

Artykuł „Wpływ błędów projektowo-wykonawczych na awarię konstrukcji nośnej dachu hali stalowej” został wygłoszony podczas drugiej Ogólnopolskiej Konferencji „Problemy techniczno-prawne utrzymania obiektów budowlanych” zorganizowanej przez Głównego Inspektora Nadzoru Budowlanego w styczniu br.

dr inż. Sławomir Onopiuk\*

prof. dr hab. inż. Adam Stolarski\*

## Wpływ błędów projektowo-wykonawczych na awarię konstrukcji nośnej dachu hali stalowej

Wymiarowanie konstrukcji nośnej budynku lub budowli ze względu na oddziaływanie typowych obciążeń obliczeniowych jest powszechną procedurą projektową. W sytuacjach wyjątkowych może jednak wystąpić **oddziaływanie niestandardowego obciążenia**. Jednym z takich obciążeń jest ciężar wody opadowej, gromadzącej się wskutek niesprawności instalacji odwodnieniowej na płaskim dachu hali stalowej. Niestandardowość tego obciążenia wynika głównie ze współzależności między jego rozkładem i intensywnością a geometrią deformującego się przekrycia dachowego. Dodatkowo, zwiększające się wielkości ugięć elementów nośnych dachu wpływają na obniżenie sztywności jego poszczególnych stref konstrukcyjnych. Szczególnie wrażliwe na oddziaływanie nierównomiernie rozłożonych obciążeń są dachy o nieregularnym układzie konstrukcyjnym, z występującymi lokalnie dużymi rozstawami elementów podporowych. Niesprawność instalacji odwodnieniowej dotyczy przede wszystkim, tak jak w przedstawianym przypadku, płaskich, wielkopowierzchniowych dachów, wyposażonych w instalacje podciśnieniowe, szczególnie wrażliwe na błędy projektowe i wykonawcze.

Analiza nośności dachu w warunkach oddziaływania niestandardowego obciążenia wymaga rozpatrzenia wielu, kolejno następujących po sobie sytuacji obliczeniowych, wyodrębnienia sytuacji krytycznej, w której teoretycznie powinno dojść do awarii konstrukcji i porównania jej z dopuszczalnymi normowo, klasycznymi sytuacjami obciążeniowymi. **Inspiracją do przedstawienia analizy zachowania się konstrukcji dachu przy działaniu nietypowego obciążenia było zawalenie się części przekrycia dachowego w hali magazynowej o konstrukcji stalowej w czerwcu 2009 r., jakie miało miejsce w jednej z podwarszawskich miejscowości** (autorzy artykułu wykonali ekspertyzę techniczną, mającą na celu ustalenie przyczyn tej katastrofy).

### Opis konstrukcji przekrycia dachowego

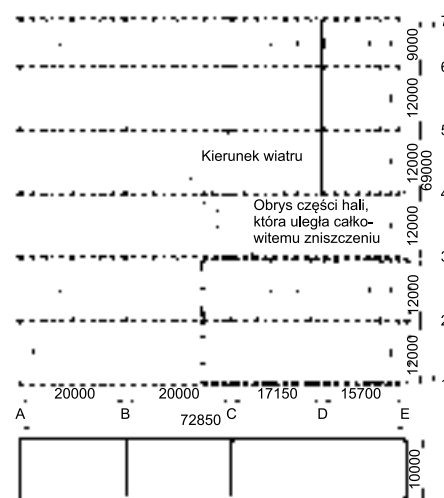
Na rysunku przedstawiono rzut poziomy oraz przekrój poprzeczny hali magazynowej (obiektu jednokondygnacyjnego) z przekryciem dachowym o konstrukcji stalowej. Szczegółowej analizie poddano fragment przekrycia, zawarty między osiami 1, 4, C i E, obejmujący zasięgiem pole, które uległo zawaleniu. Wzdłuż osi 1 oraz osi 4 pomiędzy osiami D i E usytuowana jest ściana o konstrukcji żelbetowo-murowej. Sztywna konstrukcja ściany zewnętrznej w osi 7 jest typowa dla ścian szczytowych w halach stalowych. Punktowe podpory wewnętrzne konstrukcji nośnej dachu hali stanowią słupy stalowe, usytuowane na przecięciach osi konstrukcyjnych. W płaszczyźnie ściany

zewnętrznej w osi E usytuowane są słupy żelbetowe. Czynnikiem wprowadzającym silną nieregularność w układzie konstrukcyjnym jest brak słupów na przecięciu osi D z osiami 2 i 3 (spowodowany względami użytkowymi).

Wzdłuż osi 2, 3, 4, 5, 6 pomiędzy osiami A i D, elementy nośne konstrukcji przekrycia stanowią dźwigary blachownicowe o różnym przekroju poprzecznym. Ze względu na brak słupów podporowych w osi D, dźwigary w osiach 2 i 3 wykazują znacznie mniejszą sztywność w przęsłach między osiami C i E, w stosunku do pozostałych fragmentów konstrukcji nośnej.

**Wskutek niedoszacowania przez projektanta obciążeń obliczeniowych, konstrukcja dźwigarów w omawianych fragmentach nie spełniała nawet wymagań stanu granicznego użyteczności.** Fakt ten wpłynął na zainicjowanie i rozwój awarii dachu.

W środkowej części obszaru objętego awarią woda opadowa gromadziła się, na skutek niesprawności podciśnieniowej instalacji odwodnieniowej, w naturalnej niecce, która wytworzyła się pod wpływem obciążenia przekryciem dachowym. W belkach płatwiowych, występujących w obrębie analizowanego fragmentu połączy dachowej, zarówno trój-, jak i sześcioprzęsłowych, wszystkie podpory skrajne należy traktować jako niepodatne pod względem przemieszczeń pionowych. Podpory wewnętrzne, w postaci dźwigarów blachownicowych, są podporami podatnymi sprężystość. Jak już wspomiano, wskutek braku słupów wewnętrznych pośrednich w osi D, szczególnie dużą podatność wykazują podpory w osiach 2 i 3 w części środkowej pola zawartego między osiami C i E. Wyniki obliczeń numerycznych wykazały, że pominięcie znacznej odkształcalności dźwigarów blachownicowych spowodowało nawet o 30% zaniżenie obliczeniowych wartości naprężeń w belkach płatwiowych. Na to nałożył się błąd lub też zamierzone, ale niezaprojektowane przez projektanta konstrukcji, zastosowanie przez wykonawcę belek płatwiowych ze stali o granicy plastyczności 250 MPa, zamiast projektowanej 320 MPa. Belki płatwiowe z zimmnogiętych pro-



Schemat konstrukcji dachu hali

\* Wojskowa Akademia Techniczna



**Połączenie belki płatwiowej z dźwigarem blachownicowym (po awarii)**

minimalnego poziomu, wynikającego jedynie z podatności skrętnej dźwigarów blachownicowych (fotografia). Skonstruowane zostało bardzo sztywne połączenie płatwi z dźwigarami blachownicowymi, co doprowadziło do dodatkowego obrotu skrętnego dźwigarów na skutek obrotu w płaszczyźnie zginania skrajnych przęseł belek płatwiowych trójprzęsłowych oraz odpowiadających im przęseł w belkach płatwiowych sześcioprzęsłowych, wywołanego różnicą poziomów podpór.

### Analiza przebiegu awarii dachu

Awaria stalowej konstrukcji nośnej dachu hali magazynowej polegała na zniszczeniu (zawaleniu się) części połaci dachowej po utracie stateczności i nośności jednego z głównych elementów konstrukcyjnych przekrycia – dźwigara blachownicowego w osi 2, na odcinku między osiami C i E (rysunek). **Bezpośrednią przyczyną utraty stateczności i nośności dźwigara dachowego było zniszczenie najbardziej wyężonych belek płatwiowych przez lokalne uplastycznienie blachy lub utratę stateczności miejscowej ściskanych ścianek profilu.** W niestężonych ściskanych ściankach pasa profilu zetowego wystąpiły efekty tzw. niestateczności dystorsyjnej, będącej formą pośrednią pomiędzy miejscową a ogólną giętno-skrętną utratą stateczności.

**Awaria dachu hali nastąpiła podczas intensywnego opadu deszczu, połączonego z silnym wiatrem** o kierunku powodującym przetaczanie się wody opadowej ze znacznego obszaru dachu hali w stronę obszaru, który uległ zawaleniu. Dzięki zarejestrowanemu obrazowi z kamery przemysłowej możliwa była ocena kierunku wiatru, a więc i kierunku przetaczania wody opadowej, zmienności prędkości wiatru oraz wzrostu natężenia opadu, aż do chwili awarii. W czasie zarejestrowanym przez kamerę przemysłową opady deszczu charakteryzowały się zmiennym, narastającym natężeniem. Oceniono, że do chwili awarii opad atmosferyczny trwał przez 32 min. Przyjęto, że uśredniona intensywność opadu deszczu wynosiła 25 mm/h. Biorąc pod uwagę zarejestrowany czas opadu atmosferycznego oraz efekt spiętrzenia wody podwyższono uśrednioną chwilową wartość intensywności do 40 mm/h. Należy zaznaczyć, że zgodnie z zaleceniami normowymi natężenie opadu wynoszące 40 mm/h, czyli  $111 \text{ dm}^3/(s \times \text{ha})$  stanowi jedynie niewiele ponad 30% natężenia miarodajnego  $300 \text{ dm}^3/(s \times \text{ha})$ , przyjmowanego do obliczeń projektowych instalacji odwodnienia.

**Przyczyną niesprawności instalacji odwodnieniowej tkwią w błędnych rozwiązaniach projektowych, a właściwie w założeniach do projektu oraz w wadliwym wykonawstwie.** Projektant instalacji odwodnieniowej na etapie wstępnego projektowania założył, że rozdział wody na poszczególne wpusty dachowe będzie wprost proporcjonalny do powierzchni pola przypadającego na dany wpust. Kształt dachu w trakcie jego deformowania uniemożliwił realizację tego założenia. Na wpust leżący w centrum krytycznego obszaru, tj. w osi D pomiędzy osiami 2 i 3, przypadała woda z powierzchni  $883 \text{ m}^2$ , a na sąsiednie wpusty co najwyżej z powierzchni ok.  $70 \text{ m}^2$ .

fili zetowych teoretycznie powinny opierać się na dźwigarach blachownicowych w sposób przegubowy, z możliwością obrotu w płaszczyźnie pionowej w konstrukcyjnie dopuszczalnym zakresie. Na skutek nie tyle błędów projektowych, co „obniżonej świadomości” projektanta w konsekwencji zakres obrotu płatwi został ograniczony do minimalnego poziomu, wynikającego jedynie z podatności skrętnej dźwigarów blachownicowych (fotografia). Skonstruowane zostało bardzo sztywne połączenie płatwi z dźwigarami blachownicowymi, co doprowadziło do dodatkowego obrotu skrętnego dźwigarów na skutek obrotu w płaszczyźnie zginania skrajnych przęseł belek płatwiowych trójprzęsłowych oraz odpowiadających im przęseł w belkach płatwiowych sześcioprzęsłowych, wywołanego różnicą poziomów podpór.

Warunkiem sprawnego działania instalacji odwodnieniowej podciśnieniowej w przypadku jednego typu wpustów dachowych jest jednakowe ich obciążenie wodą. W przypadku analizowanego obiektu instalacja odwodnieniowa mogła funkcjonować co najwyżej jak grawitacyjna [1], a wydajność przewodów odprowadzających wodę z dachu w warunkach działania instalacji, jako grawitacyjnej, była zbyt mała. Ponadto stwierdzono, że światło przewodów instalacji zostało zmniejszone przez „kryzy” wewnętrzne, w postaci pierścieni wykształconych z tworzywa sztucznego w trakcie łączenia, przez podgrzewanie, kształtek rurowych. Przyjęto, że przepustowość obliczeniowa krytycznego wpustu wynosiła średnio  $1,2 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Po upływie 32 min opadu deszczu, do odprowadzenia z dachu przyległego do krytycznego wpustu pozostało ok. 16,5 tys. l wody, co na powierzchni  $883 \text{ m}^2$  daje zastępcze równomiernie rozłożone obciążenie od ciężaru wody grubości warstwy 18,7 mm. Założono, że w chwili awarii woda z obszaru  $883 \text{ m}^2$  zebrała się w niecce o kształcie zbliżonym do czaszy kulistej o promieniu podstawy 9 m i głębokości 13 cm. W chwili awarii obliczeniowe maksymalne ugięcie dachu wyniosło ok. 18 cm. Ugięcia na obwodzie koła średnicy 18 m, o środku w punkcie maksymalnego ugięcia, wynoszą ok. 5 cm. Różnica pomiędzy tymi wielkościami ugięć odpowiada więc założonej głębokości niecki 13 cm.

### Wnioski z komputerowej analizy obliczeniowej

Do obliczeń statycznych układu nośnego przekrycia dachowego hali zastosowano program komputerowy Robot, wykorzystujący zasady metody elementów skończonych. Obliczenia wykonano metodą analizy nieliniowej, uwzględniającej duże przemieszczenia konstrukcji. Rozpatrywano sprężysty zakres deformacji, powszechnie stosowany w obliczeniach inżynierskich i z powodzeniem pozwalający na identyfikację awaryjnego stanu konstrukcji. Przeanalizowano przestrzenny model układu nośnego dachu złożonego z dźwigarów blachownicowych, belek płatwiowych oraz stężeń międzypłatwiowych. Słupy układu nośnego potraktowano jako podpory układu konstrukcyjnego. Uwzględniono obciążenie stałe od ciężaru dachu i instalacji oraz obciążenie ciężarem wody, zalegającej na dachu w chwili awarii. Obciążenie ciężarem wody w kształcie czaszy kulistej zostało aproksymowane obciążeniem odcinkowo równomiernie rozłożonym na belkach płatwiowych, objętych zasięgiem czaszy.

Analiza maksymalnych (głównie ściskających) naprężeń normalnych w wybranych punktach układu konstrukcyjnego dowiodła, że na obszarze obejmującym powierzchnię czaszy z wodą zarejestrowano w płatwiach w części środkowej przęseł między osiami 2 i 3 maksymalne naprężenia ściskające o wartościach przekraczających 250 MPa. Maksymalna wartość naprężeń wyniosła 302 MPa. Wobec granicy plastyczności stali płatwi wynoszącej ok. 250 MPa, obliczone naprężenia są z całą pewnością naprężeniami wywołującymi trwale plastyczne deformacje obniżające nośność i sztywność układu płatwiowego. Nieusztynione ścianki ściskane zetowników zimmogiętych tracą stateczność przy naprężeniach dużo mniejszych od granicy plastyczności [2].

Ocena deformacji układu konstrukcyjnego, przeprowadzona podczas wizji lokalnych hali, pomimo utrudnień z uwagi na nakładanie się efektów deformacyjnych od działania obciążenia wodą (łącznie z ciężarem dachu i instalacji) oraz od samego upadku dachu, potwierdziła wnioski z analizy obliczeniowej.

### Literatura

- [1] Chudzicki J., Sosnowski S., Instalacja kanalizacyjna. Projektowanie, wykonanie, eksploatacja, Wydawnictwo „Seidel – Przywecki”, Warszawa 2004.
- [2] Bródka J., Broniewicz M., Giżejowski M., Kształtowniki gięte. Poradnik projektanta, Polskie Wydawnictwa Techniczne, Rzeszów 2006.