

ADAM KLIMEK
Politechnika Wrocławska

BŁĘDNY SCHEMAT STATYCZNY PRZYCZYNĄ AWARII ZADASZENIA

1. WSTĘP

W artykule przedstawiono przypadek awarii wiaty o konstrukcji stalowej, która miała miejsce w grudniu 2012 r. po dużych opadach śniegu w miejscowości Winnica na Ukrainie. Omówiono pierwotne projektowe rozwiązanie konstrukcyjne oraz wprowadzone na budowie rozwiązanie zamienne, w którym siły wewnętrzne wyznaczono opierając się na błędnym schemacie statycznym. Omówiono znaczenie uproszczeń wykonawczych, które wraz z błędami obliczeniowymi zadecydowały o awarii całej konstrukcji. Podkreślono znaczenie ważności doboru prawidłowych schematów statycznych na etapie projektowania oraz nadzoru autorskiego w fazie wykonawstwa.

2. PIERWOTNE ROZWIĄZANIE PROJEKTOWE WIATY

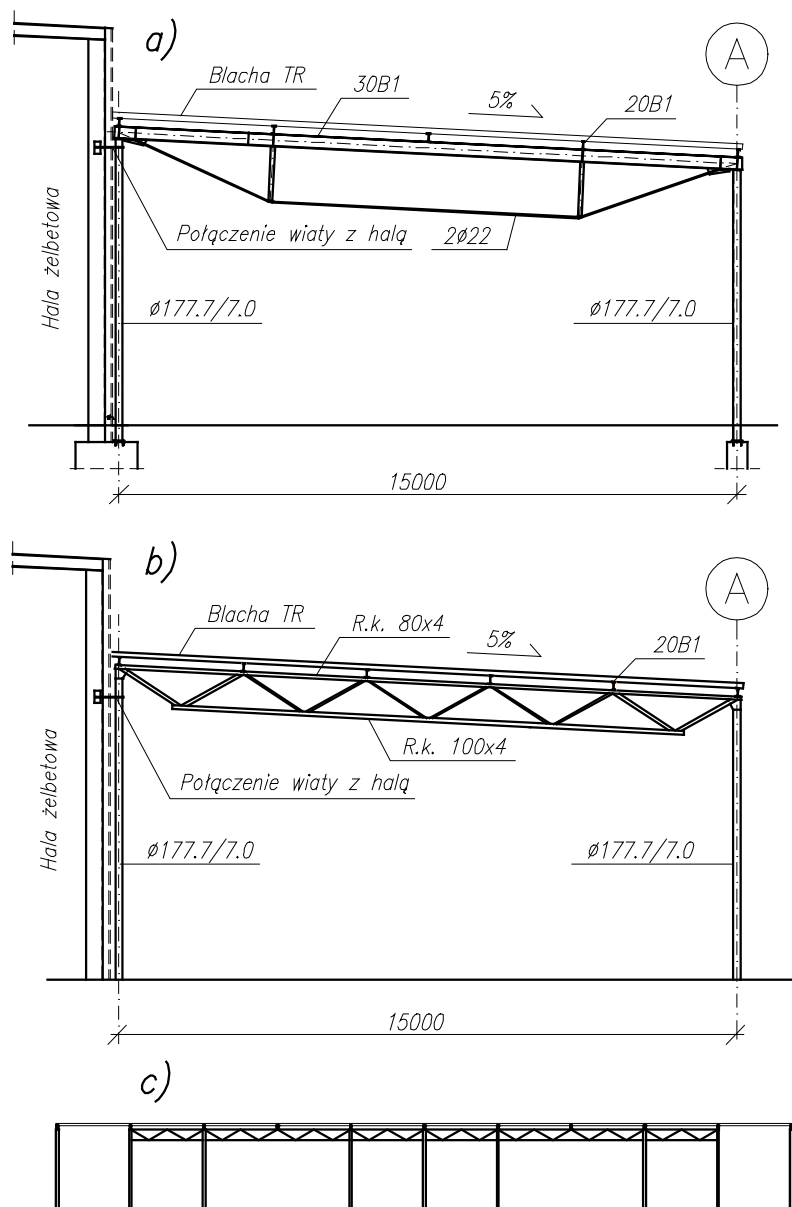
Wiata została wybudowana w 2006 r. w miejscowości Winnica na Ukrainie. Jest ona dobudowana do hali żelbetowej i pełni rolę zadaszenia dla samochodów dostawczych. Dach wiaty jest lekki, kryty blachą trapezową, ułożoną w spadku 5% na płatwiach. Ma wymiary 15.5x60.0 m. Wszystkie ściany wiaty są ażurowe, nieobudowane, z wyjątkiem ściany hali produkcyjnej, do której przylega wiata (rys. 1).



Rys. 1. Wykonana konstrukcja wiaty (2006 r.)

Fig. 1. Executed structure of the shed (year 2006)

Pierwotne, opracowanie przez autora rozwiązanie konstrukcji wiaty przedstawiono na rysunku 2a. Wiatą miała składać się z 11 dźwigarów cięgowych, rozmieszczonych na długości wiaty w rozstawach co 6.0 m. Dźwigary te zaprojektowano z dwuteowych rygli, podpartych 2 słupkami z rur kwadratowych 80x4. Rolę rozciąganego pasa dolnego miało pełnić cięgno, wykonane z 2 prętów o średnicy 22 mm. Oparcie blachy trapezowej zaplanowano na 5 dwuteowych płatwiach, które miały pełnić również rolę elementów przeciwdziałających zwichrzeniu pasów górnych dźwigarów. Każdy z dźwigarów został w tym rozwiązaniu oparty na 2 słupach z rur okrągłych. W konstrukcji nie zastosowano żadnych stężeń. Sztywność przestrzenną konstrukcji uzyskano poprzez połączenie obejmami z prętów, przechodzącymi przez obudowę hali (rys 2a), skrajnych słupów stalowych wiaty ze słupami żelbetowymi hali. Dla zewnętrznego rzędu słupów w osi A uwzględniono ich poziome podparcie tarczą dachową wiaty, składającą się z blachy trapezowej i płatwi, przekazującą siły statecznościowe na przeciwny rząd słupów, połączonych z konstrukcją żelbetową hali.

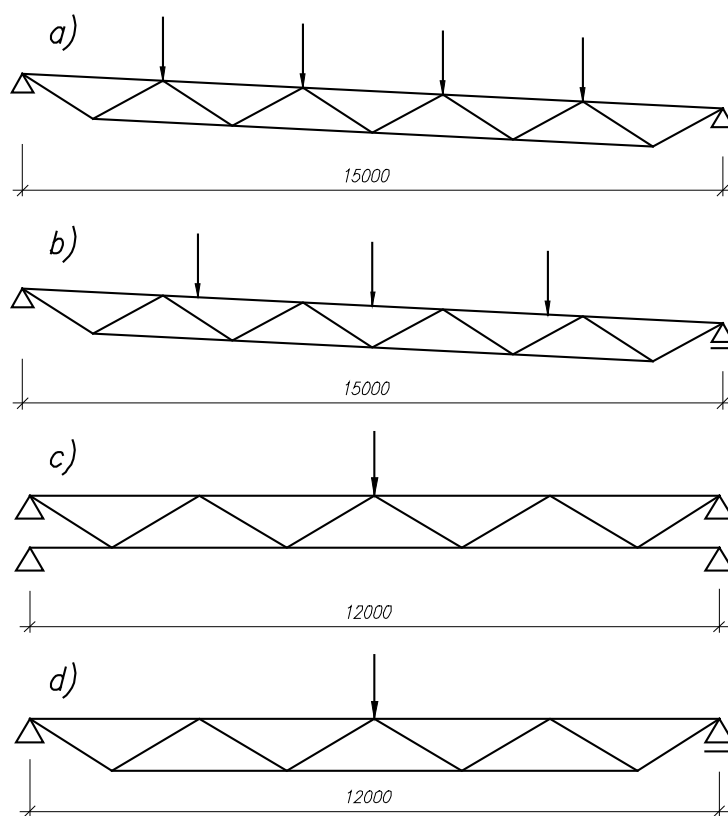


Rys. 2. Wiaty: a) pierwotne rozwiązanie projektowe, b) zmienione rozwiązanie projektowe, c) podłużny układ konstrukcyjny w osi A w zmienionym rozwiązaniu

Fig. 2. Shed: a) original design, b) changed design, c) changed design, longitudinal cross-section along the axis A

3. ZAMIENNE ROZWIĄZANIE PROJEKTOWE WIATY

Pierwotne rozwiązanie konstrukcji wiaty zostało przez inwestora zmienione (rys. 2b, 2c, rys. 3). Z pierwotnego projektu zachowano spadek i poziom dachu, profile słupów wraz z ich połączeniami ze słupami żelbetowymi hali, rozstawy dźwigarów oraz profile płatwi. Zmieniono natomiast konstrukcję dźwigarów na kratownicową z rur kwadratowych, poza tym ze względów użytkowych usunięto dwa z zewnętrznych słupów, które zastąpiono w tych miejscach podciągami kratownicowymi. Ze względu na układ węzłów kratownic dachowych zmniejszono rozstawy pomiędzy płatwiami z 3.75 do 3.00 m (zastosowano 6 zamiast 5 płatwi). W nowym rozwiązaniu konstrukcyjnym również nie zastosowano stężeń.



Rys. 3. Schematy statyczne w zmienionym rozwiązaniu projektowym: a) obliczeniowy schemat dźwigara w projekcie zamiennym, b) rzeczywisty schemat dźwigara wykonanego na budowie, c) obliczeniowy schemat podciągu kratownicowego w osi A, d) rzeczywisty schemat podciągu kratownicowego w osi A

Fig. 3. Statical diagrams of changed design: a) diagram of the truss used for calculation, b) diagram of the executed truss, c) diagram of the girder in axis A, used for calculation, d) diagram of the executed girder in axis A

Wraz z zastosowaniem nowego układu konstrukcyjnego uzyskano zwiększenie wysokości użytkowej wiaty o 60 cm, ponieważ zaprojektowane kratownice dachowe miały wysokość w osiach profili 90 cm, podczas gdy pierwotne dźwigary ciągnowe miały analogiczną wysokość 1.50 m. Ponadto uzyskano lepszy efekt wizualny oraz zmniejszenie ciężaru dźwigarów o 30%. Dzięki usunięciu 2 słupów w rzędzie zewnętrznym w osi A, konstrukcję poprawiono pod względem komunikacyjnym (rys. 1, 2c).

Przyjęte do analizy wytrzymałościowej schematy statyczne przeprojektowanej konstrukcji przedstawiono na rys. 3a i 3c. W tym przypadku popełniono następujące błędy:

- schemat statyczny dźwigara (rys. 3a, obie podpory nieprzesuwne) nie może wystąpić w rzeczywistości ze względu na odkształcalność słupów; należało przyjąć schemat wolnopodparty, z jedną podporą przesuwną,
- analogicznie błędnie przyjęto schemat statyczny podciągu kratownicowego w osi A (rys. 3c, podpory nieprzesuwne jak dla kratownicy wieloprzęsłowej), ze względu na zbyt słabe połączenia obu pasów w miejscach podpór – zastosowano tu połączenia zakładkowe 2 śrubami M16 przez blachy o grubości 8 mm, w których naprężenia dociskowe śrub do blach wynosiły prawie 600 MPa; należało zatem przyjąć schemat wolnopodparty, który przedstawiono na rysunku 3d.

4. DALSZE ZMIANY WPROWADZONE NA BUDOWIE

Pomimo zmienionego rozwiązania projektowego na budowie dokonano dalszych zmian, które polegały na zwiększeniu rozstawów płatwi. Przyczyną dokonanej zmiany było błędne zamówienie długości arkuszy blachy trapezowej. Gdyby nie zwiększono rozstawów płatwi łączenie blachy wypadłoby w środku dźwigara pomiędzy płatwiami. Problem ten rozwiązano sytuując środkową płatwę w miejscu łączenia blach, a kolejne płatwie w 1/4 długości oraz na skrajach dźwigara. W ten sposób doprowadzono do powstania następujących niekorzystnych zjawisk:

- przekazano siły skupione (reakcje) z płatwi na pas górny dźwigara pomiędzy węzłami, powodując jego zginanie (rys.32b);
- zwiększono długość wybočeníową pasa górnego z 3.00 do 3.75 m.

5. KONSEKWENCJE WYTRZYMAŁOŚCIOWE POPEŁNIONYCH BŁĘDÓW PROJEKTOWYCH I WYKONAWCZYCH

Obliczone przyrosty sił oraz wyteżenia elementów konstrukcyjnych, powstałe w wyniku dokonanych zmian, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Efekty wytrzymałościowe błędów popełnionych w zamiennym rozwiązaniu konstrukcji wiaty

Table 1. The stress results as consequence of errors in changed design

Dźwigar, $l = 15.0$ m		
Rodzaj błędu	Efekt wytrzymałościowy	Wytężenie elementu w rzeczywistym schemacie statycznym
Przyjęcie schematu nie-przesuwne	Zwiększenie siły ściskającej w pasie górnym o 210%	2.7
Zwiększenie rozstawów płatwi	Powstanie momentu zginającego w pasie górnym, zwiększenie długości wybojczy pasy górnej	4.1
Podciąg kratownicowy w osi A, $l = 12.0$ m		
Przyjęcie schematu nie-przesuwne	Zwiększenie siły ściskającej w pasie górnym o 200%	1.7

6. MECHANIZM ZNISZCZENIA KONSTRUKCJI WIATY

W chwili awarii na dachu wiaty spoczywała warstwa częściowo zleżalego śniegu o grubości około 1 m. Konstrukcję wiaty po wykonaniu oraz po zniszczeniu przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Proces zniszczenia wiaty rozpoczął się prawdopodobnie od przekroczenia nośności środkowego pręta pasa górnego dźwigara kratowego, który uległ pionowemu złamaniu, a następnie również wybojczeniu w kierunku poziomym (rys. 4, zdjęcie górne). Po wybojczeniu tego pręta i powstaniu w jego miejscu przegubu doszło do powstania znacznej siły poziomej, która doprowadziła do przekroczenia nośności na zginanie słupów w zewnętrznej osi A (rys. 4, zdjęcie dolne). Przeciwny rząd słupów, wskutek ich połączenia z mocną konstrukcją żelbetową hali pozostał nieodkształcony. Nie doszło również do pionowego złamania podciągów kratownicowych w osi A, które złożyły się do wnętrza wiaty wraz ze słupami (rys. 4, zdjęcie dolne). Ostatecznie zawaleniu uległ cały dach wraz ze słupami w zewnętrznej osi A.





Rys. 4. Zniszczona konstrukcja wiaty (grudzień 2012 r.)

Fig. 4. Destroyed structure of the shed (December 2012)

DESTRUCTION AS A RESULT OF ERRONEOUS STATICAL DIAGRAM

Summary

The paper presents an example of destruction of a shed caused by errors in design (erroneous statical diagram) and errors in execution (additional bending moments acting on the upper chord and increase of buckling length of the upper chord).