

ANALIZA NOŚNOŚCI KONSTRUKCJI STALOWEJ TERMINAŁA T2 PORTU LOTNICZEGO IM. LECHA WAŁĘSY W GDAŃSKU

MAREK SZAFRAŃSKI, *mszafra@pg.gda.pl*

KRZYSZTOF ŻÓŁTOWSKI

Politechnika Gdańska

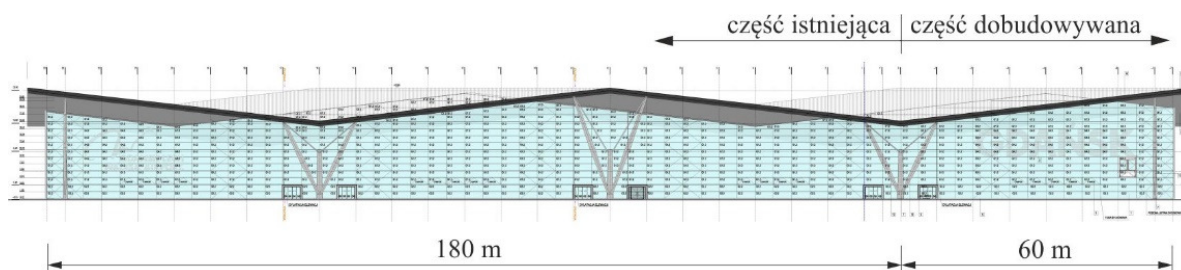
Streszczenie: W referacie przedstawiono rezultaty analiz nośności konstrukcji stalowej terminala T2 Portu Lotniczego im. Lecha Wałęsy w Gdańsku. Prace wykonano w ramach pełnionego przez autorów nadzoru naukowego nad procesem rozbudowy istniejącej części hali. Wnioski z analiz doprowadziły do modyfikacji rozwiązania konstrukcyjnego oparcia dźwigarów dachowych na wybranych słupach. Obliczenia przeprowadzono dla globalnego modelu belkowego terminala w konfiguracji docelowej oraz wycinkowych, powłokowych modeli szczegółowych, wykorzystując MES. W modelu globalnym uwzględniono zarówno część istniejącą jak i dobudowywaną budynek. Modele wycinkowe służyły szczegółowej ocenie nośności w strefach, gdzie stwierdzono przekroczenia naprężeń granicznych. W rezultacie wypracowano sposób wzmocnienia przeciążonych stref, który zrealizowano jeszcze w trakcie prowadzonych prac montażowych.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, analizy numeryczne, nośność konstrukcji, bezpieczeństwo konstrukcji.

1. Konstrukcja budynku terminala

Budynek terminala T2 (rys. 1) jest kluczowym elementem rozbudowy Portu Lotniczego w Gdańsku, mającej na celu zwiększenie liczby obsługiwanych pasażerów do 7 milionów rocznie. Inwestycja jest zatem ważna z punktu widzenia rozwoju Gdańska i całego regionu.

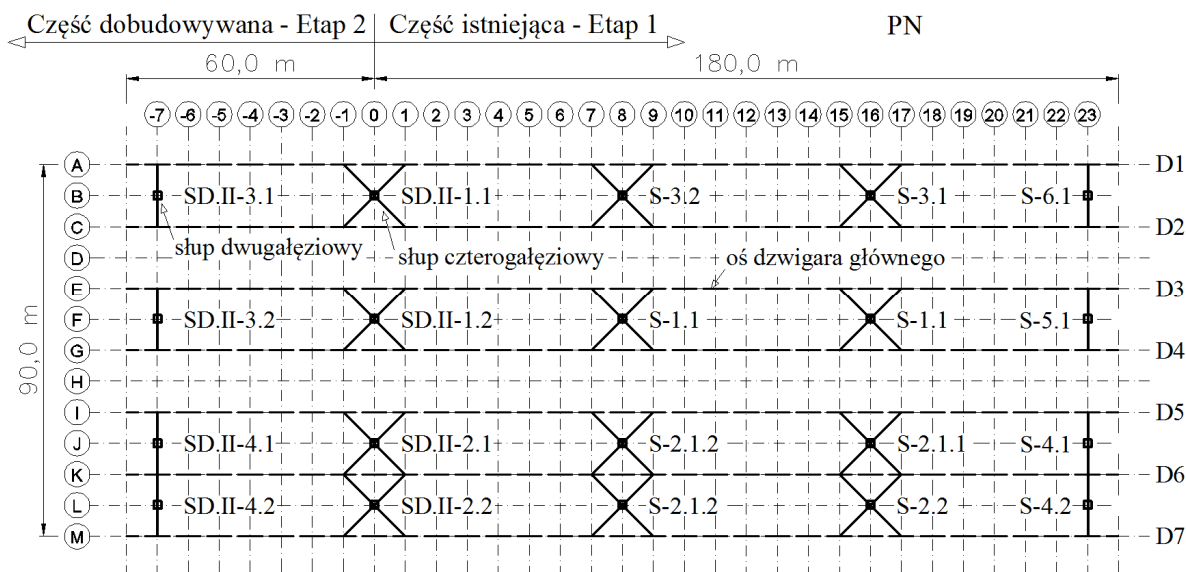
Budynek zaprojektowano jako jednoprzestrzenną halę, posiadającą trzy kondygnacje nadziemne i jedną podziemną. Konstrukcja budynku to struktura żelbetowa, słupowo-płytowa, przykryta stalowym dachem opartym na stalowych słupach wielogąłęziowych. Ściany zewnętrzne budynku (fasady) zaprojektowano o konstrukcji stalowej w układzie słupowo-ryglowym.



Rys. 1. Fasada północna budynku (wg projektu [1])

W rzucie, konstrukcja stalowa ma kształt regularny, prostokątny o wymiarach 240×90 m. Układ konstrukcyjny opisano na ortogonalnej siatce osi (rys. 2). Realizację inwestycji przewidziano w dwóch zasadniczych etapach:

- etap 1 (istniejący) – budowa części terminala w osiach „0– 23”, „A– M”,
- etap 2 – dobudowa części terminala w osiach „–7– 0”, „A– M”.



Rys. 2. Układ osi konstrukcyjnych budynku oraz rozmieszczenie słupów głównych

Dobudowywana część terminala (etap 2) została połączona bez dylatacji z częścią istniejącą (rys. 3a), tworząc wspólnie ciągły, przestrzenny układ ramowy. Elementami konstrukcji stalowej dachu są (rys. 3b):

- Dźwigary główne (D1–D7) – umieszczone w osiach A, C, E, G, I, K, M. Dźwigary wewnętrzne (D2–D6) zaprojektowano jako kratownicowe, o zmiennej wysokości, dostosowanej do geometrii dachu. Dźwigary skrajne (D1, D7) zaprojektowano jako belkowe o załamanej osi.
- Płatwie – belkowe, skrzynkowe o załamanej osi, rozmieszczone co 3,75 m, ortogonalnie do dźwigarów głównych. Płatwie opierają się naprzemiennie na pasach górnych i dolnych dźwigarów, kształtując w ten sposób układ załamanych płaszczyzn dachu.
- Elementy koszowe i kalenicowe – rury kwadratowe 160 x 10 mm poprowadzone między punktami załamania płatwi dachowych.
- Stężenia – pręty ciągnowe systemu Macalloy $\varnothing 24$ i $\varnothing 48$.



Rys. 3. Rozbudowa terminala: a) połączenie części istniejącej z częścią dobudowywaną (fasada północna), b) konstrukcja dachu

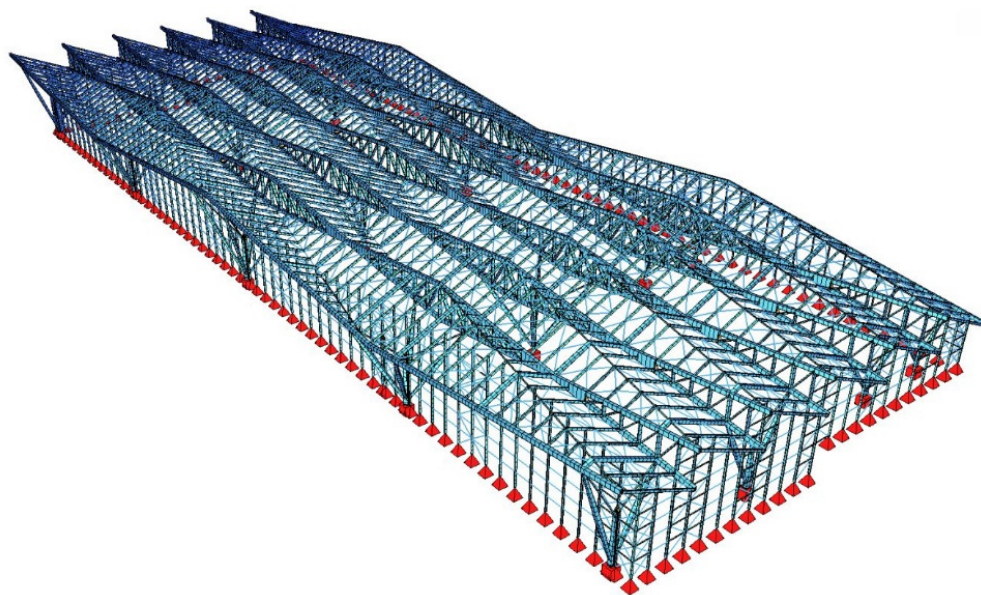
Konstrukcja dachu oparta jest na słupach dwu- i czterogłęziowych. Trzony słupów mają zróżnicowane, liniowo zbieżne na wysokości, przekroje poprzeczne (większe przy podstawie, mniejsze przy wierzchołku). Gałęzie wszystkich słupów zaprojektowano jako skrzynkowe, kwadratowe, także o liniowo zmiennym przekroju (największy przekrój występuje w środku

rozpiętości gałęzi). Wierzchołki gałęzi połączono z trzonem słupa rozporami o przekroju skrzynkowym. Trzony słupów są sztywno zamocowane w konstrukcji żelbetowej. Na wierzchołkach gałęzi opierają się dźwigary główne dachu.

Nietypowość konstrukcji oraz jej znaczenie dla Regionu, skłoniło Inwestora (Port Lotniczy w Gdańsku Sp. z o.o.) do podjęcia współpracy z Politechniką Gdańską w ramach nadzoru naukowego nad realizacją budowy. W ramach zadania wykonano m.in. obszerną analizę statyczno-wytrzymałościową obiektu, której wyniki i wnioski przedstawiono w dalszej części referatu.

2. Analiza modelu globalnego

Prowadzone analizy dotyczyły konstrukcji stalowej dachu oraz słupów głównych. Obliczenia przeprowadzono w programie SOFiSTiK. Model globalny obejmował istniejącą i dobudowywaną część terminala w konfiguracji docelowej. Model wykonano jako przestrzenny, prętowy model MES (rys. 4). Słupy główne, dźwigary dachowe, płatwie, belki koszowe i kalenicowe dachu oraz słupy i rygle fasad, wymodelowano za pomocą elementów belkowych (belka typu Timoszenki o 6-ciu stopniach swobody w każdym węźle). Stężenia dachowe oraz stężenia fasad (pręty typu Macalloy) wymodelowano jako elementy kablowe. Ogółem układ zdyskretyzowano na 22324 węzły, 23696 elementów belkowych, 2291 elementów kablowych. Parametry materiałowe przyjęto jak dla stali S355J2 zgodnie z dokumentacją projektową oraz [2].



Rys. 4. Globalny model MES konstrukcji stalowej terminala

Na podstawie studium dokumentacji projektowej przyjęto poniższe założenia.

- Warunki brzegowe (podpory):
 - podstawy słupów głównych – utwierdzone,
 - podstawy słupów fasad – przegubowo-nieprzesuwne.
- Dźwigary dachowe połączone sztywno z wierzchołkami gałęzi słupów (z uwagi na trudności w ocenie podatności, styki zastosowane do połączenia dźwigarów z gałęziami słupów zaliczono do połączeń niepodatnych).
- Płatwie dachowe w osiach „-7”, „-4”, „-1”, „1”, „4”, „7”, „9”, „12”, „15”, „17”, „20”, „23” połączone sztywno z pasami dźwigarów głównych, pozostałe płatwie połączone przegubowo,
- Belki koszowe i kalenicowe połączone przegubowo z płatwiami,

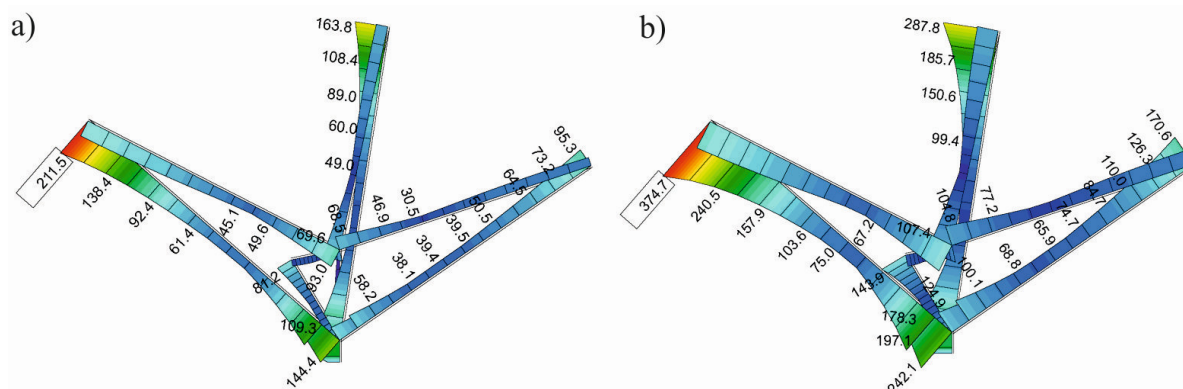
– Słupy fasady południowej, fasady zachodniej i fasady wschodniej połączone przegubowo z konstrukcją dachu, słupy fasady północnej połączone sztywno.

Uwzględniono obciążenia stałe oraz zmienne – środowiskowe: ciężar własny (CW), pokrycie dachu (WYP), równomierne obciążenie śniegiem (ŚNIEG R), obciążenie śniegiem z uwzględnieniem zasp śnieżnych (ŚNIEG NR), obciążenie wiatrem północnym (WIATR PN), obciążenie wiatrem południowym (WIATR PD), równomierne ogrzanie (TEMP +30) oraz równomierne oziębienie (TEMP -30). Definicje i wartości obciążeń przyjęto zgodnie z normami [3, 4, 5, 6]. Rozważono łącznie 34 kombinacje obciążeń. W tabeli 1 zestawiono trzy najważniejsze kombinacje wraz ze współczynnikami jednoczesności obciążeń: KOMB 1 – faza bezużytkowa (obciążenia stałe), KOMB 2 – prawdopodobna, najbardziej niekorzystna faza użytkowa (obciążenia stałe i zmienne – środowiskowe), KOMB 3 – faza użytkowa, którą rozważano jako zdarzenie awaryjne. Wytyżenia przekrojów elementów analizowano dla obciążeń charakterystycznych i obliczeniowych.

Tabela 1. Kombinacje obciążeń oraz współczynniki jednoczesności obciążeń

Obciążenie/ Kombinacja	CW	WYP	ŚNIEG NR	ŚNIEG R	WIATR PN	WIATR PD	TEMP -30	TEMP +30
KOMB 1	1,0	1,0	–	–	–	–	–	–
KOMB 2	1,0	1,0	1,0	–	–	–	–	–
KOMB 3	1,0	1,0	1,0	–	–	–	0,9	–

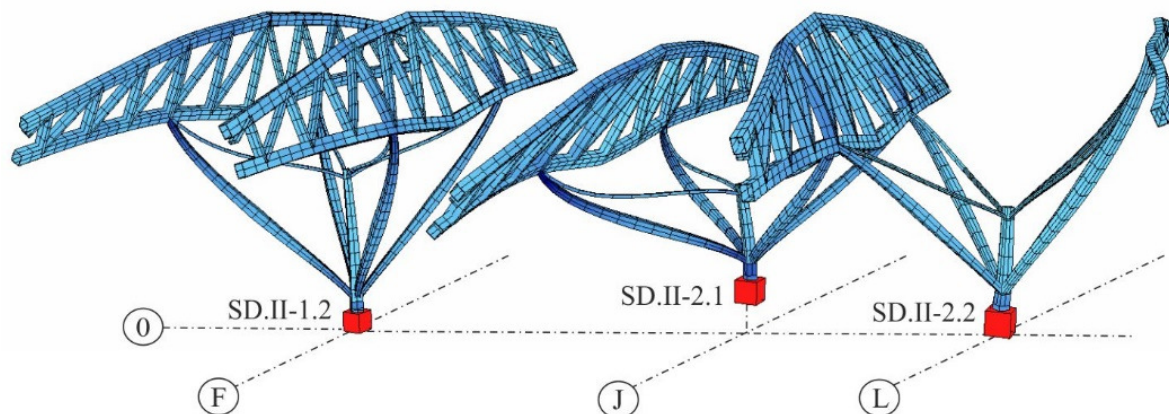
Na rys. 5 pokazano wykresy naprężeń (H-M-H) w słupie SD.II-2.1 dla kombinacji 1 i 2. W słupie tym zdiagnozowano największe przekroczenia naprężeń granicznych. Naprężenia charakterystyczne w stanie bezużytkowym (ciężar własny + pokrycie dachu) sięgają 211 MPa, a w fazie użytkowej (ciężar własny + pokrycie dachu + śnieg usypany nierównomiernie) nawet 375 MPa (maksymalne naprężenia od samego śniegu wynoszą 163 MPa).



Rys. 5. Naprężenia H-M-H w słupie SD.II-2.1: a) obciążenia stałe (KOMB 1), b) obciążenia stałe i zmienne (KOMB 2) – wartości charakterystyczne

Analiza deformacji konstrukcji stalowej wywołana obciążeniami pionowymi (rys. 6), pokazuje znaczne skręcanie dźwigarów głównych dachu. Jest to wynikiem ukształtowania geometrii dachu w postaci naprzemiennego połączenia „daszkowych” płatwi z pasami górnymi i dolnymi dźwigarów (por. rys. 3). Skręcanie dźwigarów (efekt zginania płatwi oraz sił rozporu przekazywanych na pasy), powoduje z kolei znaczne zginanie gałęzi słupów w rejonie ich połączenia z dźwigarami. Efekt ten widoczny jest szczególnie dla słupów „krótkich” usytuowanych wzdłuż osi „J” (duży kąt rozwarcia gałęzi).

Wspomniany stan zgięciowy gałęzi jest główną przyczyną powstawania tak dużych naprężeń w strefie ich połączenia z dźwigarami. Naprężenia pochodzące od siły normalnej stanowią zaledwie 25% całkowitych naprężeń występujących w tej strefie (dla kombinacji 2). Nie stwierdzono przekroczeń naprężeń granicznych w pozostałych elementach konstrukcji stalowej (dźwigary, płatwie, stężenia).

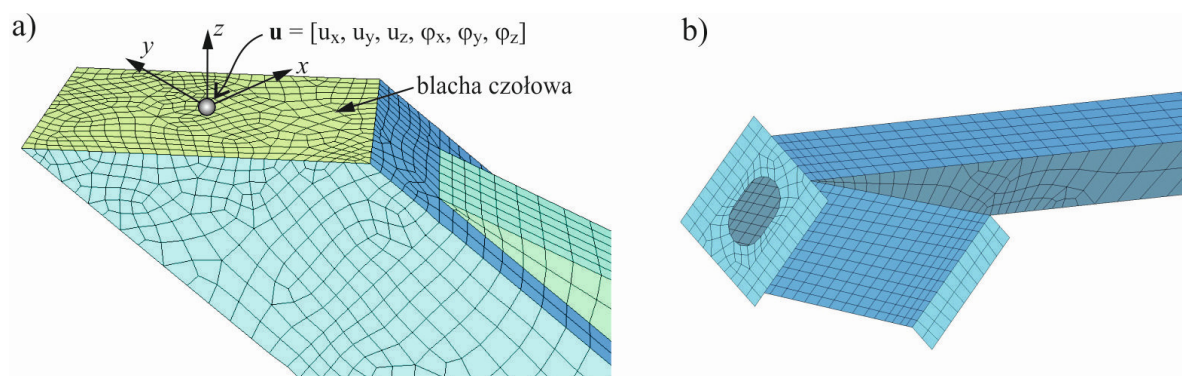


Rys. 6. Charakter deformacji dźwigarów i słupów od obciążeń pionowych

2. Analiza modeli szczegółowych

Z uwagi na stwierdzone przekroczenia naprężeń granicznych w modelu globalnym, przeprowadzono bardziej szczegółową analizę nośności przetęzonych słupów. Największe przekroczenia stwierdzono w gałęziach słupa SD.II-2.1, dlatego prezentację wyników ograniczono do tego przypadku.

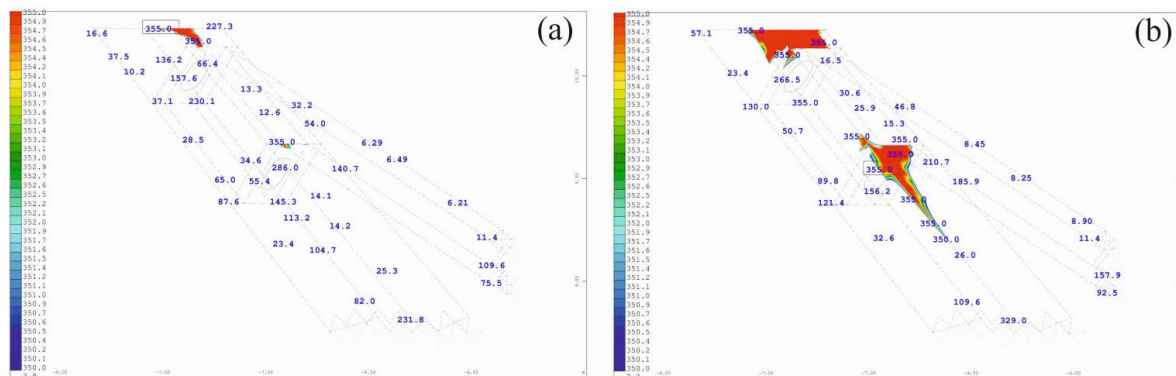
Wykonano powłokowy model MES słupa wraz ze słupem SD.II-2.2, z uwagi na ich wzajemne połączenie w wierzchołkach. W geometrii uwzględniono wszystkie drugorzędne elementy konstrukcyjne (żebra, przepony) oraz otwory technologiczne (rys. 7b). W analizach nieliniowych założono idealnie sprężysto-plastyczny model materiału. Obciążenia realizowano w postaci wymuszeń kinematycznych, odpowiadających przemieszczeniom węzłów gałęzi słupa, otrzymanym w modelu globalnym (rys. 7a).



Rys. 7. Powłokowy model MES słupa SD.II-2.1 (fragment przywierzchołkowy gałęzi „I/-1”)

Na rys. 8 pokazano mapy stref plastycznych przy wierzchołku gałęzi „-1/I” słupa SD.II-2.1, dla kombinacji 2 obciążeń (por. tab. 1). Oceniono, iż zakresy stref plastycznych (szczególnie w przypadku obciążeń obliczeniowych) mogą stwarzać zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji, ponieważ występowały na całej grubości blach gałęzi. Należy podkreślić, że

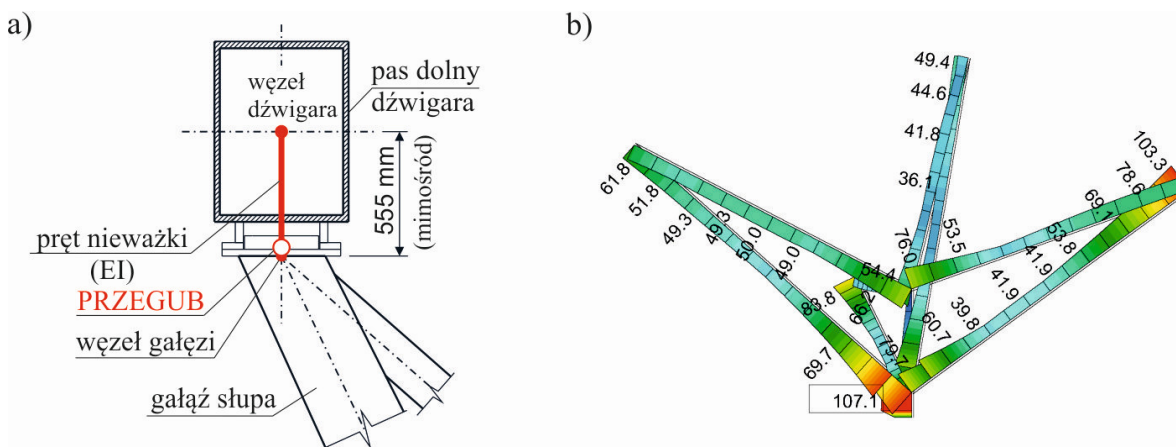
analizy prowadzone były dla modeli „idealnych” – bez uwzględnienia imperfekcji (np. błędy w wytwórni, błędy montażowe), naprężeń spawalniczych, itp.



Rys. 8. Zakresy uplastycznienia w gałęzi „-1/I” słupa SD.II-2.1 (kombinacja 2 obciążeń, naprężenia H-M-H we włóknach górnych powłoki): a) obciążenia charakterystyczne, b) obciążenia obliczeniowe

3. Modyfikacja połączenia dźwigara ze słupem

Należało wykonać projekt naprawy i wprowadzić zmiany konstrukcyjne, w celu zredukowania naprężeń w problematycznych słupach. Przeprowadzone analizy pokazały, że najbardziej efektywnym sposobem poprawy stanu wyężenia, jest zredukowanie naprężeń pochodzących od zginania. Przy wprowadzeniu przegubu w miejscu oparcia dźwigara D5 na gałęziach słupa SD.II-2.1 (rys. 9a), poziom naprężeń znacząco spada. W porównaniu z połączeniem sztywnym (por. rys. 5a), w fazie I pracy (ciężar własny + poszycie dachu), uzyskano redukcję naprężeń w przybliżeniu z 210 MPa na 60 MPa (rys. 9b) – spadek o ok. 150 MPa. Nie stwierdzono jednocześnie znaczącego przyrostu naprężeń w pozostałych elementach konstrukcji stalowej dachu. W przypadku sztywnego połączenia dźwigara z gałęziami słupa, naprężenia charakterystyczne od ciężaru śniegu wynoszą 163 MPa. Łącznie z fazą I pracy (połączenie przegubowe), naprężenia wyniosą zatem ok. 225 MPa (naprężenia obliczeniowe ok. 315 MPa). Stan taki, w odniesieniu do naprężeń granicznych, uznano za satysfakcjonujący.

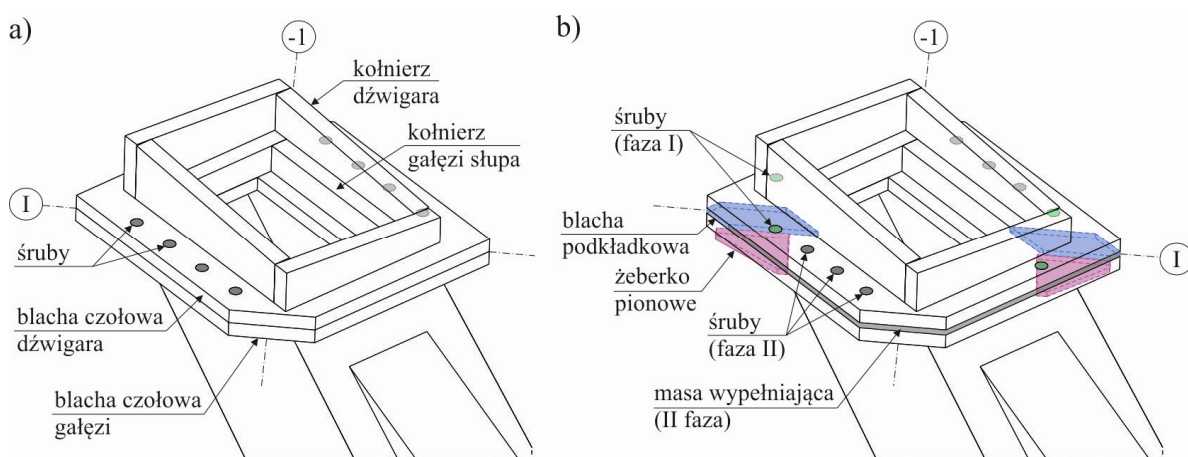


Rys. 9. Przegubowe połączenie dźwigara ze słupem: a) schemat ideowy, b) rozkład naprężeń H-M-H w fazie bezużytkowej (KOMB 1)

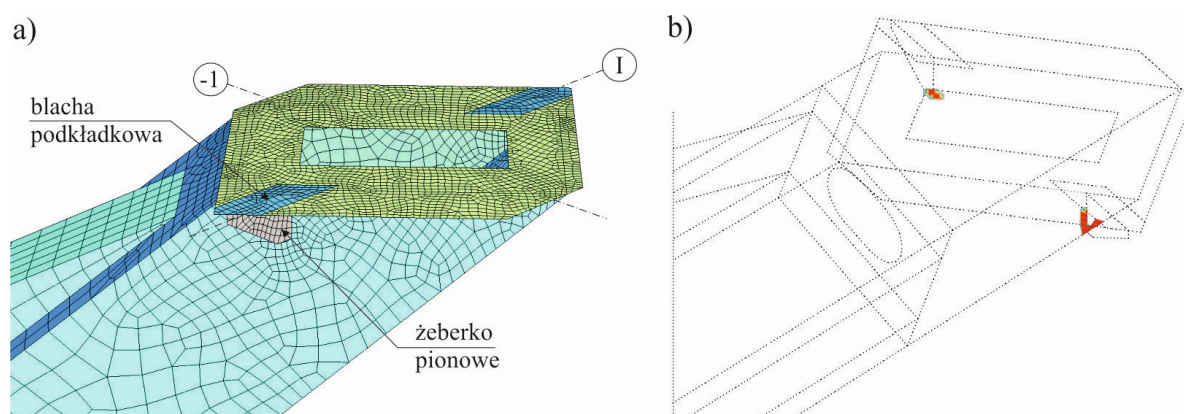
W rezultacie dyskusji z Inwestorem, Projektantem i Wykonawcą, Projektant opracował modyfikację połączenia, przybliżając rozwiązanie do oparcia przegubowego (rys. 10).

Założono, że przegub aktywny będzie jedynie w I fazie pracy (ciężar własny + pokrycie dachu). Po opuszczeniu konstrukcji z podpór tymczasowych i zakończeniu montażu zadaszewienia, po „ułożeniu 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 pierwotną i będzie pracowało jako niepodatne. Zabieg ten pozwoli ponadto na rozłożenie nacisków w fazie użytkowej na większą powierzchnię blachy czołowej gałęzi.

Zastosowane rozwiązanie zweryfikowano obliczeniowo (rys. 11). Celem było sprawdzenie nośności blach pionowych gałęzi w strefach docisku dźwigara z uwagi na fakt, iż całe obciążenie w fazie I (ciężar własny + wyposażenie) przekazywane jest na bardzo małym obszarze, wynikającym z rozmiarów blach podkładowych.



Rys. 10. Oparcie dźwigara na gałęzi słupa SD.II-2.1: a) rozwiązanie pierwotne (sztywne), b) rozwiązanie zmodyfikowane (przegub w I fazie)



Rys. 11. Weryfikacja zastosowanego wzmocnienia: a) model MES, b) obszary uplastycznienia (naprężenia H-M-H we włóknach górnych powłok)

W gałęzi występują spodziewane, lokalne koncentracje naprężeń. Rozmiary stref plastycznych są jednak niewielkie i występują jedynie w narożach, przy połączeniu wprowadzonych żeberk pionowych z blachami pionowymi gałęzi. Nie stwierdzono przekroczenia naprężeń granicznych w blachach czołowych gałęzi.

4. Podsumowanie

W referacie przedstawiono wybrane rezultaty przeprowadzonych analiz konstrukcji stalowej terminala. Analizy towarzyszyły pracom budowlanym i były na bieżąco dyskutowane w gronie Inwestora, Wykonawcy i Projektanta.

W projektowaniu i analizie obiektów inżynierskich dążymy do stworzenia modeli teoretycznych, możliwie bliskich rzeczywistości. Kluczowym elementem każdego modelu, są właściwie zdefiniowane założenia wstępne. Powinny one odpowiadać przyjętym rozwiązaniom konstrukcyjnym (i odwrotnie).

W modelowaniu konstrukcji należy zawsze przyjmować założenia, które w sposób pewny, czyli od strony bezpiecznej, opisują rzeczywistość. Nie może być miejsca na niepewność lub przypuszczenia.

Nie można zatem zakładać podatności połączenia bez określenia stopnia tej podatności [7]. Dlatego też, z uwagi na trudności w ocenie podatności rozważanych styków, zaliczono je do połączeń niepodatnych, wykonano złożone analizy nośności i w konsekwencji zmodyfikowano połączenie.

Należy zaznaczyć, że podjęte działania naprawcze nie były skutkiem zaistniałej awarii, lecz miały charakter prewencyjny.

Literatura

1. 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”, J.S.K. Architekci, styczeń 2013.
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. Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Wydawnictwo zbiorowe pod redakcją Jana Bródki i Aleksandra Kozłowskiego. DIK. 2013.

LOAD CAPACITY ANALYSIS OF THE STEEL STRUCTURE OF THE TERMINAL 2 OF THE LECH WAŁĘSA AIRPORT IN GDAŃSK

Abstract: The paper presents the results of the load capacity analysis of the terminal 2 of the Lech Wałęsa Airport in Gdansk. The steel structure of the hall is concerned, eg. roof structure and columns. The analysis was carried out in the framework of the scientific supervision, performed by the authors during the construction process. The FEM model of the whole structure was analyzed. The existing part, as well as the built part of the structure were taken into account, because of their final connection (without dilatation). The stress exceeding was found out in some columns, and for this reason, partial, shell models of the columns were made up. Nonlinear analysis was performed and the size of plastic areas were identified. As a result of the analysis, a modification of the girder-column connection was developed and executed.

Keywords: steel structures, numerical analysis, load capacity, safety of the structure.