

dr inż. Marek Szafrński<sup>1)</sup>  
dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG<sup>1)\*</sup>

# Modyfikacja połączenia dźwigara ze słupem w konstrukcji stalowej dachu Terminalu T2 Portu Lotniczego w Gdańsku

*The modification of the beam-column connection in the steel roof of the Terminal T2 of the Gdansk Airport*

DOI: 10.15199/33.2016.07.32

**Streszczenie.** W 2015 r. ukończono rozbudowę Terminalu T2 Portu Lotniczego im. Lecha Wałęsy w Gdańsku. Politechnika Gdańska pełniła nadzór naukowy nad rozbudową obiektu. Wykonano wiele analiz, których celem była weryfikacja pracy konstrukcji w fazach montażu oraz w stanie docelowym. Wnioski z przeprowadzonych badań doprowadziły do modyfikacji oparcia dźwigarów dachowych na stalowych słupach nośnych, z uwagi na stwierdzone lokalne przekroczenia naprężeń granicznych. Artykuł prezentuje główne założenia, rezultaty i wnioski z przeprowadzonych obliczeń oraz zaprojektowane rozwiązanie naprawcze przeciążonych stref. Działania naprawcze zrealizowano w trakcie prac montażowych.

**Słowa kluczowe:** konstrukcje stalowe, obliczenia MES, nośność konstrukcji, bezpieczeństwo konstrukcji.

**Abstract.** In 2015 the expansion of the Terminal T2 of the Lech Wałęsa Airport in Gdansk was completed. The Gdansk University of Technology performed the scientific supervision of the expansion of the Terminal. Many analyses were carried out to check and control the behavior and capacity of the structure in the construction stages and in the final state. Conclusions of the work led to the modification of the girder-column joint due to the stresses exceeding in some columns. The article presents the main objectives, results and conclusions of the performed calculations. The new concept of the girder-column joint which was realized during the construction work is described.

**Keywords:** steel structures, FEM analysis, load capacity, structure safety.

**B**udynek Terminalu T2 (fotografia 1) zaprojektowano jako jednoprzestrzenną halę z trzema kondygnacjami nadziemnymi i jedną podziemną [1]. Układ konstrukcyjny opisano na ortogonalnej siatce osi. W rzucie budynek ma kształt regularny, prostokątny, o wymiarach 240 x 90 m. Inwestycję realizowano w dwóch etapach:

- I zakończony w 2012 r. – budowa części Terminalu w osiach '0 ÷ 23', 'A ÷ M';

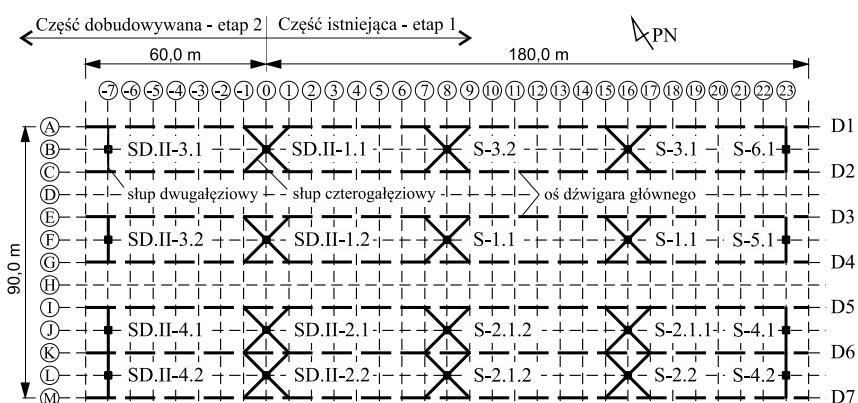
- II zakończony w 2015 r. – dobudowa części Terminalu w osiach '-7 ÷ 0', 'A ÷ M'.

Obie części połączono bez dylatacji, tworząc ciągły, przestrzenny układ ramowy. Konstrukcja budynku to struktura żelbetowa, słupowo-płytowa, przekryta stalowym dachem (fotografia 1). Ściany zewnętrzne budynku (fasady) zaprojektowano w konstrukcji stalowej w układzie słupowo-ryglowym. Konstrukcję dachu tworzą: wewnętrzne dźwigary kratowe (D2 ÷ D6) zmiennej wysokości dostosowanej do geometrii dachu, skrajne dźwigary belkowe (D1,



Fot. 1. Konstrukcja stalowa Terminalu  
Photo 1. The steel structure of the Terminal

D7) o załamanej osi, skrynkowe płatwie o załamanej osi i rozstawie 3,75 m, belki koszowe oraz kalenicowe z rur 160 x 10, stężenia ciągnowe systemu Macalloy  $\varnothing 24$  i  $\varnothing 48$ . Płatwie opierają się naprzemiennie na pasach górnych i dolnych dźwigarów głównych, kształtując w ten sposób układ załamanych płaszczyzn dachu. Konstrukcję dachu oparto na słupach dwu- i czterogłęziowych (rysunek 1), których trzony mają zróżnicowane przekroje i są liniowo zbieżne na wysokości. Gałęzie słupów



Rys. 1. Układ osi konstrukcyjnych i słupów Terminalu T2 Portu Lotniczego w Gdańsku  
Fig. 1. The system of the axes and columns of the steel roof of the Terminal T2 in Gdansk

<sup>1)</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji:  
e-mail: zoltowk@pg.gda.pl

zaprojektowano jako skrzynkowe, kwadratowe, także o liniowo zmiennym przekroju (największy przekrój występuje w środku rozpiętości gałęzi). Wierzchołki gałęzi połączone z trzonem słupa rozporami o przekroju skrzynkowym. Opierają się na nich dźwigary główne dachu za pomocą kołnierzonego styku doczołowego (fotografia 2). Trzony słupów są sztywno zamocowane w konstrukcji żelbetowej.



Fot. 2. Połączenie dźwigara dachowego ze słupem

Photo 2. The 'girder-column' connection

### Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

Przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową konstrukcji stalowej dachu oraz słupów głównych. W pierwszym etapie sprawdzono naprężenia we wszystkich elementach konstrukcyjnych [8]. W związku z tym, że budowywana część Terminalu została połączona z częścią istniejącą bez dylatacji, w modelu globalnym uwzględniono konstrukcję obu części budynku. Wykonano przestrzenny, prętowy model MES w programie SOFiSTiK (rysunek 2). Geometrię układu, przekroje elementów, parametry materiałowe oraz warunki brzegowe przyjęto na podstawie dokumentacji technicznej [1] oraz normy [2]. Uwzględniono obciążenia stałe oraz zmienne: ciężar własny, ciężar wyposażenia; równomierne obciążenie śniegiem; obciążenie śniegiem wraz z zaspami śnieżnymi; równomierne obciążenie wiatrem; obciążenie temperaturą (równomierne ogrzanie i ochłodzenie). Definicje i wartości poszczególnych obciążeń oraz ich kombinacje przyjęto zgodnie z normami [3 + 6]. Z uwagi na trudności w ocenie podatności, styki zastosowane do połączenia dźwigarów z gałęziami słupów zaliczono do połączeń nie-

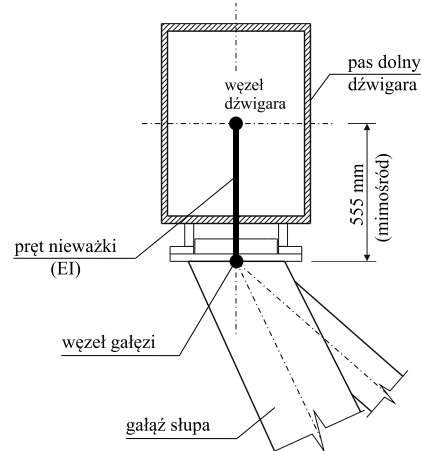


Rys. 2. Globalny model MES Terminalu (SOFiSTiK)

Fig. 2. The global FEM model of the Terminal (SOFiSTiK)

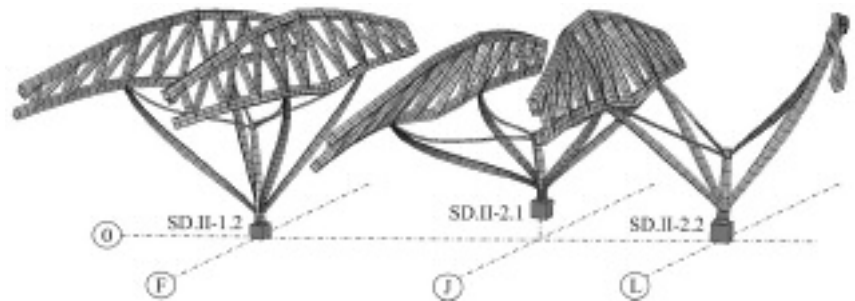
podatnych. W modelu przyjęto sztywne połączenie obu elementów z jednoczesnym uwzględnieniem rzeczywistego mimośrodowego oparcia (rysunek 3).

Obliczenia wykazały przekroczenie naprężeń granicznych w niektórych słupach, w rejonie ich połączenia z dźwigarem. Największe przekroczenie naprężeń w słupie SD. II-2.1 odnotowano w przypadku kombinacji obciążeń: ciężar własny + pokrycie dachu + śnieg usypany nierównomiernie. Maksymalne naprężenie osiągnęło wartość 375 MPa, a w stanie bezużytkowym (ciężar własny + pokrycie dachu) wartość charakterystyczna wyniosła 211 MPa.



Rys. 3. Schemat połączenia dźwigara ze słupem SD.II-2.1

Fig. 3. The connection scheme between the girder and the SD.II-2.1 column

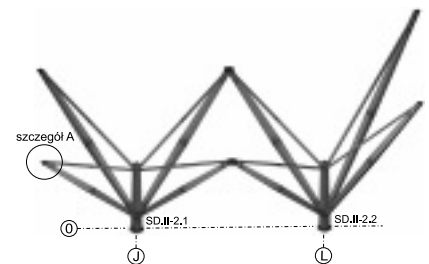


Rys. 4. Deformacja dźwigarów i słupów od obciążeń pionowych

Fig. 4. The deformation of girders and columns due to vertical loads

Analiza deformacji konstrukcji stalowej wywołana obciążeniami pionowymi (rysunek 4) pokazuje znaczne skręcanie dźwigarów głównych dachu. Jest to wynikiem ukształtowania geometrii dachu w postaci naprzemiennego połączenia „daszkowych” płatwi z pasami górnymi i dolnymi dźwigarów (fotografia 1). Skręcanie dźwigarów powoduje znaczne zginanie gałęzi słupów w rejonie ich wzajemnego połączenia (efekt przyjęcia styku niepodatnego), co jest główną przyczyną powstawania tak dużych naprężeń. Naprężenia od siły normalnej stanowią zaledwie 25% całkowitych naprężeń występujących w tej strefie.

Z uwagi na stwierdzone przekroczenie naprężeń granicznych przeprowadzono szczegółową analizę sprężysto-plastyczną słupów. Na rysunku 5 poka-



Rys. 5. Powłokowy model MES słupów SD.II-2.1 i SD.II-2.2

Fig. 5. The FEM shell model of columns SD.II-2.1 and SD.II-2.2

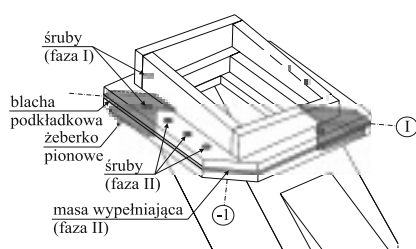
zono model powłokowy słupa SD.II-2.1 wraz ze słupem SD.II-2.2 (słupy wzajemnie połączone w wierzchołkach). Uwzględniono w nim wszystkie drugorzędne elementy konstrukcyjne (żebra, przepony) oraz otwory technologiczne. Założono idealnie sprężysto-plastyczny model materiału. Obciążenia realizowano w postaci wymuszeń kinematycznych przykładowych w wierzchołkach gałęzi słupów, które odpowiadały przemieszczeniom uzyskanym w modelu globalnym. Z mapy stref plastycznych od obciążeń obliczeniowych przy wierz-

chołku najbardziej wyęteżonej gałęzi słupa SD.II-2.1 (szczegół A na rysunku 5) oceniono, iż zakres stref plastycznych może zagrażać bezpieczeństwu konstrukcji, ponieważ występuje na całej grubości blach gałęzi. Analizy prowadzono w przypadku modeli „idealnych” – bez uwzględnienia imperfekcji (np. błędy w wytwórni, błędy montażowe, naprężeń spawalniczych itp.

### Modyfikacja połączenia dźwigara ze słupem

Uznano, iż należy wprowadzić zmiany konstrukcyjne w celu zredukowania naprężeń w problematycznych słupach. Analizy wykazały, że najbardziej efektywnym sposobem poprawy stanu wyęteżenia jest zredukowanie naprężeń pochodzących od zginania. Wprowadzenie przegubu w miejscu oparcia dźwigara na gałęziach słupa znacznie zmniejsza poziom naprężeń. W przypadku obciążeń stałych (ciężar własny + pokrycie dachu) uzyskano redukcję naprężeń charakterystycznych o 150 MPa (z 211 MPa do 61 MPa), a po dodatkowym uwzględnieniu obciążenia śniegiem, łączne naprężenia wyniosły 225 MPa (naprężenia od śniegu 163 MPa). Naprężenia obliczeniowe osiągnęły wartość 315 MPa, co w odniesieniu do naprężeń granicznych uznano za wynik satysfakcjonujący. Nie stwierdzono znacznego przyrostu naprężeń w pozostałych elementach konstrukcji stalowej dachu.

W wyniku dyskusji inwestora, projektanta i wykonawcy zmodyfikowano połączenie gałęzi z dźwigarem (rysunek 6). Pomiędzy blachy czołowe gałęzi i dźwigara, w osi obrotu, dodano blachy podkładowe, a w ich osi pionowe żeberka wzmacniające, przyspawane do środników i blachy czołowej gałęzi. Założono dwie fazy pracy styku:



Rys. 6. Modyfikacja oparcia dźwigara na gałęzi słupa SD.II-2.1 (opis w tekście)

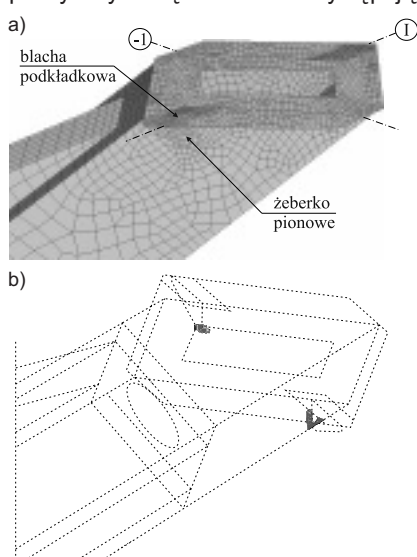
Fig. 6. The modification of the connection between the girder and the SD.II-2.1 column (description in the text)

■ I (obciążenie ciężarem własnym i pokryciem dachu) – połączenie przegubowe;

■ II (obciążenia zmienne) – połączenie sztywne.

Przyjęto, że przegub aktywny będzie jedynie w I fazie pracy. Po opuszczeniu konstrukcji z podpór tymczasowych i zakończeniu montażu zadaszenia i „ulożeniu się konstrukcji”, przegub zostanie zlikwidowany za pomocą blach klinowych i śrub lub wypełnienia masą syntetyczną o dużej wytrzymałości. Tym samym w II fazie pracy (obciążenia zmienne) połączenie otrzyma formę pionową i będzie pracowało jako niepodatne.

Zastosowanie blach podkładowych spowodowało, iż całe obciążenie w fazie I (ciężar własny + pokrycie dachu) przekazywane jest na bardzo małą powierzchnię, co wynika z nieznacznych wymiarów blach podkładowych. Istniała zatem obawa o nośność blach pionowych gałęzi w rejonie strefy docisku. Przyjęte rozwiązanie zweryfikowano obliczeniowo. W modelu powłokowym słupów uwzględniono wprowadzone zmiany konstrukcyjne (rysunek 7a). Reakcję pionową z dźwigara dachowego przyłożono do powierzchni blach podkładowych. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 7b. W gałęzi występują lokalne uplastycznienia. Rozmiary stref plastycznych są niewielkie i występują



Rys. 7. Weryfikacja przyjętego sposobu wzmocnienia: a) model MES; b) strefy uplastycznienia (naprężenia HMM w włóknach górnych powłok)

Fig. 7. The verification of the method of strengthening: a) the FEM model; b) the plasticity area (top of the shell)

jedynie przy dolnych narożach żeberek, w górnych włóknach elementów skończonych. Nie stwierdzono przekroczenia naprężeń granicznych na styku blachy czołowej i środnika oraz w blachach czołowych (podkładowych).

### Podsumowanie

W projektowaniu i analizie obiektów inżynierskich dąży się do opracowania modeli teoretycznych możliwie bliskich rzeczywistości. Kluczowym elementem każdego modelu są właściwie zdefiniowane założenia wstępne, które powinny odpowiadać przyjętym rozwiązaniom konstrukcyjnym (i odwrotnie). W modelowaniu konstrukcji należy przyjmować założenia, które bezpiecznie opisują rzeczywistość. Nie można zakładać podatności połączenia bez określenia jej stopnia [7]. Ze względu na trudności w ocenie podatności połączenia dźwigara ze słupem, zaliczono je do połączeń niepodatnych. Wykonano złożone analizy nośności, a w konsekwencji zmodyfikowano połączenie. Podjęte działania naprawcze nie były skutkiem zaistniałej awarii, lecz miały charakter prewencyjny. Prace realizowano w trakcie montażu konstrukcji dzięki konstruktywnej współpracy inwestora, projektanta, wykonawcy i nadzoru naukowego.

### Literatura

- [1] J. S. K. Architekti. 2013. Projekt architektoniczno-budowlany inwestycji „Budowa drugiego etapu drugiego terminala pasażerskiego w Porcie Lotniczym im. Lecha Wałęsy w Gdańsku wraz z pomostem Kolei Metropolitalnej oraz infrastrukturą”.
- [2] PN-90/B-03200. „Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.”
- [3] PN-82/B-02000. „Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości”.
- [4] PN-80/B-02010 oraz PN-80/B-02010/Az1. „Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie śniegiem”.
- [5] PN-EN 1991-1-3 Eurokod 1. „Oddziaływania na konstrukcje, część 1-3: Obciążenie śniegiem”.
- [6] PN-77/B-02011. „Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem”.
- [7] Wydawnictwo zbiorowe pod redakcją Jana Bródki i Aleksandra Kozłowskiego. 2013. „Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych”. DIK.
- [8] Żółtowski Krzysztof, Marek Szafranski, Waldemar Kirschen. 2014. „Analiza statyczna Terminala 2 Portu Lotniczego im Lecha Wałęsy w Gdańsku – Raport nr 1”. Politechnika Gdańska, Gdańsk.

Przyjęto do druku: 05.05.2016 r.