenie cechuje się prawie równomiernym rozłożeniem naprężeń w połączeniu i przeniesieniem sił przez całą płaszczyznę przylegania, dzięki czemu w konstrukcji nie występują gwałtowne spiętrzenia naprężeń i unika się dodatkowych naprężeń wstępnych, płaszczyzny przylegania są zabezpieczone przed korozją, a metal można bezpośrednio łączyć z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Ponadto, klejenie jest konkurencyjne w stosunku do tradycyjnych metod wzmocnienia, gdyż nie wprowadza miejscowych pól naprężeń termicznych.

Dotychczasowe badania doświadczalne przeprowadzone na BTU Cottbus [2, 3, 4] wskazują, że wzmocnianie blachownic o smukłych środnikach przez doklejenie elementów płytowych do środników jest efektywne i podnosi nośność blachownic więcej niż tradycyjne metody polegające na wprowadzeniu dodatkowego uźebrowania.

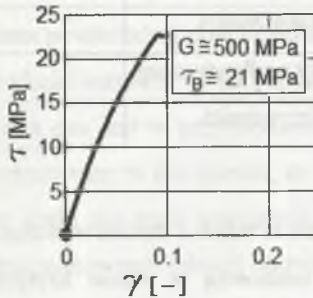
2. Geometria analizowanej blachownicy

Analizowana konstrukcja to swobodnie podparta, uźebrowana poprzecznie skrzynkowa blachownica o długości 2.0 m między podporami z bardzo smukłym środnikiem ($\lambda_w = 200$), który został wzmocniony przez doklejenie dodatkowych blach o grubości 3 mm. Geometria analizowanej blachownicy została przedstawiona na rys. 1. Główna konstrukcja, jak i dodatkowe blachy zostały wykonane ze stali S235 (St3S) o granicy plastyczności $R_e = 235$ MPa. Właściwości kleju zostały określone na podstawie badań doświadczalnych wykonanych na BTU Cottbus. Do analizy został przyjęty dwuskładnikowy klej epoksydowy, dla którego zależność naprężenie-odkształcenie została przedstawiona na rys. 2. Układ wzmocnienia został przedstawiony na rys. 3.




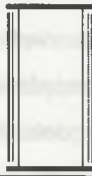
Rys. 1. Geometria analizowanej belki skrzynkowej

Fig. 1. The geometry of analysed box girder



Rys. 2. Zależność naprężenie-odkształcenie dla kleju epoksydowego

Fig. 2. Stress-strain diagrams for epoxy adhesive

Belka bez wzmocnienia	Belka ze wzmocnieniem
	
— Blacha	2 x 3mm
— Klej	Klej epoksydowy

Rys. 3. Układ wzmocnienia
Fig. 3. Strengthening system

3. Obliczenia nośności belki niewzmocnionej wg PN-90/B-03200 [6]

Stosując przepisy zawarte w PN-90/B – 03200 [6], określono nośności belki skrzynekowej niewzmocnionej, odpowiadające warunkom wytrzymałości, stateczności, sztywności oraz rezerwy nadkrytycznej elementu. Wartości nośności (P) odpowiadające poszczególnym warunkom zostały przedstawione w tab. 1.

Tabela 1

Wartości nośności

Warunek	Nośność P [kN]
Wytrzymałości	379
Stateczności	117
Rezerwy nadkrytycznej	182
Sztywności	1172

Porównując wartości zawarte w tabeli 1 można wysunąć następujące wnioski:

- belka cechuje się małą nośnością w stanie krytycznym, zwłaszcza w porównaniu z warunkiem wytrzymałości;
- rezerwa nośności w stanie nadkrytycznym jest znaczna i wynosi 55% siły krytycznej;
- decydującym o nośności belki warunkiem jest stateczność środnika;

- w przypadku konieczności zwiększenia nośności elementu jedynym sposobem jest wzmocnienie środnika, a nie pasów. W tym przypadku należy zastosować jedną z wielu metod wzmocniania środnika np. dodatkowe uźebrowanie;
- w przypadku wystąpienia przyczyn omówionych w pkt. 1, uniemożliwiających spawanie elementów, można zastosować nowoczesną metodę polegającą na doklejaniu elementów stalowych, która została przedstawiona w kolejnych punktach niniejszego artykułu.

4. Obliczenia numeryczne

Obliczenia numeryczne zostały wykonane w programie ABAQUS [7]. Model numeryczny został wykalibrowany na podstawie rezultatu badań eksperymentalnych naroża ramy i późniejszej analizy MES [3, 4], a także wyników badań eksperymentalnych skrzynkowych belek stalowych [5]. Model składał się z trzech zasadniczych części: stalowej skrzynkowej blachownicy, warstwy kleju o grubości 1 mm oraz blach wzmocniających o grubości 3 mm. Główna konstrukcja oraz dodatkowe blachy zostały zamodelowane przy użyciu czterowęzłowych, powłokowych elementów skończonych S4R, natomiast warstwa kleju przy użyciu ośmiowęzłowych, objętościowych, hybrydowych elementów skończonych C3D8IH, typowych dla modelowania materiałów o współczynniku $\nu = 0,45$. Połączenie warstwy kleju z konstrukcją blachownicy oraz dodatkowymi blachami zostało zrealizowane przy wykorzystaniu dostępnej w programie funkcji *TIE, opartej na algorytmie związanym określeniem i wyodrębnieniem dwóch powierzchni kontaktu tzw. powierzchni pierwszorzędnej (z ang. master) oraz powierzchni podporządkowanej (z ang. slave). Funkcja *TIE łączy ze sobą dwie powierzchnie kontaktu w taki sposób, że nie ma pomiędzy nimi względnego ruchu. Wykorzystywana ona jest w przypadku konieczności połączenia dwóch powierzchni, które zostały zdyskretyzowane w ten sposób, że siatki elementów skończonych różnią się między sobą, tzn. obie siatki nie mają wspólnych węzłów. Dzięki funkcji *TIE każdy punkt na powierzchni podporządkowanej (slave) otrzymuje to samo przemieszczenie, co punkt na powierzchni pierwszorzędnej (master), od którego leży najbliżej. Wybór typu powierzchni nie jest dowolny i powinien być dokonany ze szczególną uwagą. Model numeryczny oraz graficzna reprezentacja powierzchni pierwszorzędnej i podporządkowanej zostały przedstawione odpowiednio na rys. 4 i 5. Wprowadzenie imperfekcji geometrycznych

zostało dokonane w uproszony sposób, przy wykorzystaniu metody polegającej na rozwinięciu w szereg funkcji własnych modelu idealnego, opisanej równaniem:

$$\Delta x_i = \sum_{i=1}^n w_i \varphi_i \quad (1)$$

gdzie:

φ_i – i-ta funkcja własna,

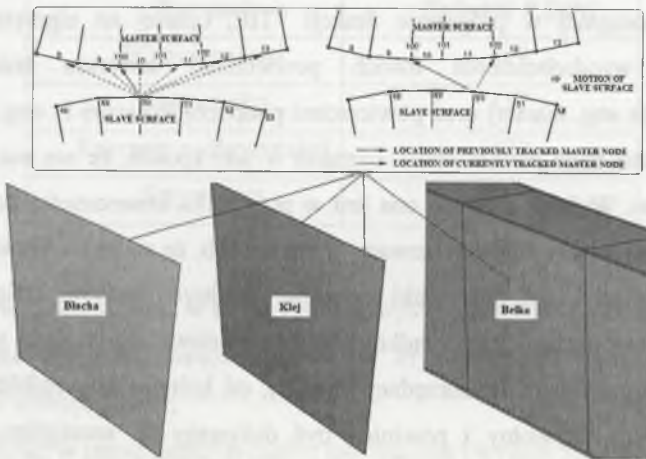
w_i – stowarzyszony współczynnik skalujący.

W trakcie obliczeń numerycznych mierzonymi wartościami były siła niszcząca P oraz przemieszczenie U, odpowiadające przyrostowi siły niszczącej. Zależności P-U dla belki, wzmocnionej oraz niewzmocnionej zostały przedstawione na rys. 6.



Rys. 4. Model numeryczny

Fig. 4. Numerical model



Rys. 5. Graficzne przedstawienie funkcji *TIE

Fig. 5. Graphical representation of function *TIE

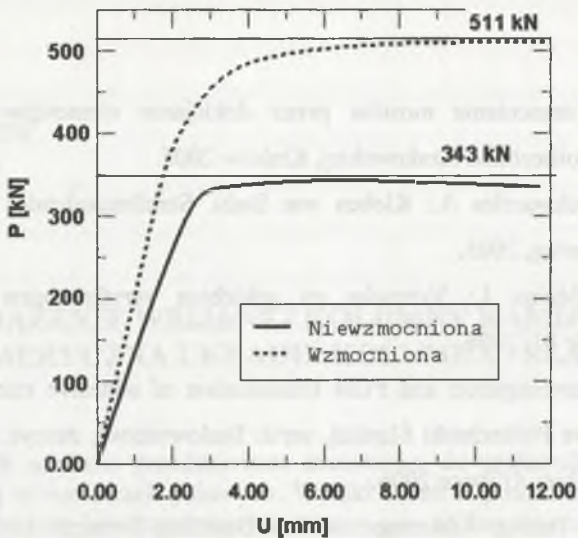


Fig. 6. Krzywe obciążenie-przemieszczenie
Rys. 6. Load-deflection curves

5. Wnioski

Wzmocnienie śródników belki techniką klejenia spowodowało wyraźny wzrost nośności, wynoszący ok. 50% nośności belki niewzmacnianej. Zauważalny jest także znaczny wzrost zakresu sprężystego pracy dźwigara, wynoszący ok. 40% w stosunku do zakresu pracy bez wzmocnień. Pochylenie krzywej P-U dla belki wzmocnionej jednoznacznie wskazuje na wzrost sztywności elementu. Łagodne opadanie krzywych P-U po wyczerpaniu nośności wskazuje na mechanizm zniszczenia belki typowy dla działania pól ciągnięć w środnikach, a podobieństwo charakteru obu krzywych pokazuje, że także w przypadku środników z doklejonymi elementami pojawił się wspomniany rodzaj pracy belki w stanie nadkrytycznym.

Analiza numeryczna pokazała, że przedstawiona belka skrzynkowa może być efektywnie modelowana przy użyciu powłokowych elementów skończonych S4R, o ile siatka elementów skończonych w środnikach jest wystarczająco gęsta. Także warstwa kleju może być modelowana przy wykorzystaniu objętościowych elementów skończonych C3D8IH, co może być alternatywą dla innej, bardziej pracochłonnej metody modelowania warstwy kleju powiązanej ze sprężystymi elementami skończonymi.

LITERATURA

1. Łagoda M.: Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. Monografia 322. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
2. Pasternak H., Schwarzlos A.: Kleben von Stahl. Stahlbaukalender 2005, Abschnitt 7, Ernst & Sohn Verlag, 2005.
3. Pasternak H., Meinz J.: Versuche zu geklebten verstärkungen im Stahlhochbau. Bauingenieur, Nr 81, 2006.
4. Kubieniec G.: Investigation and FEM simulation of adhesive reinforced knee joints. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, zeszyt: 109, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
5. Piekarczyk M.: Taking Advantage of Post-Buckling Strength in Designing of Steel Structures. Monografia 299, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
6. PN-90/B-03200 „Konstrukcje stalowe. Obliczenia i projektowanie“.
7. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc : ABAQUS (standard) Reference Manuals ver. 6, 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Sylwester Kobielałak