

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG^{1*)}
mgr inż. Mikołaj Binczyk¹⁾
mgr inż. Przemysław Kalitowski¹⁾

Ocena pracy dźwigara zadaszenia Hali Blanika w Gdańsku

Work assessment of roof Blanik Hall in Gdansk

DOI: 10.15199/33.2016.07.31

Streszczenie. W artykule przedstawiono kompleksowe sprawdzenie nośności stalowej konstrukcji zadaszenia Hali Leszka Blanika w Gdańsku. Dokonano oceny wpływu otworów dużej średnicy w środnikach dźwigara na jego nośność. Oszacowano nośność nietypowego, zginanego styku doczołowego łączącego elementy dwuteowe klasy 4. Obliczenia wykonano na podstawie norm i analiz modeli MES.

Słowa kluczowe: analiza numeryczna, zadaszenie stalowe, styk doczołowy, nośność.

Abstract. The paper presents profound verification of a load capacity for the roof in the Leszek Blanik sport hall in Gdansk. An influence of significant-diameter holes in the web on a load capacity of a girder was evaluated. A bending resistance of an untypical butt joint which connects I-sections in class 4 was assessed. Calculations were done on the basis of design codes and additional, non-linear FEM analysis.

Keywords: numerical analysis, steel roof, butt joint, load capacity.

Konstrukcje stalowe wyróżniają się przewidywalną charakterystyką pracy. Dzięki bliskiemu prawdziemu założeniu o jednorodności stali oraz przewidywalnym zachowaniu pod obciążeniem, wymiarowanie elementów konstrukcji stalowych często sprowadza się do prostych obliczeń wytrzymałościowych. W efekcie projektanci pozwalają sobie na odważną optymalizację przy projektowaniu, licząc na rezerwy plastyczne i powszechne przekonanie, iż konstrukcja ma rzeczywistą nośność większą niż teoretyczna. Zbyt optymistyczne i często nieuzasadnione założenia mogą doprowadzić do przeszacowania nośności zaprojektowanej konstrukcji. Ważnym elementem często decydującym o poziomie nośności konstrukcji stalowych są styki doczołowe, w przypadku których zrezygnowano z fundamentalnej zasady kształtowania konstrukcji stalowej polegającej na utrzymaniu ciągłości pasów i środników łączonych elementów. Prostota technologiczna wykonania styku doczołowego spowodowała, że stał się on powszechny w elementach ściskanych, rozciąganych i zginanych. Istnieje jednak wiele problemów teoretycznych związanych z prawidłowym określeniem nośności takiego połączenia ze względu na skomplikowaną ścieżkę przepływu sił przez łączniki i blachy czołowe (nie bezpośrednio z pasa do pasa). Główne z nich to podatność blach czołowych i niebezpieczeństwo powstania wad w spawanym połączeniu elementu rozciąganego

z blachą czołową. Wszystko to sprawia trudności w opracowaniu uniwersalnej metody wymiarowania. Przedmiotem analiz przedstawionych w artykule są dźwigary dwuteowe ze stykami doczołowymi (kategorii D wg [3]).

Opis konstrukcji

Analizowana konstrukcja zadaszenia powstała w ramach realizacji hali sportowej Leszka Blanika, Centrum Innowacyjno-Wdrożeniowego na terenie Akademii Wychowania Fizycznego i Sportu w Gdańsku (fotografia 1). Budynek [2] zaprojektowano na rzucie prostokąta o wymiarach osiowych 60,30 x 34,82 m. Wysokość maksymalna hali wynosi 14,20 m. Konstrukcję stalową dachu stanowi ruszt belkowy z głównymi elementami nośnymi w postaci wolnopodpartych dźwigarów blachownicowych o rozpiętości teoretycznej 34,82 m, w rozstawie poprzecznym co 6,0 m. Typowy dźwigar to pełnościenne blachownica ze stali S355 z dziesięcioma otworami w środniku na kanały wentylacyjne i standardowymi usztywnieniami

w postaci żeber pionowych i poziomych. W miejscach otworów na kanały wentylacyjne zaprojektowano kołnierze usztywniające z profili RO 813 x 12,5 mm i szerokości 100 mm. Do celów transportowych i montażowych dźwigar został podzielony na trzy segmenty, których połączenia zaprojektowano przez styk doczołowy (kategoria D – niesprężony) z wykorzystaniem śrub M30 klasy 10.9. Ze względu na modyfikacje projektu podczas budowy, wykonawca postanowił zlecić niezależny audyt konstrukcji dachu hali.

Ocena pracy dźwigara

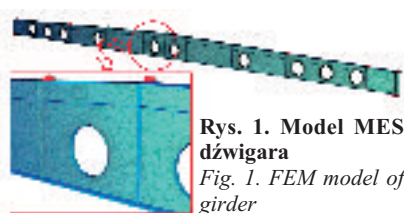
W początkowym etapie prac pewien niepokój wzbudziły duże otwory w środniku dźwigara. Posługiwanie się podczas wymiarowania standardowym modelem belkowym o zadanym przekroju jest zbyt dalekim uproszczeniem, szczególnie w obszarach występowania dużych sił tnących. Przeanalizowano wpływ otworów, wykorzystując model numeryczny dźwigara zaimplementowany w środowisku MES SOFiSTiK (rysunek 1), który wykonano z powłokowych,



Fot. 1. Hala w trakcie budowy (a) oraz styk doczołowy dźwigara (b)
Photo 1. The hall under construction (a) and butt joint (b)

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

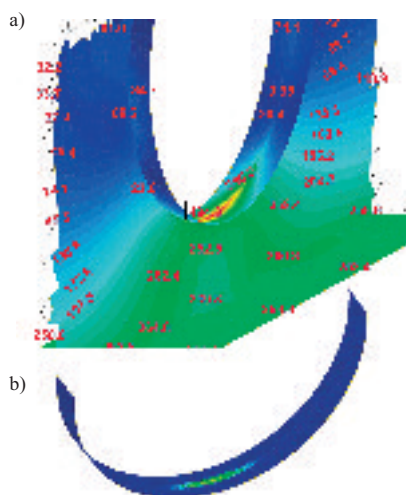
^{*)} Adres do korespondencji:
e-mail: zoltowk@pg.gda.pl



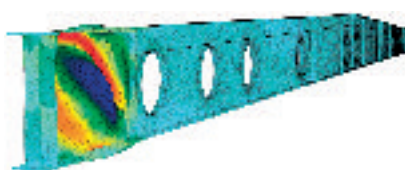
Rys. 1. Model MES dźwigara
Fig. 1. FEM model of girder

czterowęzłowych elementów skończonych. Szczegółowo odzwierciedlał on rzeczywistą geometrię dźwigara, tzn. uwzględnił wszystkie żebra (pionowe i poziome) oraz otwory na kanały wentylacyjne (zgodnie z [8]). Obciążenia konstrukcji dachu przyjęto wg [3, 4, 5, 6]. Przeprowadzono liniową analizę statyczno-wytrzymałościową dźwigara. Wyniki wykazały przekroczenie naprężeń plastycznych we wzmocnieniu kołnierzowym otworów na kanały wentylacyjne (rysunek 2a). Naprężenie maksymalne wyniosło 494,3 MPa. Przeprowadzono nieliniową analizę numeryczną z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej stali S355 oraz nieliniowości geometrycznej. Do analizy przyjęto model materiałowy sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem. Analiza nieliniowa pod obciążeniem obliczeniowym nie wykazała przekroczenia dopuszczalnych naprężeń w środku i pasach dźwigara, gdyż maksymalne naprężenia wyniosły 296,5 MPa. Jedynie na krawędzi otworów i kołnierza dochodziło do lokalnego uplastycznienia (rysunek 2b), które miało ograniczony zakres i nie powodowało przyrostu naprężeń w środku i pasie dolnym dźwigara.

Sprawdzono również stateczność środka na wyboczenie. Wykazano, że pierwsza postać wyboczenia (rysunek 3) ujawnia się przy współczynniku obciążenia $f_1 = 7,06$,



Rys. 2. Wytyczenie wg HMH: a) analiza liniowa; b) analiza nieliniowa
Fig. 2. Strength v. Misses: a) Linear analysis; b) Nonlinear analysis



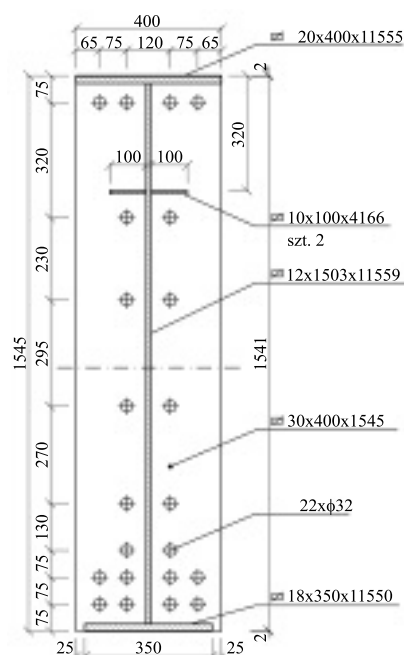
Rys. 3. Pierwsza postać wyboczenia środka dźwigara
Fig. 3. The first buckling mode of the girder web

co oznacza, że wyboczenie środka nie zagraża pracy dźwigara głównego. W nieliniowej analizie stateczności uzyskano podobne wyniki, co potwierdziło zasadność zastosowania elementów zabezpieczających środkik przed wybočeniami oraz prawidłowość rozmieszczenia stężeń połączeniowych.

Połączenie doczołowe

Segmenty dźwigara scalono na budowie, stosując styki niesprężone (kategorii D) na 22 śruby M30 klasy 10,9. Przyjęto blachę czołową ze stali S355 o grubości 30 mm. Schemat rozmieszczenia śrub w styku pokazano na rysunku 4 i fotografii 1b. Uwagę zwraca wymiar styku – blacha czołowa 0,4 x 1,5 m oraz śruby zewnętrzne oddalone od pasa rozciąganego.

Zginane styki doczołowe blach i kształtowników o przekroju otwartym klasyfikuje się jako połączenia złożone. Skomplikowana praca statyczna spotęgowana jest trzema schematami zniszczenia połączeń kategorii D, które zależą przede wszystkim od wymiarów geometrycznych blachy czo-



Rys. 4. Rozmieszczenie śrub w styku doczołowym
Fig. 4. Positions of bolts in the butt joint

łowej oraz klasy i rozkładu śrub. W efekcie należy uwzględnić w projektowaniu następujące stany graniczne nośności [1]:

- zerwanie śruby lub przeciągnięcie ła śruby przez blachę czołową;
- uplastycznienie blachy czołowej;
- nośność spoin łączących blachę czołową z elementem;
- uplastycznienie środka belki przy rozciąganiu [7].

W ogólnym przypadku wyznaczania nośności styku doczołowego należy uwzględnić możliwość wystąpienia mieszanych schematów zniszczenia styku (wywołujących dystrybucję sił), co w procedurach analitycznych jest problematyczne. Ze względu na te komplikacje i duże znaczenie elementu w konstrukcji, nośność styku wyznaczono trzema metodami: wg PN-90 B-03200 [3], wg PN-EN 1993-1-8 [7] oraz na podstawie wyników analizy opracowanego modelu numerycznego MES połączenia.

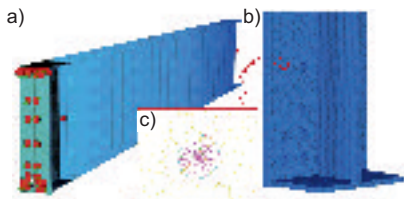
Wyznaczanie nośności węzła wg PN-90 B-03200 i PN-EN 1993-1-8

Nośności styku wyznaczonej wg Eurokodu nie można wprost odnosić do sił wewnętrznych uzyskanych w przypadku obciążeń przyjętych wg polskich norm. Stosowanie metody wg PN obwarowane jest minimalną grubością blachy czołowej, ograniczeniami do śrub M20 i M24 oraz kilku typowych rozkładów śrub w połączeniu do wyboru. Wynika to z doświadczałnej genezy stosowanych współczynników rozdziału obciążenia pomiędzy śruby. Mimo braku spełniania tych uwarunkowań przez węzeł postanowiono dokonać obliczeń, przyjmując możliwie bliskie rzeczywistości założenia: zastosowanie współczynników jak dla śrub M24 i pominięcie śrub wewnętrznych w drugim szeregu od dołu. Użytkano nośność połączenia $M_{Rj} = 3200$ kN.

Znacznie bardziej elastyczna jest metoda składnikowa wyznaczania nośności styku, przedstawiona w normie europejskiej. Polega ona na opisanu nośności całego węzła przez wyznaczenie nośności części składowych (blacha czołowa, środkik, śruby). Nośność obliczeniowa wg Eurokodu wyniosła $M_{j,Rd} = 3400$ kN. Wartość tę wyznaczono wg złożonej procedury ogólnej, ponieważ nie zostały spełnione warunki dotyczące stosowania istniejącego uproszczonego algorytmu przedstawionego w [1]. Według [1] uproszczony algorytm zawiąza nośność styków ze środkikami klasy 3 i 4.

Identyfikacja nośności węzła na podstawie modelu numerycznego

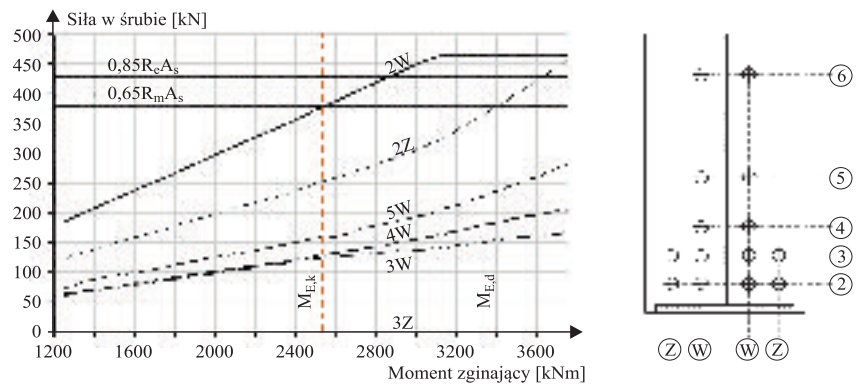
Zarówno w przypadku procedury wg [3], jak i [7] trudno mówić o pewności otrzymanego wyniku. W związku z tym opracowano indywidualny model numeryczny połączenia. Do generacji geometrii i obliczeń wykorzystano środowisko MES SOFiSTiK. Wykonano złożony model (rysunek 5), w którym blachy w obrębie węzła zdyskretyzowano za pomocą elementów bryłowych, a w dalszej odległości elementów powłokowych i belkowych. Warunki brzegowe dobrano w sposób umożliwiający wprowadzenie momentu zginającego w styku za pomocą momentu skupionego umieszczonego na końcu belki. Jednocześnie zapewniono obrót wokół środka ściskania, jednostronną pracę śrub (tylko przy rozciąganiu) oraz kontakt pomiędzy blachami czołowymi.



Rys. 5. Model MES styku wykonany w środowisku SOFiSTiK: a) widok ogólny; b) szczegół styku doczołowego; c) powiązanie blachy czołowej ze śrubą (więzy kinematyczne)

Fig. 5. FEM model of joint made in SOFiSTiK environment: a) global view; b) detail of the butt joint; c) connection between the end-plate and the bolt (kinematic constraints)

Przeprowadzono nieliniową analizę przyrostową z zastosowaniem nieliniowości geometrycznej, materiałowej i nieliniowej pracy podpór. Siły w śrubach przedstawiono na rysunku 6 zgodnie z konwencją zaproponowaną w [1]. Śruby zewnętrzne w trzecim rzędzie (3Z) nie biorą udziału w przenoszeniu obciążeń. W maksymalnie wyętej śrubie siłę odpowiadającą obliczeniowej nośności śruby M30 klasy 10.9 wg polskiej normy (379 kN) uzyskano przy momencie zginającym $M = 2600$ kN. W przypadku śrub o niewielkiej ciągliwości (kl. 10.9) niewskazane jest przekroczenie tej granicy. Obliczeniowa wartość momentu zginającego w styku, wg projektu [8] wyniosła $M_{Ed} = 3421$ kN. Przy takiej wartości śruba najbardziej wyęta ulega znacznemu uplastycznieniu, a jednocześnie na skutek momentu $M = 3125$ kN uplastycznione zostają blacha czołowa w miejscu po-

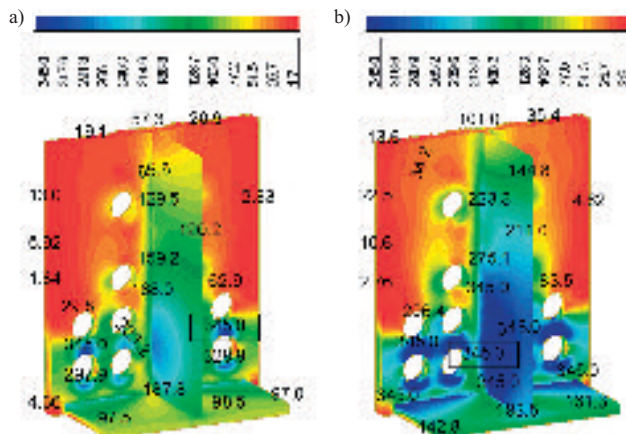


Rys. 6. Wpływ wielkości momentu zginającego na siły w śrubach. Położenie śrub w styku wg [6]

Fig. 6. Effect of bending moment to forces in bolts. Location of bolt in joint by [6]

łączenia ze środnikiem oraz środnik (rysunek 7). Ostatecznie przyjęto nośność obliczeniową $M_{Rj} = 2600$ kN. Z porównania tej wartości z obliczeniami wg norm wynika, że stosowanie metod bez dokładnego spełnienia warunków i bez uwzględnienia dodatkowych zaleceń zawyża wartość nośności. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń analizowane styki zakwalifikowano do wzmocnienia.

Zgodnie z PN-EN 1993 rozważany obiekt podlega klasie niezawodności RC3 odpowiadającej klasie konsekwencji CC3, co skutkuje m.in. wprowadzeniem współczynnika korekcyjnego $K_{FI} = 1,1$ w przypadku oddziaływań zmiennych i wymaga wykonania niezależnego audytu realizowanego projektu [2]. Z przeprowadzonych analiz wynika, że wymagania zawarte w PN-EN 1993 dotyczące kontroli procesu projektowego są uzasadnione, gdyż zmniejszają prawdopodobieństwo awarii konstrukcji.



Rys. 7. Naprężenia HMW w dolnej części węzła: a) $M = 1875$ kNm; b) $M = 3125$ kNm [MPa]

Fig. 10. Von Mises stress in bottom part of joint: a) $M = 1875$ kNm; b) $M = 3125$ kNm [MPa]

Podsumowanie

W artykule pokazano kompleksowe podejście do oceny nośności dźwigara blachownicowego zadania hali sportowej. Wykazano mankamenty projektu, które można było usunąć na etapie budowy bez zwiększenia istotnych kosztów inwestycji. **Przyczyn uchybień projektowych można doszukiwać się w niejasnej interpretacji przepisów dotyczących stosowania norm w Polsce oraz wybiórczego wykorzystywania procedur normowych.**

Literatura

- [1] Bródka Jan, Aleksander Kozłowski. 2013. *Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych*. Rzeszów. Polskie Wydawnictwo Techniczne.
- [2] Gwóźdź Marian. 2015. „Specyfikacja elementów niezawodności zadania Stadionu Śląskiego w Chorzowie. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna”. *Awarie Budowlane 2015*. Szczecin-Międzyzdroje.
- [3] PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [4] PN-82/B-02000 Obciążenia budowli – Zasady ustalania wartości.
- [5] PN-77/B-02011 + Az1 Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem.
- [6] PN-80/B-02010 + Az1 Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie śniegiem.
- [7] PN-EN 1993-1-8 Projektowanie konstrukcji stalowych. Projektowanie węzłów.
- [8] Projekt wykonawczy zamienny. Hala gimnastyczna Leszka Blanika. Centrum Innowacyjno-Wdrożeniowe AWFIS w Gdańsku. MPROJEKT Sp. z o.o. Poznań. Wrzesień 2015.

Przyjęto do druku: 02.06.2016 r.